



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos
Regulados

**GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA**

Lic. Francisco Javier Blanco Ramírez

Asesorado por el M.Sc. Ing. Julio Andrés Gaitán Álvarez

Guatemala, enero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LIC. FRANCISCO JAVIER BLANCO RAMIREZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. JULIO ANDRES GAITAN ALVAREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS
REGULADOS**

GUATEMALA, ENERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Alfredo Boj de León
SECRETARIO	Mtro. 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:

GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 09 de noviembre de 2022.



Lic. Francisco Javier Blanco Ramírez

LNG.DECANATO.OI.025.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA**, presentado por: **Lic. Francisco Javier Blanco Ramírez**, 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:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, enero de 2024

JFGR/gaac



Guatemala, enero de 2024

LNG.EEP.OI.025.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA”

presentado por **Lic. Francisco Javier Blanco Ramirez** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA** del estudiante **Francisco Javier Blanco Ramirez** quien se identifica con número de carné **202290262** del programa de Maestria En Gestion 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.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"GENERACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN ÁREAS DE BAJA COBERTURA DE GUATEMALA"** del estudiante **Francisco Javier Blanco Ramirez** del programa de **Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné 202290262.

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



JULIO ANDRÉS GAITÁN
INGENIERO ELÉCTRICISTA
COLEGIADO No. 12.590

Msc. Ing. Julio Andrés Gaitán Alvarez

Colegiado No. 12590

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme realizar una más de mis metas.
- Mis padres** Ana María Ramírez y Giovani Blanco por traerme al mundo y guiarme a través de él; mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
- Mi hermana** Eva María Rivera, por su apoyo y compañía durante mi vida.
- Mis abuelos** Tereso Aroche, María Luisa Rodríguez, Francisco Javier Blanco (q. d. e. p.) y Julia Morales, por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda mi vida.
- Familia y amigos** Quienes con su apoyo han facilitado el camino para culminar cada etapa importante.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> que permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por acompañarme durante la carrera.
Mi asesor	MSc. Ing. Julio Andrés Gaitán, por guiarme durante el trabajo de graduación.
Mi grupo de Maestría	Derick Alvarado, Alejandro Retana, David Lagos y Hugo Salic, por acompañarme durante todo el proceso y porque gracias al apoyo y constancia crecí de manera personal y profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Situación actual de la energía en Guatemala	5
2.2. Clasificación de los recursos energéticos.....	5
2.3. Energía en el mundo	7
2.4. Energía fotovoltaica.....	9
2.4.1. Ventajas.....	10
2.4.2. Desventajas	11
2.5. Componentes de un sistema integral	12
2.5.1. Célula o celdas solares.....	12
2.5.1.1. Parámetros críticos de la célula.....	14
2.5.2. Módulo fotovoltaico	14
2.5.3. Regulador de carga solar	15
2.5.4. Inversor.....	16
2.5.5. Acumuladores (baterías)	17

	2.5.5.1.	Clasificación de baterías	19
2.6.		Topologías en sistemas fotovoltaicos.....	21
	2.6.1.	Sistema de generación aislado	22
	2.6.2.	Sistemas de generación aislados sin acumulación	24
	2.6.3.	Sistemas de generación aislados con acumulación	24
	2.6.4.	Sistemas de generación conectados a la red.....	25
2.7.		Mapa de potencial solar en Guatemala.....	26
2.8.		Marco regulatorio	28
	2.8.1.	Ley de Incentivos	28
	2.8.2.	Norma Técnica de GDR	29
3.		PRESENTACIÓN DE DATOS	31
3.1.		Factores en el entorno de las comunidades rurales.....	31
	3.1.1.	Índice de electrificación en Guatemala.....	31
	3.1.2.	Índice de áreas protegidas a nivel nacional.....	34
3.2.		Aspectos Importantes que motivan tecnologías alternas	35
	3.2.1.	Consumo de electricidad en el área rural	35
	3.2.2.	Costos de la energía eléctrica	36
	3.2.3.	Costos de equipos de sistema fotovoltaico	37
	3.2.4.	Contexto social de la familia guatemalteca	38
	3.2.5.	Equipos de mayor presencia y consumo en hogares	39
3.3.		Requisitos técnicos y ambientales de la tecnología	41
	3.3.1.	Conceptos constructivos en hogares	41
	3.3.2.	Comportamiento del consumo en hogares rurales	43

4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
	CONCLUSIONES	49
	RECOMENDACIONES	51
	REFERENCIAS	53
	APÉNDICES	55
	ANEXOS	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Árbol del problema.....	XVII
Figura 2.	Balances energéticos nacionales.	6
Figura 3.	Perspectiva de crecimiento de la demanda	9
Figura 4.	Estructura de la célula solar.....	13
Figura 5.	Sistema de conexión del regulador.....	16
Figura 6.	Clasificación de los sistemas fotovoltaicos	22
Figura 7.	Esquema instalación aislada	23
Figura 8.	Esquema en instalación conectada a la red	26
Figura 9.	Mapa potencial solar.....	27
Figura 10.	índice de cobertura eléctrica departamental año 2022	32
Figura 11.	índice de cobertura eléctrica nacional 2022.....	33
Figura 12.	Mapa de áreas protegidas en Guatemala.....	34
Figura 13.	Ingresos mensuales en sector laboral	39
Figura 14.	Aparatos con mayor consumo en hogares	40
Figura 15.	Material predominante en paredes exteriores (%) de viviendas rurales.....	42
Figura 16.	Material predominante en techos (%) de viviendas rurales	43
Figura 17.	Comportamiento del consumo	44

TABLAS

Tabla 1.	Características de los tipos de baterías.....	20
Tabla 2.	Tecnologías de baterías	21
Tabla 3.	Situación actual de la electrificación en Guatemala	36
Tabla 4.	Registro histórico del pliego tarifario en Guatemala	37
Tabla 5.	Presupuesto promedio de implementación	38

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
°C	Grados Celsius
Hz	Hercio
J	Joule
kW	Kilowatt
km	Kilómetro
kV	Kilovoltio
MW	Megavatio
MWh	Mega watt hora
m	Metro
m²	Metro cuadrado
mm	Milímetro
Ω	Ohmio
'	Pies o minutos
P	Potencia
“	Pulgadas o segundos
UV	Ultravioleta
W	Watt

GLOSARIO

AC	Corriente alterna
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Área protegida	Espacio geográfico delimitado con el fin de conservar el hábitat natural existente.
Asequible	Todo objetivo que se puede alcanzar con facilidad.
BT	Baja tensión
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas
DC	Corriente directa
Demanda energética	Cantidad de energía necesaria para que un consumidor pueda satisfacer sus necesidades.
Eficiencia	Capacidad para realizar o cumplir de manera adecuada una función.
Energía radiante	Energía que poseen las ondas electromagnéticas.

Financiamiento	Capital que se concede a una entidad para emprender un proyecto.
Fotovoltaico	Sustancia o cuerpo que genera fuerza electromotriz cuando se somete a la acción de radiación luminosa.
GDR	Generador Distribuido Renovable
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
IPP	Productor de energía independiente (<i>Independent power producer</i>).
KPI	Indicador clave de rendimiento (<i>Key performance indicator</i>)
Matriz energética	Representación cuantitativa de la totalidad de energía utilizada por un país.
MT	Media tensión.
O&M	Operación y mantenimiento
Renovable	Proveniente de un recurso presente en la naturaleza de manera inagotable.
SNI	Sistema Nacional Interconectado

Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.
Topografía	Técnica de representación en un plano la superficie o el relieve de un terreno.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
UPS	Sistema de alimentación Ininterrumpida (Uninterruptible Power Supply).
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator.
Vatio	Unidad de medida de potencia

RESUMEN

Guatemala cuenta con un gran porcentaje de población rural que carece de servicios esenciales asequibles, entre ellos el servicio de energía eléctrica, a pesar de que para el año 2018 se presentó un índice global de cobertura del 91.23 % del territorio nacional, aún existe aproximadamente un 18.7 % de comunidades rurales a donde aún no llega la cobertura eléctrica por medio de la red normada de distribución, esto derivado de múltiples factores que dificultan el acceso del servicio a dichas comunidades.

Debido a que el servicio de energía eléctrica es de vital importancia en el desarrollo de los hogares, surgen alternativas como la generación de energía solar fotovoltaica para suplir esta necesidad. La micro generación solar fotovoltaica posee muchos beneficios en temas de sostenibilidad y los constantes avances técnicos en los equipos inmersos en estos sistemas han provocado la expansión de su aplicación tanto en múltiples capacidades de generación, como también las áreas geográficas que pueden explotar dicha tecnología, lo que motiva a que sea una opción muy viable para suplir de manera inmediata la falta de cobertura en el servicio de energía eléctrica regulada la cual en muchos lugares aun no cuenta con red construida.

De modo que el objetivo del presente análisis es definir la viabilidad técnico económica de los micro sistemas de generación solar fotovoltaica y su eficiente implementación en la realidad de los hogares Guatemaltecos, ya que como es conocido los ingresos por hogar rural en su mayoría provienen de economías informales, la arquitectura y entornos climáticos de las viviendas son variadas por región y la priorización en la cobertura de gastos directos con el bienestar del

núcleo, son factores que dificultan muchas veces optar por materializar proyectos de micro generación, sin embargo, la oferta comercial actual facilita la implementación de esta solución a escala residencial.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Por medio de canales oficiales se conoce que las redes de distribución de energía eléctrica residencial aun no logra cubrir el 100 % de cobertura a toda la población a nivel nacional, ya que según el plan Indicativo de Electrificación rural 2020-2050, presentado por el Ministerio de Energía y Minas, en el país se tiene un 91.23 % de cobertura eléctrica, de la cual el índice más alto corresponde a la región metropolitana; así mismo cabe mencionar que el avance en estos planes se realizan con cierta lentitud derivado del conflicto social que padecen algunas poblaciones, mitos y paradigmas de comunidades, asignación de presupuestos, capacidad operativa limitada para la ejecución de obras de construcción de tendidos de energía eléctrica, así como también existen casos donde la topografía y condiciones naturales de los terrenos dificultan concretar las obras antes mencionadas.

- Contexto general

Durante muchos años las comunidades se han visto inmersas en muchas afectaciones que inciden directamente en su desarrollo comunal y social derivado del poco avance en la ejecución de planes de electrificación, así como también por factores políticos y conflictos sociales que frenan la inversión en dichas áreas. Este es un tema que aqueja al país y que se ven inmersos muchos actores involucrados, la diversidad de factores van desde el punto de vista económico como social, pero en esencia se dará enfoque a uno, el servicio de energía eléctrica, para el cual, aunque existen avances significativos en la cobertura del servicio de energía eléctrica, no se puede hacer caso omiso de que aún hay áreas

rurales, algunas con pobreza extrema y alejadas de la actividad social que no se benefician del vital recurso antes mencionado.

- Descripción del problema

Se conoce que las tecnologías de generación de energía eléctrica son variadas y cada día sus avances prácticos originan que aumente su eficacia y sus precios sean accesibles, sin embargo, en el plano nacional la realidad es que aún no se desarrollan con plenitud en las áreas rurales, esto porque las obras de electrificación rural dependen de cantidad mínima de usuarios a conectar, los terrenos para construir son topográficamente inaccesibles o existen conflictos con los propietarios y en otros casos la inversión es demasiado elevada y por tal razón terminan . Esta situación no solo afecta el desarrollo social sino también dificulta el acceso a los esenciales.

- Formulación del problema

Al profundizar sobre todas las causas que motivan el análisis de la problemática central surge el siguiente cuestionamiento:

- Pregunta central

¿Como obtener energía eléctrica residencial en los hogares donde aún no es posible construir una red de distribución de electricidad regulada?

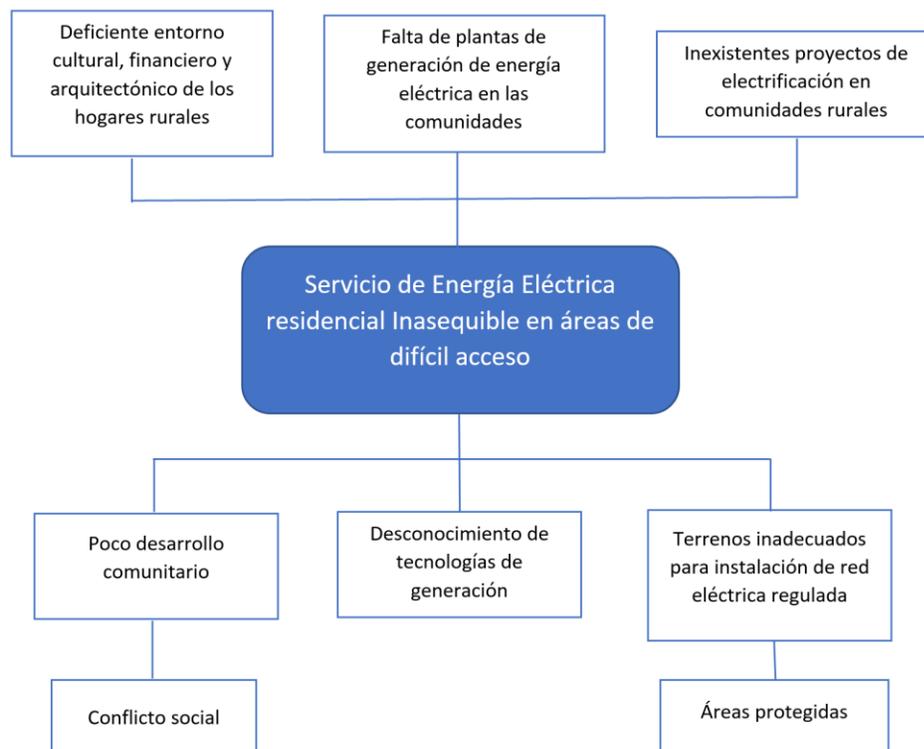
- Preguntas auxiliares

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son los factores del entorno de las comunidades sin energía eléctrica, que generan impedimentos para obtener un suministro eléctrico regulado?
- ¿Qué aspectos posicionan la tecnología fotovoltaica como la más eficiente para la generación de energía eléctrica en las viviendas rurales?
- ¿Qué especificaciones constructivas y entorno ambiental es el ideal para la instalación de generación con tecnología fotovoltaica?

Figura 1.

Árbol del problema



Nota. Descripción gráfica del problema. Elaboración propia, realizado con Visio.

- Delimitación del problema

Guatemala cuenta con un alto índice potencial para generación de energía eléctrica renovable, así mismo, dentro de la Política Energética 2014-2027, se contempla que para el 2025 el 80 % de la matriz energética provenga de fuentes renovables.

Si se trasladan estos datos a la escala de micro generación residencial el panorama no es muy variable, ya que las tecnologías conforme evolucionan se adaptan a diferentes escalas de producción. Para implementar estos sistemas prevé que la adecuada utilización de estos recursos pueda suplir a corto plazo la necesidad de contar con el servicio de energía eléctrica en áreas de difícil acceso, que con el constante avance tecnológico y social hacen de suma relevancia el contar con el vital servicio ya que muchas actividades cotidianas y esenciales se apoyan en este para su correcto funcionamiento.

Sin embargo, la tecnología de generación fotovoltaica es poco conocida e implementada en el mercado guatemalteco, razón por la cual es de suma importancia conocer todos los aspectos relevantes que determinen los puntos de referencia para que sea una opción eficiente y viable en los hogares con difícil acceso a la energía eléctrica.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿La micro generación fotovoltaica puede suplir a corto plazo la necesidad de contar con energía eléctrica en los hogares?

OBJETIVOS

General

Establecer la micro generación fotovoltaica como alternativa de generación de energía eléctrica residencial para suplir la falta de suministro eléctrico regulado.

Específicos

1. Determinar qué factores del entorno de las comunidades sin energía eléctrica que provocan inconvenientes para que el suministro aun no sea una realidad en la comunidad.
2. Definir la viabilidad técnico-económica de la tecnología solar fotovoltaica de forma aislada para suplir la necesidad de energía eléctrica en los hogares rurales guatemaltecos.
3. Analizar el diseño e infraestructura de viviendas, así como aspectos ambientales que determinen la viabilidad de la tecnología fotovoltaica.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Durante el análisis de los datos recolectados por medio de las diferentes variables se buscó conocer si las comunidades con baja cobertura de energía eléctrica regulada se encuentran afectadas por condiciones de fuerza mayor en el entorno ecológico como lo son las grandes extensiones de bosques y terrenos protegidos que impiden construcciones de líneas de distribución de energía eléctrica o bien si dependen tanto de la viabilidad de proyectos de electrificación rural que se generan por consumo por usuarios.

También se logró identificar el nivel de posibilidad de la implementación de los sistemas de microgeneración solar fotovoltaica en los hogares rurales, para lo que se tomara en cuenta los costos iniciales de construcción comparados con los ingresos mensuales por núcleo familiar.

Por último, todos los datos arrojados del análisis fueron comparados con los datos actualizados según bases informáticas de canales oficiales sobre la problemática de cobertura a nivel nacional y comparada con la normativa vigente para definir la viabilidad de dichos proyectos de micro generación residencial fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

Durante la historia es ampliamente conocido que el ser humano se ha valido del sol para obtener el mayor provecho energético con el fin de satisfacer diferentes necesidades, sin embargo, se sabe que cada año el sol suministra cuatro mil veces más cantidades de energía que la que la humanidad aprovecha y consume, razón por la cual, se puede determinar que es una fuente de energía con gran potencial para el aprovechamiento y explotación sustentable.

En comparación con tecnologías que basan su producción en combustibles fósiles, el sol es una fuente de energía renovable y relativamente segura. Esto ha incentivado el constante desarrollo e investigación para el aprovechamiento de la energía solar, lo cual ha trascendido de la fase experimental hacia la materialización de proyectos solares por medio de paneles solares para ser explotado a nivel domiciliario, comercial e industrial como alternativa para ofrecer una fuente de energía accesible.

Guatemala, tiene múltiples los inconvenientes que dificultan el avance en la cobertura eléctrica, tales como bajos niveles de desarrollo económico, conflicto social y cultural en diferentes regiones del país, así como también la topografía demográfica, provocan que la construcción y operación de redes eléctricas normadas de distribución del fluido eléctrico tengan un costo muy elevado, lo cual despierta preocupación como consecuencia de la necesidad energética que se demanda en los diferentes hogares debido al crecimiento exponencial en la población, así como las repercusiones debido al alto costo que se pueda generar para suplir el servicio eléctrico de la manera tradicional, sin dejar de lado los impactos ambientales que pueda generarse.

Por lo anterior expuesto, surge la necesidad de buscar alternativas que ayuden a agilizar la satisfacción de demanda energética en las áreas rurales del país y que a su vez eleven el nivel de desarrollo en dichas comunidades. Es en este punto donde los sistemas de micro generación solar fotovoltaica toman relevancia y al analizar su diseño, el entorno climático y social de las regiones a adoptar su implementación y los diferentes aspectos técnico-económicos inmersos en la solución, puede incentivar los niveles de adopción de la tecnología a una realidad en hogares rurales de nivel socioeconómico moderado, el incremento en la tecnificación a nivel rural y desarrollo integral de las comunidades rurales.

1. ANTECEDENTES

Guatemala se caracteriza por contar con un conjunto de leyes y normativas formales y vigentes que promueven la generación renovable, tal es el caso de la Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable, del Ministerio de Energía y Minas, según Decreto No. 52-2003 y acuerdo gubernativo No. 211-2005. Así mismo existen diferentes organizaciones y trabajos de investigación que basan sus esfuerzos en el análisis de alternativas de micro generación de energía eléctrica a escala residencial, estos servirán de valioso soporte para la investigación en desarrollo. A continuación, se mencionan algunos que aportan información importante:

Con base en el Decreto Número 93-96 se entiende que existe libertad para la generación de electricidad en todo el territorio del país y no requiere de ninguna autorización o previa condición por parte del estado, más que las instituciones reconocidas por la Constitución Política de la República de Guatemala y la legislación vigente en el país.

Guatemala pretende alcanzar en primer lugar el 93.5 % establecido en el Plan Nacional de Gobierno 2020 – 2024, 95 % del índice de cobertura eléctrica en el año 2027, establecido en la Política Energética 2013-2027, y al menos 99.99 % de cobertura eléctrica antes del año 2032. Plan Indicativo de Electrificación Rural 2020-2050, Ministerio de Energía y Minas

De acuerdo con *Henry, Baker, Shaw, Kondash, Leiva, Castellanos, Wade, Lord, Van Houtven, Redmon, (2021)*. La pobreza energética se desarrolla en presencia de altos costos de energía en el servicio regulados, ingresos familiares

bajos, infraestructura energética insuficiente o inexistente para la demanda, ineficiencia energética o una combinación de estos factores. Aunque en 2019 se estima que el 90 % de la población mundial tenía algún tipo de acceso a la electricidad (esto comparado con el 80 % que promediaba en 2010), la electrificación no aborda necesariamente la pobreza energética ni garantiza un desarrollo económico y social significativo.

Lo más relevante para el siguiente protocolo a desarrollar es lo identificado en el artículo *Improving access to modern energy services: insights from case studies* Bazilian, M., Nussbaumer, P., Eibs-Singer, C., Brew-Hammond, A., Modi, V., Sovacool, B., Aqrawi, P.-K., (2012). En primer lugar, las alternativas limpias, en particular los sistemas solares fotovoltaicos, pueden mejorar el nivel de acceso a la energía en áreas que son de costos elevados energéticos o difíciles de alcanzar a través de la carretera energética existente, generalmente en países de ingresos bajos y medianos bajos.

Otro importante hallazgo se refleja en un estudio titulado *Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada* González, Rincon y Lopez, (2019), mediante el cual se hace un estudio al punto más eficiente para conectar micro redes a instalación eléctrica convencional de servicio normado eléctrico como también el funcionamiento integral de todo un conjunto de equipos utilizados para la micro generación de manera aislada, en dichos análisis se suponen dos tipos de funcionamiento, por lo que existe diferencia entre estos equipos y arquitectura por ejemplo, en un caso se plantea la utilización con equipos DC y la segunda con la implementación de un inversor para poder interconectarse a la red eléctrica normada y utilizar equipos AC según sea el caso.

El trabajo de investigación mencionado en el párrafo anterior indica que el porcentaje de energía eléctrica que se genera en una sistema solar fotovoltaica dependerá en primer lugar, de la radiación del sol incidente y la temperatura a que este expuesto el ambiente, pero también es importante la utilización de convertidores AC/DC, pero que se hace imprescindible tomar en cuenta todos los factores que determinen la eficiencia de posicionamiento ideal donde puedan instalarse convertidores DC / DC, es mucho más favorable colocarlos a la salida de cada caja de conexiones de las topologías de diseño de paneles solares según lo indica los expertos en las aplicaciones fotovoltaicas *Vargas, Medina, Ávila, Pozo, y Salazar*.

En otro enfoque, según los *Gráficos significativos de la energía solar fotovoltaica* (2018) del IES (Instituto de energía solar), en la actualidad se encuentran paneles solares de variadas tecnologías que oscilan en eficiencias de 11.6 % al 26.7 %, esto sucede al integrar la eficiencia del módulo con el de la célula.

En cuanto al costo es de suma importancia mencionar que históricamente, los costos de la implementación de energía fotovoltaica instalada bajaron de 4,90 USD/W en 1998 a 1,28 USD/W en 2011, que es casi el cuádruple. El descenso fue muy pronunciado después de 2008, esto según el documento *Transition towards off-grid photovoltaic systems: Is price the final answer?* (Pranpreya Sriwannawit, 2014).

2. MARCO TEÓRICO

Es importante conocer los conceptos fundamentales que proporciona la base teórica sobre la generación de energía basada en tecnología fotovoltaica lo cual facilita el entendimiento del panorama de aplicación integral en la realidad guatemalteca

2.1. Situación actual de la energía en Guatemala

A través de la historia, las formas sacar provecho de la energía se han clasificado en energía primaria y secundaria. En primer lugar, la energía primaria, es toda aquella fuente de energía que es extraída de recursos disponibles de manera natural, que están presentes en nuestro ecosistema y materiales energéticos no procesados de ninguna manera; mientras que la energía secundaria se le denominará a la fuente de energía obtenida de procesos de conversión de energéticos.

2.2. Clasificación de los recursos energéticos

Es ampliamente conocido que los recursos energéticos primarios tienen diversas aplicaciones, dentro de las cuales destacan, por ejemplo, la generación de energía eléctrica, que se produce a partir del empleo de energéticos como petróleo, carbón, agua, geotermia, biogás, bagazo de caña la cual es conocida en nuestro medio como “biomasa”, solar y eólico.

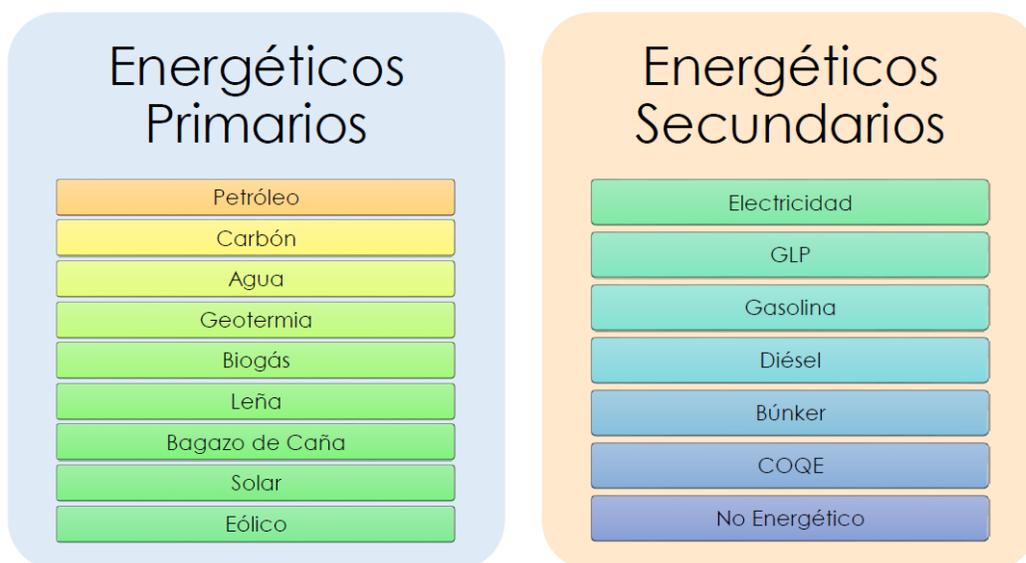
Otra clasificación importante se deriva de la capacidad de recuperación de cada fuente energética y del aporte en la emisión de gases nocivos o de efecto

invernadero que se producen durante su aplicación, es de ahí que se dividen en renovables y no renovables.

Así mismo, los recursos energéticos secundarios son los que presentan una mayor participación y aplicación dentro del balance energético nacional. Lo anterior obedece a la necesidad del uso de estos en más sectores de consumo, tal como es el caso del sector de transporte terrestre que hacen imprescindible el uso de gasolina y diésel en proporciones descomunales, sin embargo, durante los últimos años la demanda de electricidad y gas licuado de petróleo (GLP) también se ha hecho presente por la incursión de tecnologías nuevas en el parque vehicular introducido en el país.

Figura 2.

Balances energéticos nacionales



Nota. La imagen presenta los balances energéticos nacionales conformados por los energéticos primarios y los secundarios. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Plan indicativo de Electrificación rural 2020-2032.*

Por otro lado, la clasificación de no energéticos está definida por los productos que son derivados de fuentes primarias y que su finalidad principal no consiste en generar energía eléctrica u otro tipo de energía de consumo final. Podemos mencionar que incluidos en este grupo se encuentran los subproductos derivados del petróleo utilizados para crear asfalto.

En contraposición a la clasificación de no energéticos, se definen los energéticos secundarios como el COQE y Búnker, los cuáles son subproductos derivados de energéticos primarios, y son empleados generalmente para generación de energía eléctrica.

2.3. Energía en el mundo

Mucha es la información en estos tiempos que demuestran los recursos que pueden proveer energía en todos los tipos se encuentra disponibles alrededor del globo en grandes cantidades, sin embargo, cuando se procede a analizar cada una de las fuentes por separado, se encuentra que la previsión que se conoce difiere del panorama real y que a su vez debe ser tomado desde un enfoque diferente porque cuando de fuentes de energía se trata, el tema debe ser abordado con mucha relevancia y cierto grado de preocupación a nivel mundial, esto porque las fuentes de energía así como proveen muchos beneficios, al no saber explotar de buena manera la misma puede crear situaciones adversas y derivado de esto, mundialmente existen acuerdos y tratados de los que muchos países participan y que su fin principal es mitigar el impacto de la huella de carbono.

Por otro lado, cuando se analiza a detalle la actualidad del panorama o modelo energético que aún prevalece a nivel mundial es de poca relevancia en temas de sostenibilidad, las causas pueden ir desde el bajo interés de los

gobiernos por realizar transiciones energéticas, hasta el poco avance que existe en la obtención de nuevas y menos nocivas fuentes de energía, que nos permitan eliminar la dependencia de los combustibles fósiles que de paso se conoce que son limitados a pesar que si existen avances en técnicas y métodos para aumentar las cantidades de dicho recurso.

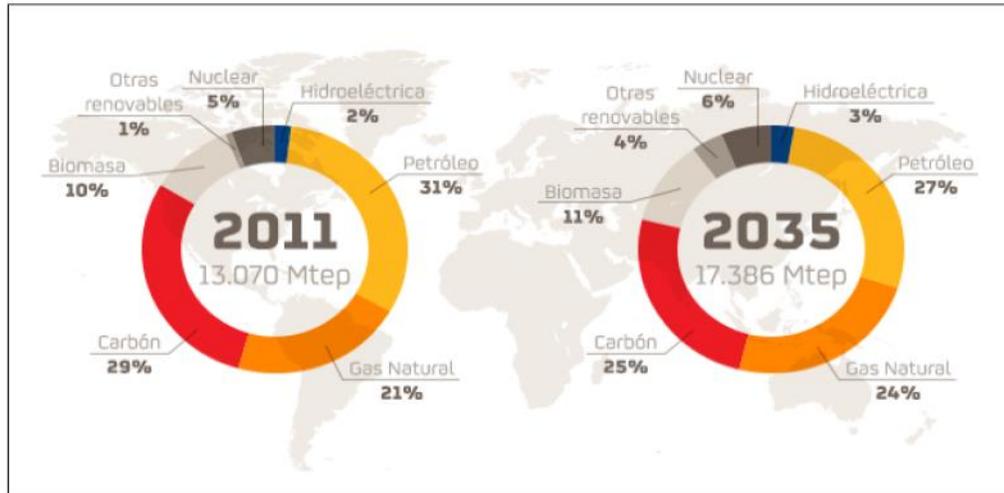
Por la importancia que merecen los temas energéticos, existen revisiones periódicas en todos los aspectos fundamentales para determinar los cambios positivos que se puedan establecer en la materia, lo cual refleja un aliciente al demostrar que la penetración de tecnologías y recursos renovables cada día es más elevada y actualmente asciende a un poco más de la mitad del incremento en la generación en el mundo.

A futuro, las tendencias de innovación y desarrollo de recursos renovables sin duda juegan un papel determinante para la transición de la matriz energética mundial que constituyan las fuentes no renovables como el pilar más importante para satisfacer los requerimientos energéticos que sin duda será de mucho aprovechamiento por las generaciones futuras.

Todos los avances que se puedan dar en materia energética deben ser constantes y de aplicación inmediata, por lo que al seguir esta línea es de suma importancia apostar por escenarios más ecológicos a nivel mundial que garanticen un futuro ambiental más verde y con el menor impacto posible para que se pueda lograr que el desarrollo en todos los ámbitos y huella de carbono que generan estos cambios, se encuentren en sinergia y permitan satisfacer las necesidades esenciales de la sociedad mundial, que al estar en contante crecimiento también puede provocar desbalance si no se presenta ninguna regulación o sistema de mejora en el tema ambiental.

Figura 3.

Perspectiva de crecimiento de la demanda



Nota. Se presenta la perspectiva de crecimiento de la demanda. Obtenido de Agencia Internacional de Energía, (2011-2012), (http://www.repsol.com/es_es/corporacion/conocerrepsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/), consultado el 13 de septiembre de 2022. De dominio público.

2.4. Energía fotovoltaica

Toda la energía que contiene los rayos solares que reflejan en todo el mundo, es un recurso fundamental y ampliamente utilizado en muchas actividades cotidianas vitales, esto porque dicho recurso presenta versatilidad para ser utilizado de múltiples maneras y con ello suplir diferentes necesidades que demanda la sociedad, como por ejemplo puede ser el caso de la agricultura, sistemas de calor, iluminación ilimitada durante ciertos lapsos del día, entre otros que se pueden derivar de estos.

Por lo antes mencionado queda claro que durante toda la historia de desarrollo de nuestra sociedad se han aprovechado todos los beneficios del sol y es ahí donde toma relevancia que en los últimos años la tecnología solar fotovoltaica como método de generación de energía eléctrica ha presentado un aumento considerado en todas sus escalas de utilización.

Cuando se analiza sobre la manera en que se genera energía eléctrica a partir de utilizar la energía del sol se puede indicar que su operación se basa en semiconductores, los cuales son los encargados de convertir la energía proveniente de la radiación solar en corriente eléctrica. Esta a su vez puede ser utilizada tanto de manera inmediata, como también acumulada en un medio de almacenamiento, claro, depende del sistema que se establezca o se elija.

Para lograr el objetivo de transformación indicado en el párrafo anterior, se deben de utilizar elementos activos fotovoltaicos, los cuales son denominados con el nombre de celdas solares o fotovoltaicas. La construcción de estos elementos está conformada principalmente por un transductor encargado de convertir la energía radiante en electricidad y su forma particular es la de un diodo semiconductor, el cual tiene la capacidad de desarrollar un voltaje y cantidad de corriente.

2.4.1. Ventajas

Esta tecnología es una de las energías renovables con mayor utilización a nivel mundial, implementadas en múltiples configuraciones y capacidades según surja la necesidad, esto se debe a múltiples factores los cuales se identifican a continuación.

Esta energía es encontrada en cantidades ilimitadas, y al considerar los usos prácticos se puede concluir que es incalculable e inagotable, esto acompañado a que esta solución ofrece un mínimo impacto ambiental durante su operación.

Ahora bien, cuando se trata de los residuos generados, estos dejan de ser tomados como perjudiciales para el medio ambiente si son gestionados con un proceso de recolección y tratamiento de desechos eficiente, aunque se debe de considerar que estos elementos son de amplia vida útil (los últimos estudios arrojan un promedio de 22 a 32 años, aunque la tendencia es que sea más, debido a su constante investigación y evolución). Por otro lado, se puede considerar que no existe contaminación acústica de ningún tipo pues la operación de las placas solares es silenciosa.

Al tratar el tema de eficiencia energética y ahorro de huella de carbono por contaminación, un campo o instalación solar fotovoltaica puede llegar a lograr un escenario optimo que permita eliminar un promedio de 16 a 20 toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero por un año de operación promedio.

2.4.2. Desventajas

Por todo lo conocido se pensaría que estos sistemas no presentan mayor complicación sin embargo si hay aspectos que se deben tomar en cuenta, aunque la cantidad sea menor, por ejemplo.

En primero lugar lo que es conocido es que la tecnología aún posee costes de implementación elevados, lo cual ha dificultado que la participación a escala micro en diferentes aplicaciones sea bastante limitada, especialmente en hogares o residenciales.

Es necesario contar con una extensión bastante amplia, lo que dependerá de la capacidad del parque solar, ya que para construir un sistema eficiente debe haber holgura entre paneles para aprovechar el espectro solar.

La intensidad o radiación solar es fundamental para el buen funcionamiento de estos sistemas, la cual debe ser fuerte y constante, sin embargo, hay lugares donde esas condiciones no se cumplen e inciden directamente ah que no se aproveche en su totalidad la capacidad de generación.

2.5. Componentes de un sistema integral

Al ser nombrado sistema, queda claro que el mismo está constituido por varios elementos, razón por la cual a continuación, se describirán los principales componentes los sistemas antes mencionados.

2.5.1. Célula o celdas solares

Se puede enfatizar que este elemento es el más importante de la instalación, el cual se caracteriza por tener la capacidad de realizar la conversión directa de los fotones de luz provenientes del sol en energía eléctrica. El conjunto de células agrupadas convenientemente dará lugar al panel solar.

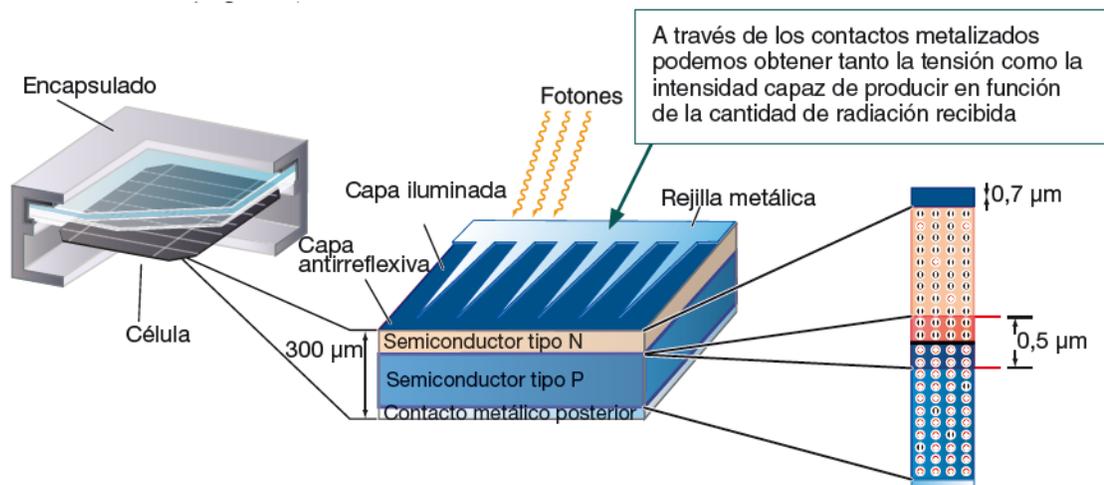
Se puede usar la analogía que una célula solar tiene el comportamiento de un diodo, esto porque la parte expuesta a la radiación solar es la que se denomina N, y el lado en la resguardada en el área de oscuridad, se le denomina P. Los terminales de conexión de la célula están colocados sobre ambas partes del diodo, la construcción se basa en que la cara correspondiente a la zona P se encuentra metalizada por completo (no tiene que recibir luz), por otro lado, la

zona N el metalizado tiene forma de peine, esto con el objetivo principal de que la radiación solar llegue al semiconductor.

Explicado de otra manera, su funcionamiento radica en la capacidad de poder captar los rayos solares, que luego con el uso de los semiconductores que la conforman generar la electricidad buscada, a su vez se genera una corriente eléctrica por lo antes mencionado, que al incidir directamente sobre la célula liberan los electrones presentes en el material semiconductor.

Figura 4.

Estructura de la célula solar



Nota. La imagen presenta la estructura de la célula solar. Obtenido de Corcobado, Carmona. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas.* (p. 12) McGraw-Hill.

2.5.1.1. Parámetros críticos de la célula

Los parámetros principales que se analizan en una célula solar son los que inciden directamente en su funcionamiento y que la variabilidad en uno de ellos define el estado de esta, se podría listar como fundamentales los siguientes:

De suma importancia es dar la relevancia a la corriente lumínica, la cual es la que se genera directamente cuando incide o capta la energía contenida en los rayos del sol que pegan directamente en la célula. Por otro lado, la corriente de oscuridad que no es más que la recombinación de los similares electrón-hueco que se generan en la parte interior del semiconductor.

Voltaje de circuito abierto (open circuit), Esta es considerada como la máxima tensión que pueden ser medidos en los terminales de la célula solar, cuando esta se encuentra operando en vacío, es decir no se cuenta con ninguna carga conectada. Esta es una característica que se presenta de manera intrínseca del material o componente con el que se construye la célula.

Corriente de cortocircuito (short circuit) la cual se refiere valor tope de corriente que se permite circular por la célula. Estas mediciones se ejecutan cuando sus terminales están cortocircuitados. Depende del tipo de célula y de su área. A mayor área, mayor corriente de cortocircuito

2.5.2. Módulo fotovoltaico

Un panel solar o módulo fotovoltaico es el elemento principal o esencial y este se encuentra formado por un conjunto de células, las cuales poseen una conexión eléctrica entre ellas, todas estas son encapsuladas y a su vez son montadas sobre una estructura o marco que las soporta.

Los voltajes que se perciben en sus terminales de salida son medidas en CC o tensión continua, las cuales son diseñadas para valores definidos de voltaje (6V, 12V, 24V...), cabe mencionar que estos valores de tensión en los módulos son lo que definirán la tensión de operación del sistema.

2.5.3. Regulador de carga solar

Este dispositivo es fundamental al momento de operar el sistema, ya que este es el encargado de modular o regular el paso de la electricidad que ha sido generado por los módulos fotovoltaicos y que van con dirección hacia la carga o banco de baterías según sea la configuración.

Por lo anterior, se entiende que su posicionamiento físico ideal es entre los paneles y las baterías o acumuladores, lo cual supone que puede garantizar una larga vida útil para esta, porque una de las características es que las baterías son sometidas a ciclos de carga y descarga constantes y fluctuantes durante la operación. En el caso de que la regulación no fuera adecuada puede provocar disminución en la vida útil y calidad de operación.

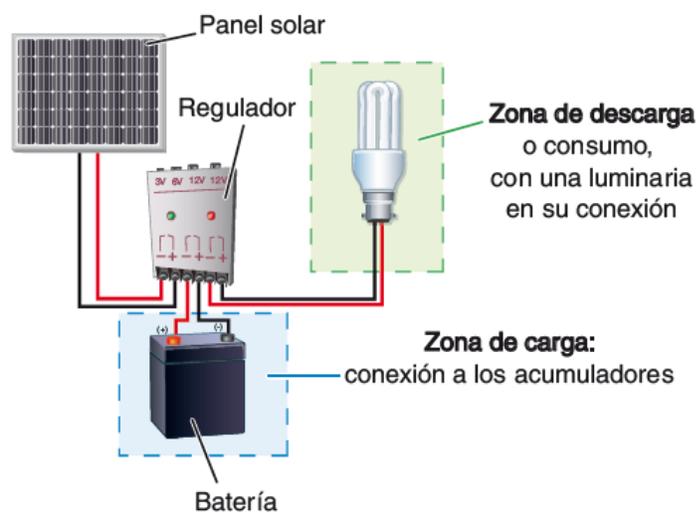
Otro aspecto que considerar y con alta importancia es que este equipo también tiene la peculiaridad que controla la corriente y el voltaje, que a su vez también indica el estado y proceso de carga de los acumuladores, capacidad total de las baterías y blindar a las mismas de protección contra carga excesiva, algunos modelos también cuentan con sensores de temperatura con el fin de que en la carga se mantenga los valores tolerables de calor.

Por lo mencionado con anterioridad, se puede decir que el regulador trabaja en ambas zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es garantizar una carga óptima al acumulador y evitar fluctuaciones o sobrecarga, y

en la parte de descarga se encarga de asegurar que el suministro eléctrico suficiente mientras las baterías tengan un nivel mínimo de carga, con lo que se logra evitar la descarga desmedida en la batería.

Figura 5.

Sistema de conexión del regulador



Nota. La figura presenta el sistema de conexión del regulador, Obtenido de Corcobado, Carmona. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. (p. 12) McGraw-Hill.

2.5.4. Inversor

Este dispositivo también es conocido en el medio como transformador o convertidor, este dispositivo es el encargado de transformar la corriente continua que se produce en las células y módulos fotovoltaicos en tensión alterna que es la utilizada en la mayoría de cargas, otro concepto también es la conversión de la corriente almacenada en las baterías que al pasar por este equipo se convierte

en corriente alterna, la cual es la utilizada para alimentar las cargas o para ser inyectada en la red de distribución eléctrica.

Es decir, que entre sus funciones principales está el sincronizar la onda eléctrica generada, la cual es continua, con la corriente eléctrica de la red de distribución normada que encuentra en onda alterna con el fin de que su sincronía sea satisfactoria.

Debe cumplir con características mínimas para garantizar la operación eficiente las cuales podemos describir las siguientes:

Alta eficiencia ya que su funcionamiento oscila en un amplio rango de potencias. También, bajo consumo en vacío, pues cuando no se encuentren cargas conectadas no debe comportarse como una de ellas.

Los picos o fluctuaciones de voltaje son latentes en el sistema por lo cual debe cumplir con alta fiabilidad y resistencia a los mismos tanto en operación como en el arranque o conexión de cargas. Así mismo es fundamental que proporcione protección contra cortocircuitos e inversión de polaridad pues es un escenario que se puede presentar.

Por último, nos debe de garantizar la seguridad, tanto para la instalación, como para el ser humano que se encuentren en manipulación del sistema.

2.5.5. Acumuladores (baterías)

Estos dispositivos son capaces de transformar la energía química en energía eléctrica. Se debe tomar en consideración que los niveles de generación de electricidad por parte de los módulos no son uniformes, esto es debido a una

diversidad de motivos, tanto predecibles, como fortuitos, siendo aquí cuando es de vital importancia este dispositivo.

Las baterías desempeñan tres funciones principales en un sistema fotovoltaicos autónomos:

De la más importante se puede nombrar la autonomía al satisfacer las necesidades de consumo en cualquier momento sin importar el estado de generación, así mismo, suministro de picos de intensidad cuando las corrientes de trabajo de arranque excedan a la capacidad de suministro del sistema de generación fotovoltaico, por ejemplo, para arrancar motores.

En cuanto a calidad del voltaje debe suministrar estabilidad en los valores de voltaje, ya que con esto se evitan fluctuaciones de corta y larga duración que puedan generar daños en los equipos de consumo.

Al momento de elegir una batería o acumulador se deben de considerar parámetros principales tanto constructivos como de operación, como los que se mencionan a continuación.

La capacidad de estos equipos, que se traduce a la cantidad de energía eléctrica que puede alcanzarse en una descarga completa del acumulador partiendo de un estado de carga completa del elemento, su unidad de medida es en amperios hora (Ah).

Eficiencia de carga, es la que refiere a la relación que se da entre la energía empleada para cargar la batería y la que energía que realmente se está almacenando en el acumulador. De manera ideal se busca que este valor alcance un valor lo más cercano posible al 100 %, ya que esto indicaría que toda la

energía utilizada sería aprovechada cuando sea suministrada a una carga. Si la eficiencia en el equipo es baja, se vuelve necesario crecer en número de paneles fotovoltaicos para obtener los resultados esperados en la generación.

Al tratarse la autodescarga nos referimos a la etapa mediante la cual la batería, cuando no está en uso, se descarga de forma gradual.

Por último, es necesario dimensionar la profundidad de descarga, que al referirse a esto se puede decir que se trata de la cantidad de energía, en porcentaje, que es aprovechada de la acumulada en la batería durante una fase de descarga, esto al tomar en consideración que el acumulador se encuentra cargado en su totalidad.

Este último concepto también está muy ligado con la duración o vida útil de la batería en sí. Por ejemplo, si los ciclos de descarga son cortos, se puede anticipar que la duración del acumulador será mayor que si se lo somete a etapas de descargas profundas que lo que provocarían sería un deterioro del equipo más avanzado.

2.5.5.1. Clasificación de baterías

Estas son clasificadas en función de las diferentes tecnologías y materiales de fabricación, como también de los electrolitos empleados en esta. Para un mejor análisis, en la siguiente tabla se comparan los principales tipos de acumuladores en el mercado.

Tabla 1.*Características de los tipos de baterías*

Tipo de batería	Tensión por vaso (V)	Tiempo de recarga	Autodescarga por mes	N.º de ciclos	Capacidad (por tamaño)	Precio
Plomo-ácido	2	8-16 horas	< 5 %	Medio	30-50 Wh/kg	Bajo
Ni-Cd (níquel-cadmio)	1,2	1 hora	20 %	Elevado	50-80 Wh/kg	Medio
Ni-Mh (níquel-metal hydride)	1,2	2-4 horas	20 %	Medio	60-120 Wh/kg	Medio
Li ion (ión litio)	3,6	2-4 horas	6 %	Medio - bajo	110-160 Wh/kg	Alto

Nota. La tabla contiene las características de los tipos de baterías. Obtenido de Corcobado, Carmona. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas.* (p. 14) McGraw-Hill.

Las baterías con mayor empleo en los sistemas de generación solar fotovoltaico son de plomo-ácido, aunque empiezan a ser utilizadas las de litio, esto por los beneficios presentados. La mayor influencia en la decisión de que modelo utilizar se basa en el precio y tiempo de vida útil, ya que es conocido que ambos aspectos deben adecuarse con el fondo de la instalación.

Tabla 2.

Tecnologías de baterías

TIPO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	ASPECTO
Tubular estacionaria	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclado profundo. • Tiempos de vida largos. • Reserva de sedimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio elevado. • Disponibilidad escasa en determinados lugares. 	
Arranque (SLI, automóvil)	<ul style="list-style-type: none"> • Precio. • Disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mal funcionamiento ante ciclado profundo y bajas corrientes. • Tiempo de vida corto. • Escasa reserva de electrolito. 	
Solar	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación similar a SLI. • Amplia reserva de electrolito. • Buen funcionamiento en ciclados medios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos de vida medios. • No recomendada para ciclados profundos y prolongados. 	
Gel	<ul style="list-style-type: none"> • Escaso mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro rápido en condiciones de funcionamiento extremas de V.I. 	

Nota. La tabla presenta los elementos por considerarse para las tecnologías de baterías. Obtenido de Corcobado, Carmona. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas.* (p. 23) McGraw-Hill.

2.6. Topologías en sistemas fotovoltaicos

Diferentes son las soluciones que se emplean para la micro generación residencial fotovoltaica varían de manera directa por la forma de utilización y necesidad de generación y suministro. Los componentes utilizados en su mayoría son los mismos ya que hay equipos que se hacen imprescindibles para cumplir con el cometido. Pero dependiendo de la funcionalidad que se busque emplear al sistema o bien la necesidad en la manera de suministrar energía eléctrica a la carga conectada son aspectos fundamentales que influyen directamente en la decisión del tipo de topología a implementar. En el presente analizaremos de

manera integral todos los aspectos constructivos y de funcionalidad que ofrecen las configuraciones más utilizadas.

Figura 6.

Clasificación de los sistemas fotovoltaicos



Nota: Clasificación de sistemas de generación solar fotovoltaica. Elaboración propia, realizado con Visio.

2.6.1. Sistema de generación aislado

El primer tipo de sistema por analizar se caracteriza por la finalidad de su implantación, la cual es suministrar energía eléctrica a viviendas o centros de carga aislados, que con esto se hace referencia a que no disponen de una conexión de otra fuente de electricidad.

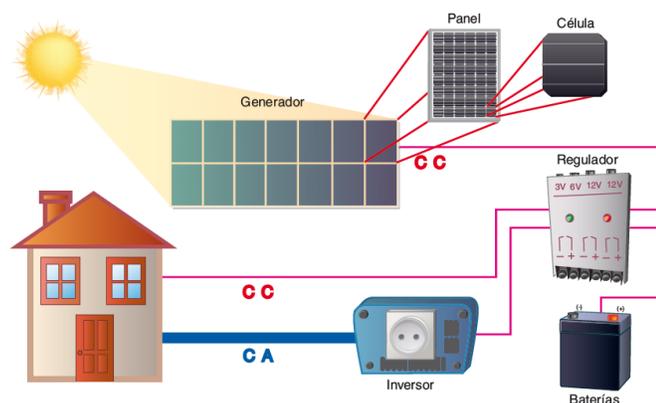
Para conocimiento en el medio también son denominados sistemas autónomos porque son completamente dependientes de ellos mismos y lo que

puedan proveer de energía eléctrica, lo que los posiciona como una excelente alternativa desde el enfoque económico y técnico, que al ser comparados con otros sistemas de micro generación eléctrica se puede determinar que los costos de estos son mucho menores, así como todo el material y procedimiento inmerso para su correcta aplicación.

La implementación de este tipo de configuración permite el acceso al servicio eléctrico de manera un tanto inmediata y sostenible pero que poseen la limitante de que sus cargas idealmente deben ser bien definidas y con casi nula variabilidad en sus valores de consumo, por lo que su aplicación muchas veces se ve limitada a bombeo de agua, iluminación pública y funcionamiento de equipos recurrentes, entre otros. En caso contrario la opción de crecimiento en la carga obliga a crecer de manera simultánea en la expansión de módulos de generación o el reemplazo de dichos módulos por unos de mayor potencia.

Figura 7.

Esquema instalación aislada



Nota. La imagen presenta el esquema de instalación aislada. Obtenido de Corcobado, Carmona. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. (p. 24) McGraw-Hill.

2.6.2. Sistemas de generación aislados sin acumulación

Otro tipo bastante utilizado es el sistema similar al anterior, pero que tampoco posee acumulación o batería, por lo que se puede concluir que no posee ningún tipo de respaldo y su mayor aplicación en el campo real se limita a cargas no críticas que adicional posean la particularidad de operación en periodos del día en que exista radiación solar abundante, por ejemplo, sistemas de bombeo o riego con funcionamiento paulatino, cargas industriales o agrícolas que cumplan su función se limite a horario hábil.

2.6.3. Sistemas de generación aislados con acumulación

Cuando se va a la parte de generación, funcionan igual al modelo anterior, pero con la diferencia que este sistema si posee acumuladores o banco de acumuladores según sea el caso dependiendo de su capacidad y que exijan aplicaciones donde el suministro pueda emplearse en cualquier momento del día, es decir no se vea afectada por el entorno.

El mayor concepto de aplicación de estos es en alumbrado público, que su funcionamiento radica en cargar las baterías de día para que su consumo sea por la noche, también se usan en repetidoras de telecomunicaciones y ya pueden ser vistos en viviendas que por cualquier tipo de situación hagan imposible poder ser conectadas a una red de distribución normada, pero que la necesidad del servicio sea necesaria.

Junto con lo anterior es importante tomar en cuenta que dependiendo de las cargas a conectar es necesario muchas veces acompañar los sistemas de inversores y reguladores para su máximo aprovechamiento.

2.6.4. Sistemas de generación conectados a la red

En esta configuración ya va aumentado la complejidad por la cantidad y sofisticación de equipos que deben emplearse para su operación.

Las mayores características de esta configuración radican en que se compone de todas partes vitales del sistema de generación pero que en algún punto de esta tiene conexión con el servicio de energía regulado, es decir que la carga conectada a estos sistemas posee dos fuentes de suministro eléctrico.

Por lo que es importante considerar que estos sistemas no utilizan sistema de acumulación ya que la energía generada en el día o bien cuando se está aprovechando la radiación solar se emplea directamente en la carga o bien si el consumo no es excesivo puede ser inyectado a la red, que para esta función se debe contar con un equipo especializado que brinda seguimiento al estado de consumo y si no existiera ninguna generación, como es el caso de horas nocturnas en este caso supliría la función de alimentar las cargas el suministro eléctrico normado.

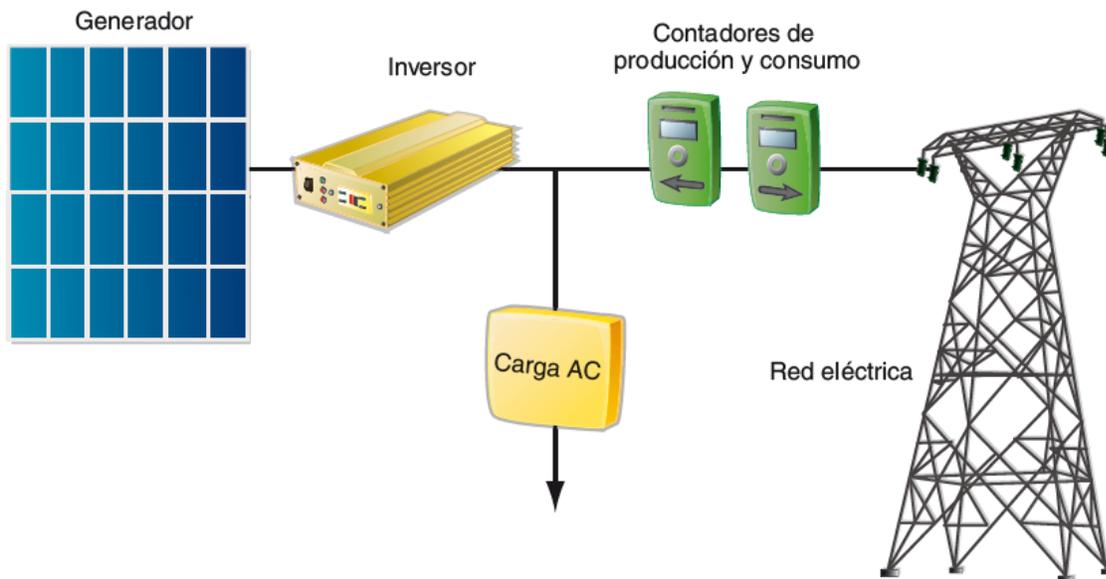
Por lo anterior es muy necesario contar con elementos de protección efectivos que protejan de anomalías tanto al sistema de generación como a la red de distribución normada, ya que de presentarse algún evento inesperado pueda interrumpir o reanudar el suministro si las circunstancias no sean ideales.

También se emplea un medidor eléctrico bidireccional para cuantificar la energía que se consume versus la entregada, esto sirve para llevar el control estadístico de generación y consumo y con la base de datos registrada al final de un tiempo estipulado, generalmente mensual se realiza el balance y con esto

calcular si aún existe energía por cancelar por parte del productor o bien la distribuidora tendrá crédito energético para el auto productor.

Figura 8.

Esquema en instalación conectada a la red



Nota. Se presenta el esquema en instalación conectada a la red. Obtenido de Corcobado, Carmona. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas.* (p. 24) McGraw-Hill.

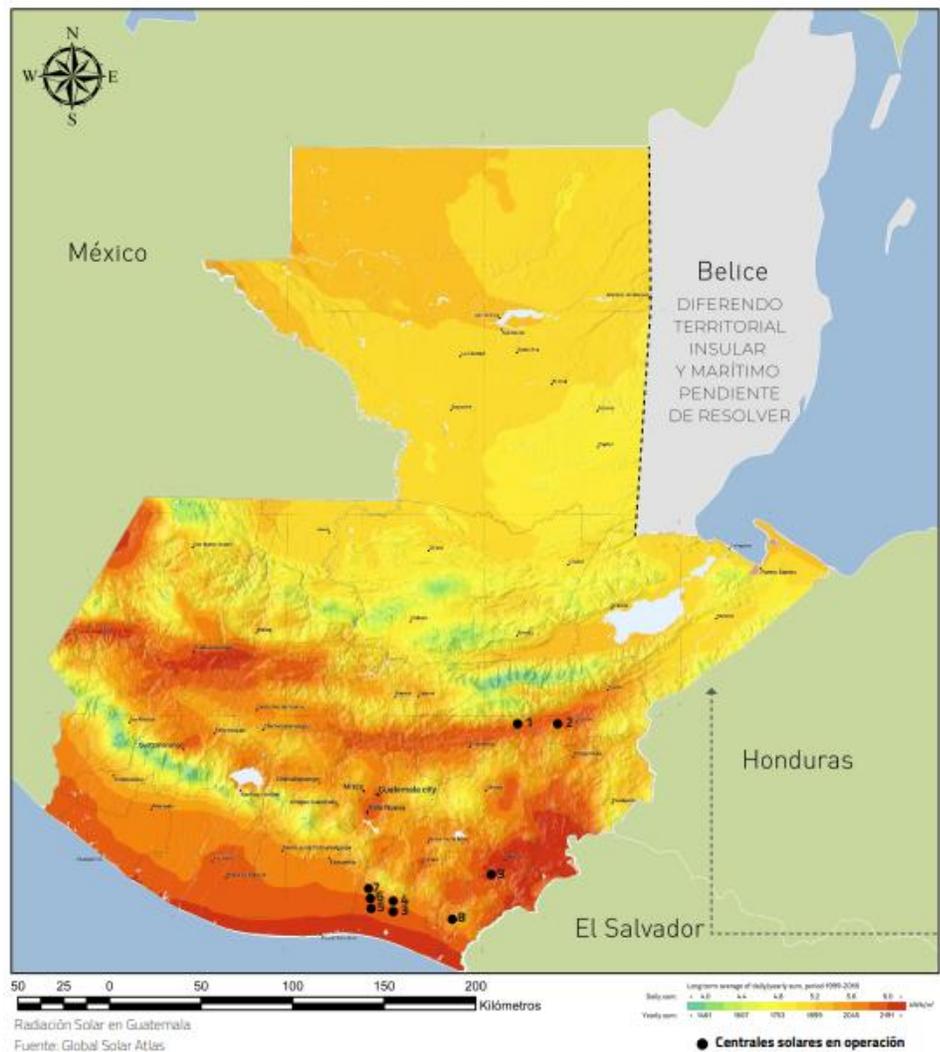
2.7. Mapa de potencial solar en Guatemala

Con la ayuda técnica y financiera del Programa Mapa de Potencial Solar de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se desarrolló el proyecto Solar and Wind Energy Resource Assessment [SWERA] Informe Ambiental del Estado de Guatemala GEO, MARN-URL, (2009), el cual persigue el fin primordial de minimizar las limitaciones que se han tenido durante la historia de implementación de energías renovables, originadas por la carencia de

información y con la intención de promover o potenciar la utilización de la energía eólica y solar, se graficaron los siguientes resultados:

Figura 9.

Mapa potencial solar



Nota: Mapa de potencia solar. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas (2021) *Centrales solares generadoras en operación*. ([Centrales-Solares-Generadoras-en-operación.pdf](#) ([mem.gob.gt](#))), consultado el 12 de octubre de 2022. De dominio público.

2.8. Marco regulatorio

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) , a través de las acciones de la Política Energética 2013-2027, tiene como objetivo principal el promover e incentivar la inversión en el sector energético en diseñar, construir y explotar proyectos de energía renovable y sostenible, y junto con esto no solo se espera lograr el objetivo de diversificar la matriz energética nacional, sino que también objetivos trazados como lo son la estabilidad en los precios de la energía eléctrica en los lapsos de mediano y largo plazo. Por este canal, a través de la “Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable” y la “Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Auto productores con Excedentes de Energía” (NTGDR), se prioriza la contribución a dar cumplimiento al objetivo previamente definido.

2.8.1. Ley de Incentivos

Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, Decreto No. 52-2003 y su reglamento Acuerdo Gubernativo No. 211-2005.

El fin primordial de esta Ley es promover el desarrollo integral de proyectos de generación de energía eléctrica por fuentes renovables, así como también establecer los incentivos fiscales, administrativos y económicos para promover el efecto.

Al momento de describir los principales incentivos podríamos mencionar que se encuentran la exención de impuestos arancelarios para las importaciones de todos los insumos necesario para la implementación de las tecnologías de generación renovable, para esto se incluye también el impuesto al valor agregado

IVA, que de paso debe considerarse que el tiempo de pre-inversión y de construcción de los proyectos no debe exceder de diez años.

2.8.2. Norma Técnica de GDR

La NTGDR establece que la Generación Distribuida Renovable (GDR), se denomina a la producción de energía eléctrica a partir de tecnologías que utilizan recursos renovables siendo estos por ejemplo la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, biomasa y otras que el MEM determine, que serán conectadas a las redes del sistema de distribución normado y cuyo aporte de potencia neta es igual o menor a 5 MW.

Entre los beneficios establecidos en esta normativa son que promueve y facilita en gran medida la instalación y operación de centrales de generación renovable iguales o menores a 5 MW, lo cual permite que estas se puedan conectar a las redes de distribución (13.8 y 34.5 KV) sin importar de que distribuidora se encuentre cercana.

Como otro rubro de las GDR se han definido a los usuarios Auto productores con excedentes de energía, siendo estos los usuarios conectados a la red de distribución que inyectan energía al sistema regulado la cual es producida de manera local por microsistemas de generación residencial, la cual se encuentre ubicada dentro de las instalaciones de consumo y que no perciba ninguna remuneración por dichos excedentes.

3. PRESENTACIÓN DE DATOS

Durante el análisis del entorno relacionado, tanto al ámbito técnico, como económico que se implementen como mecanismos que promueven el estudio sobre alternativas de micro generación residencial eficientes y seguros, que la correcta implementación aporten una descentralización de los recursos energéticos y garanticen un servicio de energía eléctrica asequible a las comunidades rurales en el país se pudo obtener datos referenciales de medios oficiales que respaldan la necesidad de abordar la problemática energética de la que se deriva el tema expuesto.

3.1. Factores en el entorno de las comunidades rurales

Es necesario hacer énfasis en que la situación actual del país presenta aspectos importantes por considerar al momento de diseñar, planificar y construir redes de distribución de energía eléctrica o bien proyectos integrales de electrificación rural, los cuales determinan en gran medida la viabilidad y prioridad de dichos proyectos, además de incidir directamente en la materialización de los planes antes mencionados.

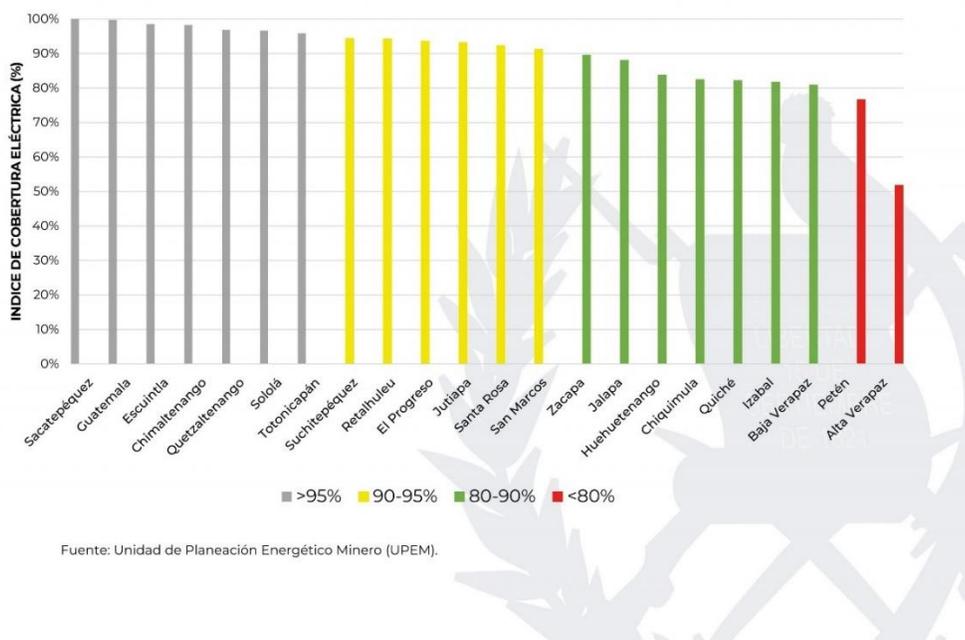
3.1.1. Índice de electrificación en Guatemala

Como base del análisis del entorno situacional de la electrificación rural a nivel nacional, datos tomados del Plan indicativo de Electrificación Rural 2020-2050, emitido por el MEM indica que para el año 2018 Guatemala presento un índice global de cobertura del 91.23 %; los índices obtenidos en las publicaciones reflejan tanto el avance que se tienen en las metas predefinidas a nivel

gubernamental como también la cobertura- del servicio de energía eléctrica normado en las diferentes regiones rurales del país.

Figura 10.

Índice de cobertura eléctrica departamental año 2022



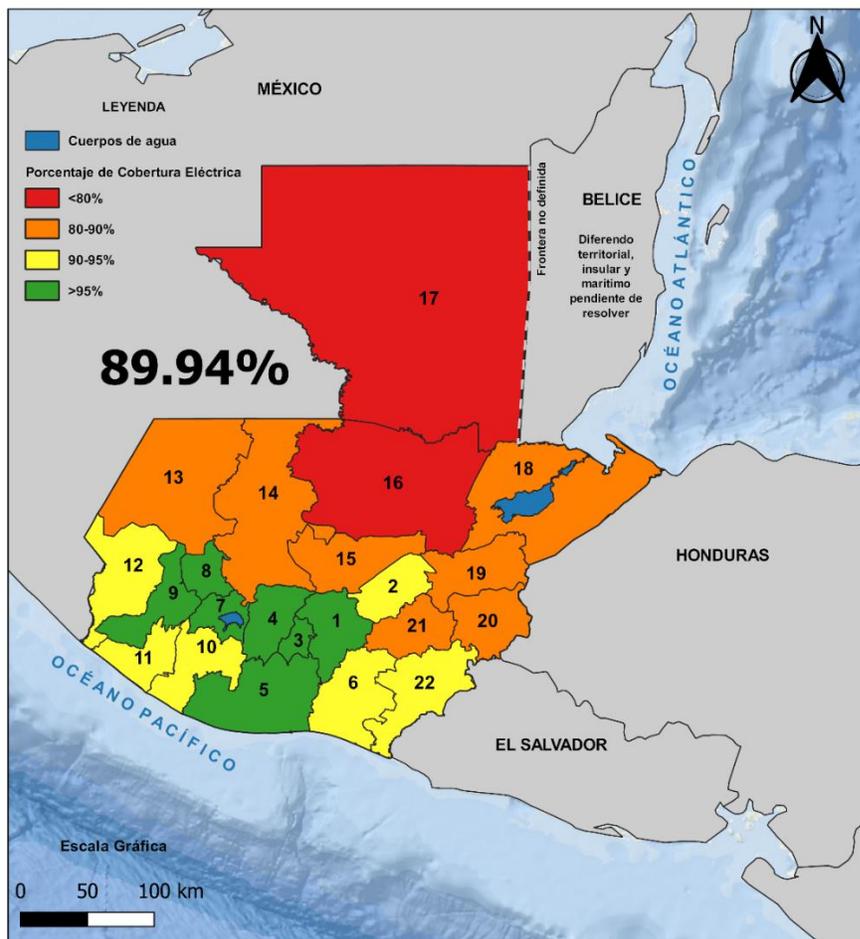
Nota. Información de la situación actual de electrificación en Guatemala. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas (2022). *Información General Electrificación Rural.* (<https://mem.gob.gt/que-hacemos/area-energetica/electrificacion-rural/informacion-general-er/>) consultado el 27 de mayo de 2023. De dominio público.

También es importante resaltar que la materialización de obras de red que comprenden el plan de electrificación rural son tarea ejecutadas de manera compartida entre el INDE y empresas reguladas distribuidoras de energía eléctrica, destacando a DEOCSA y DEORSA quienes poseen en su mayoría

áreas rurales de cobertura, quienes administran más del 85 % de las obras por construir para alcanzar las metas previamente definidas.

Figura 11.

Índice de cobertura eléctrica nacional 2022



- | | | | | |
|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------|
| 1. Guatemala | 6. Santa Rosa | 11. Retalhuleu | 16. Alta Verapaz | 21. Jalapa |
| 2. El Progreso | 7. Sololá | 12. San Marcos | 17. Petén | 22. Jutiapa |
| 3. Sacatepéquez | 8. Totonicapán | 13. Huehuetenango | 18. Izabal | |
| 4. Chimaltenango | 9. Quetzaltenango | 14. Quiché | 19. Zacapa | |
| 5. Escuintla | 10. Suchitepéquez | 15. Baja Verapaz | 20. Chiquimula | |

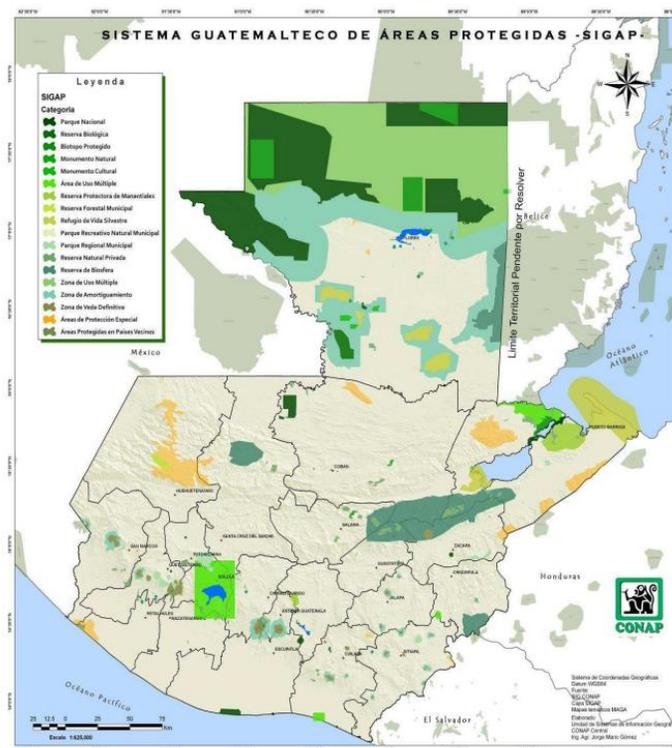
Nota. Información de la situación actual de electrificación en Guatemala. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas (2022). *Información General Electrificación Rural.* (<https://mem.gob.gt/que-hacemos/area-energetica/electrificacion-rural/informacion-general-er/>) consultado el 27 de mayo de 2023. De dominio público.

3.1.2. Índice de áreas protegidas a nivel nacional

Según información del sistema guatemalteco de áreas protegidas SIGAP, actualmente se tiene el registro de 347 zonas protegidas, las cuales ocupan una extensión del 32 % del territorio nacional; el Consejo Nacional de Áreas Protegidas CONAP tiene el mandato constitucional y deber funcional por medio de la ley de áreas protegidas (Decreto 4-89) de garantizar la conservación y promoción del uso sostenible de la diversidad biológica presentes en territorio nacional y las áreas protegidas comprendidas dentro de los límites fronterizos.

Figura 12.

Mapa de áreas protegidas en Guatemala



Nota. Áreas Protegidas de Guatemala. Consejo Nacional de Áreas Protegidas (2022) Áreas protegidas de Guatemala. (<http://138.117.140.116/AreasProtegidas.aspx>), consultado el 25 de mayo de 2023. De dominio público.

3.2. Aspectos importantes que motivan tecnologías alternas

Es indispensable considerar de manera integral los factores de índole social y ambiental que se correlacionan directamente con los usuarios finales al pertenecer al grupo de habitantes de un territorio donde se desarrolle un plan de electrificación rural lo cual se contempla se vea influenciado por las tendencias de consumo y demanda según datos estadísticos.

3.2.1. Consumo de electricidad en el área rural

Debido a la calidad y nivel socioeconómico predominante en las áreas rurales del país, se determina que los mayores índices de consumo se encuentran comprendidos en la franja de los 11 a 100 Kwh mensual, según compendiado de datos presentado por el Ministerio de Energía y Minas, el cual es basado en datos concatenados por la CNEE, quien es el ente regulador del subsector eléctrico en Guatemala.

Adicional a los datos marcados en el estudio, también cabe mencionar que la variación en los rangos se debe a la presencia de más de un núcleo familiar en una vivienda rural o bien que exista varios circuitos para alimentar dos o más pequeñas viviendas en una extensión grande de terreno, pero conectados a un mismo medidor, lo que provoca que los consumos sean distorsionados de la realidad. También se hacen presentes consumos de equipo de bombeo para campos de agricultura y pequeñas casas de guardianía y comercios informales que tienen poca demanda y su operación se da únicamente en horario hábil laboral.

Tabla 3.*Situación actual de la electrificación en Guatemala*

Departamento	0 a 10 kWh	11 a 100 kWh	101 a 200 kWh	201 a 300 kWh	Mayor a 301 kWh	TOTALES
Alta Verapaz	21.8%	61.7%	13.5%	2.9%	0.1%	100.0%
Baja Verapaz	23.9%	61.5%	12.1%	2.4%	0.0%	100.0%
Chimaltenango	11.7%	65.6%	20.2%	2.5%	0.0%	100.0%
Chiquimula	18.6%	62.0%	15.8%	3.5%	0.0%	100.0%
El Progreso	15.6%	64.2%	17.5%	2.6%	0.1%	100.0%
Escuintla	9.5%	45.8%	40.8%	3.8%	0.1%	100.0%
Guatemala	10.1%	39.7%	43.0%	7.0%	0.2%	100.0%
Huehuetenango	20.9%	70.2%	7.6%	1.2%	0.0%	100.0%
Izabal	18.6%	54.8%	21.0%	5.5%	0.1%	100.0%
Jalapa	13.8%	70.3%	13.5%	2.4%	0.0%	100.0%
Jutiapa	14.3%	67.8%	15.4%	2.5%	0.1%	100.0%
Petén	15.5%	60.6%	19.5%	4.3%	0.1%	100.0%
Quezaltenango	15.5%	67.8%	14.4%	2.3%	0.0%	100.0%
Quiché	22.0%	66.7%	9.6%	1.6%	0.0%	100.0%
Retalhuleu	13.0%	63.0%	20.6%	3.4%	0.1%	100.0%
Sacatepéquez	7.6%	41.0%	46.7%	4.6%	0.1%	100.0%
San Marcos	19.8%	66.8%	11.2%	2.2%	0.0%	100.0%
Santa Rosa	13.7%	63.1%	20.1%	3.1%	0.0%	100.0%
Sololá	12.3%	69.6%	15.3%	2.7%	0.1%	100.0%
Suchitepéquez	11.7%	65.2%	19.8%	3.2%	0.1%	100.0%
Totonicapán	17.8%	69.3%	11.1%	1.8%	0.0%	100.0%
Zacapa	19.6%	57.7%	16.8%	5.8%	0.1%	100.0%

Nota: Información de la situación actual de electrificación en Guatemala. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas (2022). *Información General de Electrificación Rural.* (<https://mem.gob.gt/que-hacemos/area-energetica/electrificacion-rural/informacion-general-er/>), consultado el 27 de mayo de 2023. De dominio público.

3.2.2. Costos de la energía eléctrica

A lo largo del tiempo en el territorio nacional se ha tratado de mantener en los niveles más bajos los márgenes de variabilidad en los precios de energía eléctrica, sin embargo, derivado de diferentes aspectos directamente afectados

por la matriz energética nacional, se logra observar el comportamiento en las tarifas de la siguiente manera:

Tabla 4.

Registro histórico del pliego tarifario en Guatemala

HISTÓRICO TARIFAS CNEE						
DISTRIBUIDORA	EEGSA		DEOCSA		DEORSA	
TARIFA	Tarifa Social	Baja tensión simple	Tarifa Social	Baja tensión simple	Tarifa Social	Baja tensión simple
feb 22 - abril 22	1.2807	1.3693	1.9767	2.1084	1.8836	1.9785
mayo 22 - julio 22	1.3260	1.4140	2.1166	2.2484	2.0236	2.1185
agosto 22 - octubre 22	1.3860	1.4740	2.1966	2.3284	2.1036	2.1985
noviembre 22 - enero 23	1.3860	1.4740	2.1966	2.3284	2.1036	2.1985
febrero 23 - abril 23	1.3860	1.4740	2.1966	2.3284	2.1036	2.1984
mayo 23 - julio 23	1.3860	1.4740	2.1966	2.3284	2.1036	2.1984

Nota. Pliego tarifario. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas (2023). *Informe semanal del sector energético.* (<https://mem.gob.gt/blog/informe-semanal-del-sector-energetico-del-15-al-21-de-mayo-del-2023/>) consultado el 30 de mayo de 2023. De dominio público.

3.2.3. Costos de equipos de sistema fotovoltaico

Es preciso señalar que la inversión necesaria para adquirir un sistema fotovoltaico dependerá de muchos factores, por ejemplo, para el caso de los paneles solares los precios del mercado de equipos fotovoltaicos que pueden llegar a diferir por marcas, materiales constructivos y tecnología de estos. Así mismo, para sistemas completos dependerá la disponibilidad local de distribuidores e instaladores de la tecnología, la ubicación para instalación de los sistemas y demanda energética de los usuarios. Por otro lado, también toma relevancia conocer las características específicas de todas las viviendas donde

se instalarán los sistemas pues a pesar de que los sistemas son versátiles pueden diferir los herrajes y dispositivos de sujeción al tomar en cuenta los techos o estructuras a instalar los paneles solares, que son los equipos que más espacio y seguridad en la instalación demandan.

Tabla 5.

Presupuesto promedio de implementación

Descripción	Unidad	Precio	Total
Panel solar	2	Q 2,550.00	Q 5,100.00
Baterías	2	Q 1,450.00	Q 2,900.00
Regulador	1	Q 875.00	Q 875.00
Inversor	1	Q 1,125.00	Q 1,125.00
Herrajes	1	Q 425.00	Q 425.00
Mano de obra	1	Q 800.00	Q 800.00
Total			Q11,225.00

Nota. Listado de equipos para configuración de un sistema solar fotovoltaico. Elaboración propia, Realizado con Excel.

3.2.4. Contexto social de la familia guatemalteca

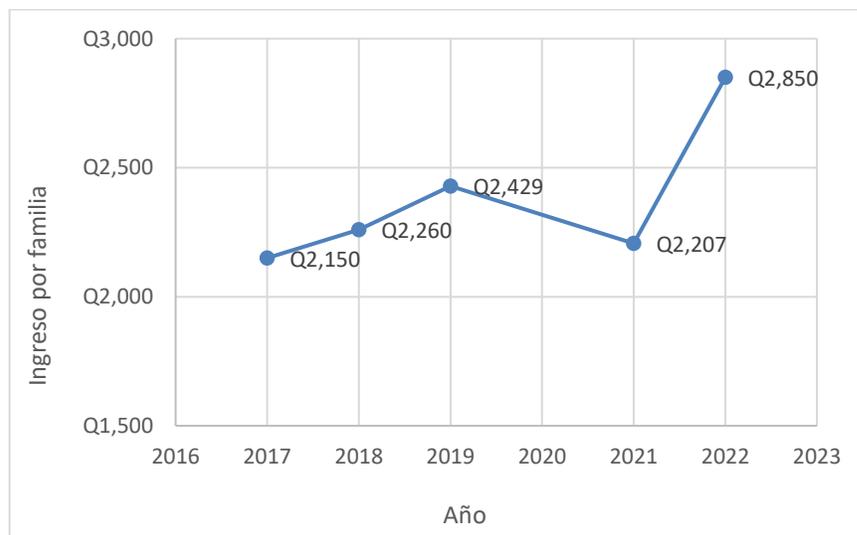
De toda la población, estimada en 14.9 millones de guatemaltecos, el 53.9 % vive en el área rural, constituyéndose mayoritaria en comparación con la población urbana (46.1%).

Según la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) 2019-2020, el ingreso promedio mensual per cápita en los hogares urbanos era de aproximadamente 1,872 quetzales (alrededor de 243 dólares estadounidenses), mientras que en los hogares rurales era de aproximadamente 1,187 quetzales (alrededor de 154 dólares estadounidenses).

Cuando el enfoque se direcciona hacia las actividades de la fuerza laboral, podemos analizar que la mayoría de los hogares rurales perciben el ingreso de únicamente de un integrante provee el ingreso económico al núcleo familiar, algunas veces por estar en relación de dependencia y otras por actividades económicas no normadas o bien comercio informal, según datos del Instituto Nacional de Estadística el promedio de ingresos es de Q. 2850.00

Figura 13.

Ingresos mensuales en sector laboral



Nota. Estadística de ingresos sector laboral. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística (2022). *Principales resultados de la encuesta nacional de empleo e ingresos.* (<https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2023/03/23/202303232142069Odm3oxU9mTY58hkborwzylm7MJop05q.pdf>) consultado el 30 de mayo de 2023. De dominio público.

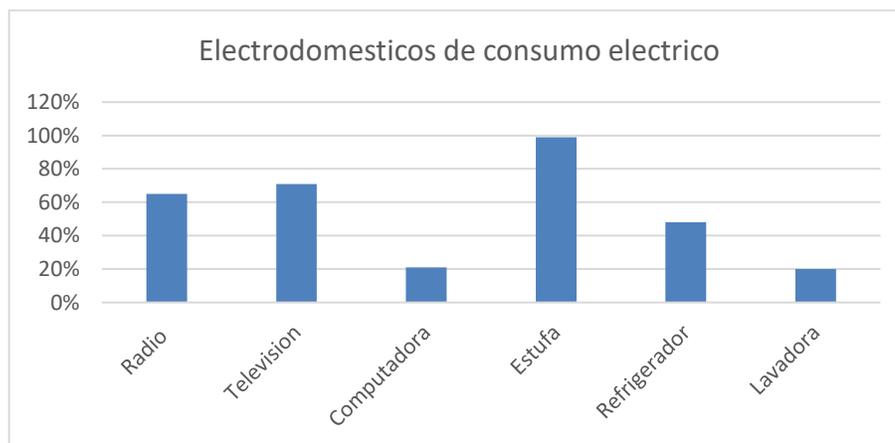
3.2.5. Equipos de mayor presencia y consumo en hogares

Como consecuencia de las diversas necesidades que se pueden presentar por las diferentes regiones rurales, la variabilidad en el consumo de energía

eléctrica puede ser notorio, sin embargo, cabe mencionar que la distribución de aparatos eléctricos en los hogares rurales tienden a ser básicos y de presencia general, esto según datos del Instituto Nacional de Estadística, sin embargo, al realizar el análisis las cargas de mayor presencia en los hogares rurales y que inciden de manera directa en el comportamiento de las necesidades de energía eléctrica, también es notorio que el mayor consumo energético en las viviendas proviene de la estufa, la cual no es dependiente de energía eléctrica, sino que su alimentación es dependiente del gas propano.

Figura 14.

Aparatos con mayor consumo en hogares



Nota. Características generales del hogar. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística (2023). *Características generales del hogar.* (<https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2023/03/23/202303232142069Odm3oxU9mTY58hkborwzylm7MJop05q.pdf>) consultado el 27 de mayo de 2023. De dominio público.

3.3. Requisitos técnicos y ambientales de la tecnología

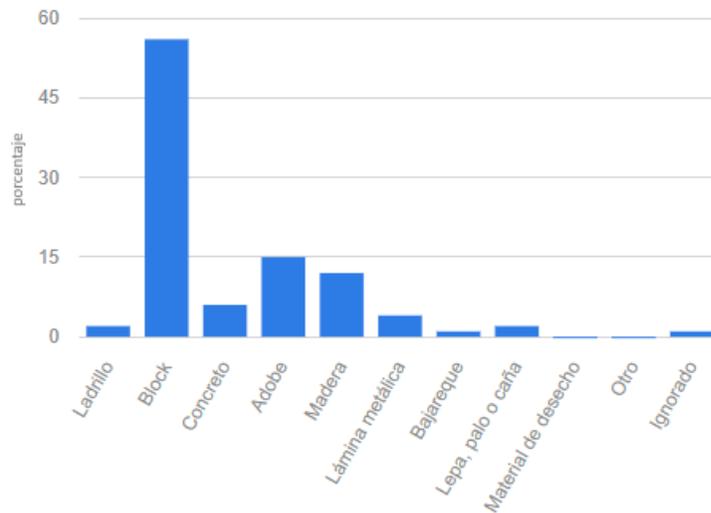
Los sistemas de micro generación solar fotovoltaica deben ser instalados en entornos que cumplan con características mínimas constructivas para el montaje, se toma en cuenta área de instalación y resistencia al peso de equipos. Así como también cumplir con temas ambientales y de consumo eléctrico en los hogares a implementar, esto último debido a que se debe buscar satisfacer la demanda eléctrica en todas las horas del día.

3.3.1. Conceptos constructivos en hogares

En áreas rurales de Guatemala los aspectos constructivos varían según la región, esto aplica tanto en accesos a comunidades como en viviendas. Además, toma importancia considerar los tipos de construcción predominantes en la región rural, con el fin de validar que los sistemas fotovoltaicos cumplan con aspectos técnicos que optimicen la instalación, además de cumplir con estándares de seguridad en la operación.

Figura 15.

Material predominante en paredes exteriores (%) de viviendas rurales



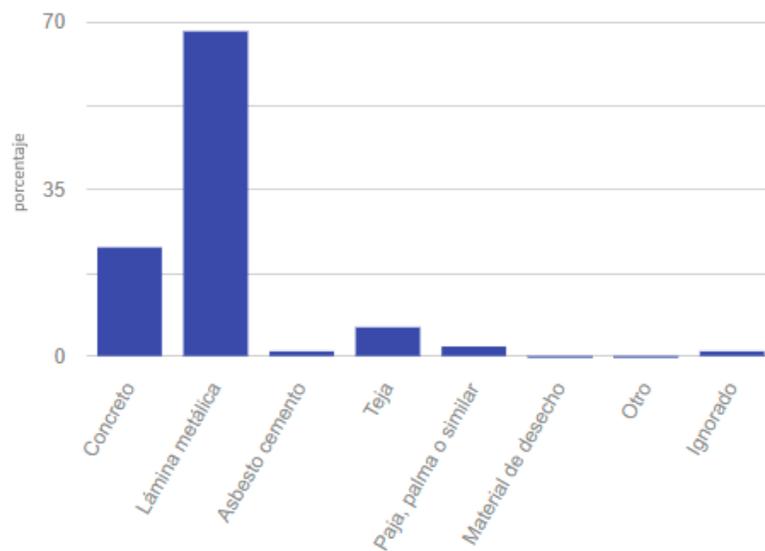
Fuente: INE, 2018. XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda

Nota. Características generales de vivienda. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística (2023). Características generales de la población. (<https://www.censopoblacion.gt/graficas>) consultado el 27 de mayo de 2023. De dominio público.

Es importante enfatizar que el alma de los microsistemas de generación son los paneles solares, los cuales en la oferta comercial actual deben ser instalados bajo ciertos estándares arquitectónicos, razón por la cual, al analizar las estructuras predominantes en techos se puede observar que hay variedad en materiales, pero los predominantes cumplen con los requisitos para la instalación de los equipos.

Figura 16.

Material predominante en techos (%) de viviendas rurales



Fuente: INE, 2018. XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda

Nota. Características generales de vivienda. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística (2023). *Características generales de la población.* (<https://www.censopoblacion.gt/graficas>) consultado el 27 de mayo de 2023. De dominio público.

Los datos reflejados de los análisis permiten también hacer énfasis en la búsqueda de alternativas para adaptar los sistemas a diferentes entornos constructivos.

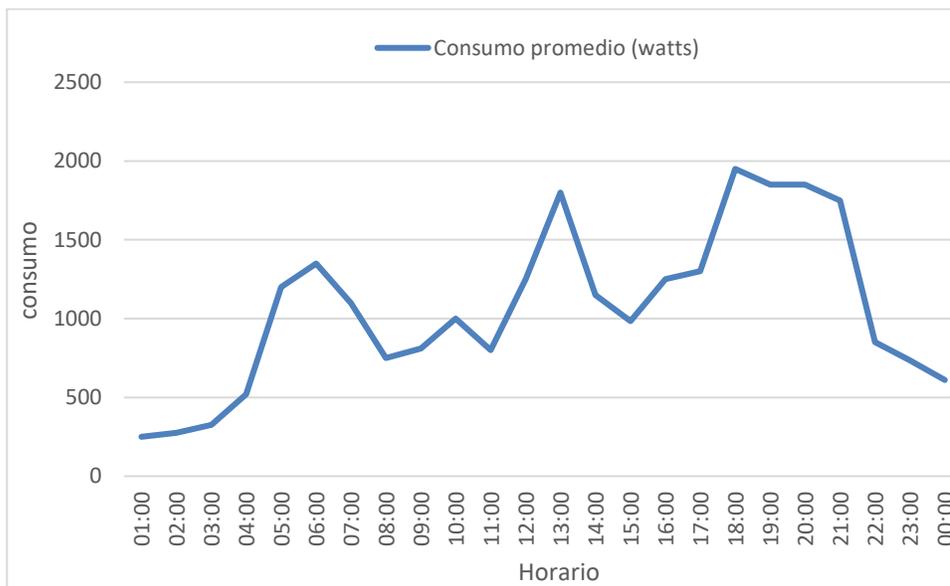
3.3.2. Comportamiento del consumo en hogares rurales

Para dimensionar eficientemente un sistema de generación fotovoltaica es imprescindible conocer la curva de demanda de energía eléctrica diaria en los hogares, la proyección fue realizada en el consumo promedio del análisis de una vivienda rural en la región nor oriente del país, donde se tomaron mediciones

durante un día completo de consumo por un lapso de 7 días, lo cual arrojó los siguientes resultados.

Figura 17.

Comportamiento del consumo



Nota. Datos de consumo promedio diario en hogares rurales, obtenidos de ruta de lectura en áreas rurales de la región oriente del país. Elaboración propia, realizado con Excel.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el análisis financiero de la oferta nacional y costos integrales, realizado sobre la implementación de sistemas de micro generación solar fotovoltaica demuestra que estas soluciones pueden suplir de manera eficiente y accesible la demanda eléctrica de un hogar rural guatemalteco, ya que estos en su mayoría reflejan su consumo eléctrico en aparatos eléctricos básicos, pero indispensables para satisfacer las necesidades esenciales. Por lo cual, si la implementación de sistemas de micro generación solar fotovoltaica se acompañase de programas de gestión eficiente de la energía, los resultados serían aún más perceptibles y sostenibles.

El avance actual en los planes de electrificación rural es un hito destacable y se vislumbra que la coordinación de esfuerzos permita aumentar el cumplimiento de las metas establecidas como país, sin embargo es importante considerar que los índices de cobertura eléctrica en Guatemala aún pueden percibirse como objeto de discusión, pues la dirección del Ministerio de Energía y Minas, durante una exposición realizada en mayo de 2023 en los Talleres de Planificación Abierta para la Transición a cargo de la Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (Segeplan), indicó que al cierre del año 2022 un 10.06 % de la población aun no cuenta con el servicio de energía eléctrica asequible y normado, que puede traducirse a un aproximado de 12 mil hogares que aún carecen del acceso al vital servicio; específicamente los departamentos de Peten y Alta Verapaz presentan mayores índices de falta de cobertura. Adicional a esto, también cabe resaltar que dentro de las características predominantes en los departamentos antes mencionado0073 son territorialmente donde hay presencia de mayores áreas protegidas y terrenos accidentados.

Comparando los costos de la implementación de un microsistema de generación solar fotovoltaica, se determina que el gasto a realizar por los hogares rurales es comparable con 3.93 ingresos mensuales por hogar. Así mismo tomando el plano ideal que se pueda destinar una porción del 10 % del ingreso mensual por hogar para poder invertir en un sistema solar fotovoltaico, el sistema podría financiarse de manera integral en un plan de pago de 40 cuotas mensuales, que equivalen a un lapso de 3.33 años.

El promedio de consumo mensual de energía eléctrica en hogares rurales guatemaltecos de la ruta de lectura analizada ronda entre los 40 a 75 kwh mensual, lo cual difiere de los resultados presentados en compendio de datos presentado por el Ministerio de Energía y Minas, pero mantiene la tendencia. Según el análisis de la curva de consumo, el valor máximo se presenta en horas de la noche, por lo que es ideal el sistema que contemple la generación y almacenamiento de carga durante el día, para que el consumo que se presente en horario nocturno pueda ser abastecido por la cuota diaria de generación sin ningún problema y poder suplir la demanda eléctrica para satisfacer necesidades básicas de las familias.

Por otro lado, al analizar el pliego tarifario vigente en Guatemala, resulta importante destacar que la fijación de precios por kwh consumido sufren variaciones de manera trimestral, el cual se ve afectado por costos directos de operación y mantenimiento presentados por las distribuidoras de energía eléctrica vigentes en el país, tanto de iniciativa privada como empresas municipales de distribución.

Estas variaciones en precio, generalmente ocurren al alza, que se refleja directamente en la elevación del monto de facturación por concepto de energía eléctrica; partiendo de este escenario se puede considerar que si el análisis

financiero sobre costos de implementación de sistemas de micro generación solar fotovoltaica se evaluara también de manera trimestral, el resultado que se obtendría de retorno de la inversión disminuiría en el lapso de tiempo, ya que el monto de comparación para el ejercicio al ser mas alto, incide de manera inversa en el tiempo de retorno de inversión según la fórmula de cálculo.

CONCLUSIONES

1. Los planes de electrificación rural tienen poco avance debido a dificultades territoriales y técnico-económicas que convergen provocando atrasos en la planificación y construcción de obras que permitan llevar el servicio de energía eléctrica regulada a usuarios rurales, así como también desacuerdo con las tarifas y montos inmersos en las facturas de energía eléctrica que provocan diferencias significativas entre los costos de las diferentes empresas que suministran servicio de energía eléctrica regulado.
2. Se estimó la cantidad de consumo familiar aproximado de energía eléctrica en los hogares rurales de Guatemala, y se determinó que la demanda promedio por hogar se encuentra en el rango de pago de tarifa de energía eléctrica con aporte del subsidio de tarifa social, es decir menos a 60 kwh al mes, lo cual da como resultado que la inversión en el sistema se recupera en un mediano plazo. Sin embargo, también se debe considerar que, tanto el pliego tarifario es variable de manera trimestral, como la existencia de un subsidio gubernamental puede verse pausado o modificado al depender del entorno económico del país, lo que supondría la tendencia al aumento en los costos de energía eléctrica y consecuentemente una disminución en el tiempo de recuperación de la inversión inicial.
3. Se realizó el análisis financiero sobre costos y estudio técnico sobre dimensionamiento de los equipos necesarios para establecer un sistema de micro generación solar fotovoltaica por medio de paneles solares,

donde se obtuvo que son proyectos viables para la instalación y operación para la infraestructura y arquitectura social de las comunidades rurales de Guatemala. Se comprobó que la oferta comercial actual en el país, así como también el incremento en la eficiencia de los paneles solares dan viabilidad técnica para la implementación de microsistemas de generación solar fotovoltaica. Por otro lado, la tendencia en la construcción tradicional de block como techos de hormigón y lámina galvanizada, acompañados de facilidades constructivos y de adaptación a diferentes bases facilitan el escenario para la implementación de la tecnología solar fotovoltaica para suplir la necesidad del servicio de energía eléctrica en el país.

RECOMENDACIONES

1. Recomendar al Ministerio de Energía y Minas programas de instrucción hacia las distribuidoras de energía reguladas con el fin de incentivar el crecimiento y reforzamiento de las redes rurales de distribución de energía eléctrica que promuevan el aumento en los índices de electrificación rural y consecuentemente faciliten el alcance de las metas establecidas como país.
2. Capacitar de manera técnica a las familias de hogares rurales sobre la operación y beneficios de la implementación de sistemas de micro generación solar fotovoltaica, que promuevan la solución en el corto plazo de suministro de energía eléctrica. Esto también se debe acompañar de charlas de concientización enfocadas a la eficiencia en el consumo energético.
3. Implementar por parte de entidades Gubernamentales iniciativas de carácter público-privadas que promuevan la instalación de sistemas de micro generación solar fotovoltaica en hogares rurales, como alternativa al servicio de energía eléctrica asequible.

REFERENCIAS

Adam Dolezal, A., Ochs, A., Palencia, R. (2013). *Futuro para la energía renovable en Centroamérica*. Worldwatch Institute.

Bazilian, M., Nussbaumer, P., Eibs-Singer, C., Brew-Hammond, A., Modi, V., Sovacool, B., Aqrawi, P.-K. (2012). *Improving access to modern energy services: insights from case studies*. ScienceDirect. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.01.007>

Candise L., Henry, J. S., Baker Brooke, K., Shaw Andrew J., Kondash, B., Leiva, E., Castellanos, M., Wade, B., George Van H., Hoponick R. (2021). *How will renewable energy development goals affect energy poverty in Guatemala?*. ScienceDirect. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105665>

Guerrero García, J. J. (2020). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. McGraw-Hill.

Ministerio de Energía y Minas (Abril 2020). *Plan indicativo de Electrificación Rural 2020-2050*. MEM.

Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. ITICA.

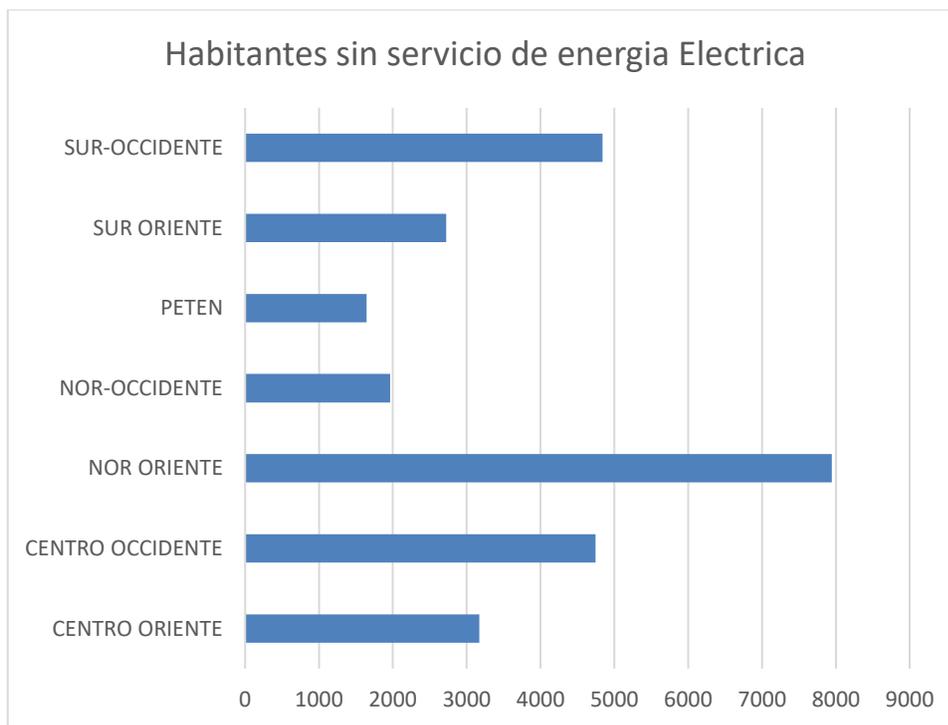
Universidad Politecnica, Instituto de energía solar (octubre de 2018). *Gráficos significativos energía solar fotovoltaica*. Autor.

APÉNDICES

Durante la obtención de datos relevantes para analizar la situación actual sobre el avance en la cobertura de servicio de energía eléctrica a nivel nacional se obtuvieron datos estimados de la operación comercial de distribuidoras de electricidad en el interior de la república.

Apéndice 1.

Habitantes sin acceso a energía eléctrica en territorio nacional



Nota. Estimación de habitantes sin acceso a energía eléctrica. Elaboración propia, realizado en Excel.

Apéndice 2.

Desglose de cobros en factura de energía eléctrica

Estimación de facturación

Costo de Energía Promedio	Q128.06
Costo de AP Promedio	Q36.16
Cargo Fijo	Q10.32
Impuesto Valor Agregado	Q15.37
TOTAL	Q189.91

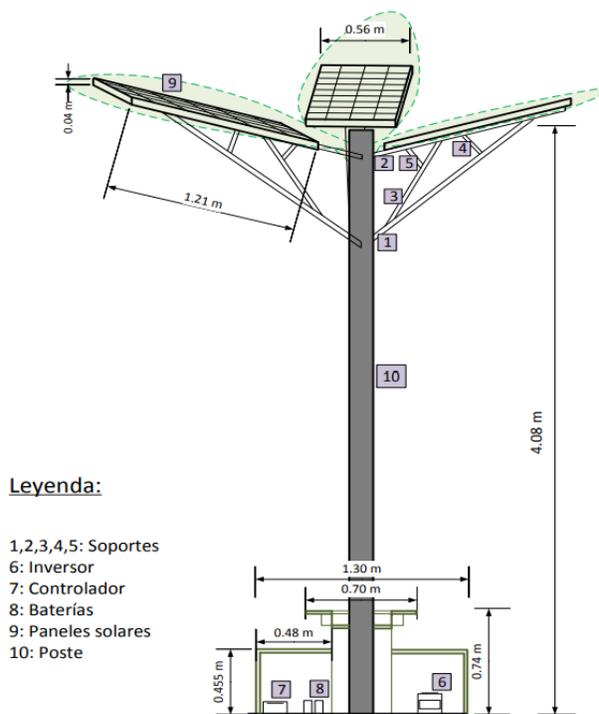
Nota. Cálculo de cobro de factura de energía eléctrica en un hogar rural guatemalteco con consumo de energía promedio. Elaboración propia, realizado con Excel.

ANEXOS

Cuando las exigencias técnicas de montaje impiden la implementación de los sistemas fotovoltaicos, existen alternativas que pueden suplir la instalación en techos de hogares.

Anexo 1.

Sistema fotovoltaico montado en poste solar



Nota. Poste Solar. Obtenido de la Universidad de Lima. (2018). *Ficha Técnica,* *Desarrollo Sostenible.*

(https://www.ulima.edu.pe/sites/default/files/news/file/ficha_tecnica_poste_solar_2018.pdf)

consultado el 5 de junio de 2023.

