



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos
Regulados

**DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE
ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE
ENERGÍA**

Ing. Luis Adolfo Chinchilla Juárez

Asesorado por el Msc. Ing. Luis Arturo Cerna Rich

Guatemala, enero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE
ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE
ENERGÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. LUIS ADELSON CHINCHILLA JUÁREZ
ASESORADO POR EL MSC. ING. LUIS ARTURO CERNA RICH

AL CONFERIRSELE 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	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

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	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE
ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE
ENERGÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 30 de noviembre de 2021.

Ing. Luis Adolfo Chinchilla Juárez

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: **DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE ENERGÍA**, presentado por: **Ing. Luis Adolfo Chinchilla Juárez**, 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/gaoc



Guatemala, enero de 2024

LNG.EEP.OI.011.2024

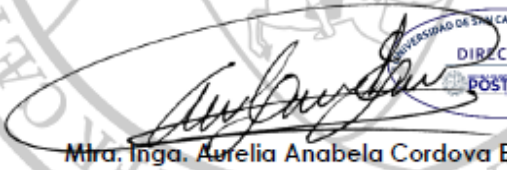
En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE ENERGÍA"

presentado por Ing. Luis Adolfo Chinchilla Juárez correspondiente al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


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



Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Álvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE ENERGÍA**, del estudiante **Luis Adolfo Chinchilla Juárez** quien se identifica con número de carné **201313775** del programa de Maestría En Gestión De Mercados Eléctricos 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 Montepeque
Coordinador
Maestría En Gestión De Mercados Eléctricos 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: **"DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO EN CENTRO EDUCATIVO DE ESCUINTLA Y APLICACIÓN COMO USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE ENERGÍA."** del estudiante **Luis Adolfo Chinchilla Juárez** del programa de **Maestría En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné 201313775.

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



Luis Arturo Cerna Rich
Ing. Mecánico Electricista
Colegiado 6247

Mtro. Ing. Luis Arturo Cerna Rich
Colegiado No. 6247
Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por su permanente guía.

Mis padres

Mi eterno agradecimiento por su amor y constante apoyo para hacer realidad este sueño.

Mis hermanos

Por su apoyo incondicional y confianza que siempre me han tenido.

Amigos

Por la motivación, buenos momentos y consejos que me brindaron durante la carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme formarme y desarrollar mi carrera.
Facultad de Ingeniería	Por todas sus enseñanzas, dedicación y motivación, así mismo por las innovaciones que permiten conocer los diferentes campos de aplicación.
Mi familia	Por su amor, esfuerzo y apoyo.
Mi asesor	MSc. Ing. Luis Cerna, por su permanente colaboración y guía en la realización del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
OBJETIVOS	XIX
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO REFERENCIAL	1
1.1. Estudios previos	1
1.2. Antecedentes	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Energía solar fotovoltaica	5
2.1.1. Concepto de energía solar	5
2.1.2. Radiación solar	6
2.1.2.1. Hora solar pico (HSP)	6
2.1.3. Generación eléctrica con energía renovable	7
2.1.3.1. Generación hidráulica	7
2.1.3.2. Generación geotérmica	8
2.1.3.3. Generación eólica	8
2.1.3.4. Generación con biomasa	9
2.1.3.5. Generación solar fotovoltaica	9
2.1.4. Matriz energética de Guatemala	11

2.1.5.	Sistema de generación solar fotovoltaico	13
2.1.6.	Componentes de un sistema de generación solar fotovoltaico	14
2.1.6.1.	Celda fotovoltaica	14
2.1.6.2.	Paneles fotovoltaicos	16
2.1.6.3.	Regulador de carga	17
2.1.6.4.	Inversor	18
2.1.7.	Protecciones eléctricas de un sistema de generación fotovoltaico	19
2.2.	Mercado eléctrico guatemalteco y normas aplicables para fuentes de generación renovable	19
2.2.1.	Instituciones del mercado eléctrico guatemalteco ...	19
2.2.2.	Marco legal	20
2.2.3.	Ley General de Electricidad	22
2.2.4.	Ley de Incentivos para el Desarrollo de Energía Renovable	22
2.2.5.	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable – NTGDR – y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía – UAEE –	23
2.2.6.	Política Energética 2019-2050	24
2.3.	Fundamentos metodológicos del diseño de sistemas fotovoltaicos de pequeña escala	25
2.3.1.	Determinación de la demanda	25
2.3.2.	<i>Software web</i> para determinación de hora solar pico (HSP)	25
2.3.3.	Cálculo del número de paneles	26
2.3.4.	Dimensionamiento del inversor	26

2.3.5.	Dimensionamiento del cableado y protección eléctrica	28
2.4.	Análisis económico	33
2.4.1.	Valor presente neto (VPN).....	33
2.4.2.	Tasa interna de retorno (TIR)	35
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
3.1.	Características del estudio	37
3.2.	Unidades de análisis	37
3.3.	Variables.....	38
3.4.	Fases del estudio	40
3.4.1.	Fase 1: revisión documental	40
3.4.2.	Fase 2: dimensionamiento y diseño de un sistema de generación fotovoltaico	40
3.4.3.	Fase 3: requisitos y procedimiento para conectarse a la red de distribución como Usuario Autoproducer con Excedentes de Energía	42
3.4.4.	Fase 4: análisis económico.....	43
3.5.	Situación actual	44
3.6.	Servicio de energía.....	44
3.7.	Recopilación de información del consumo de energía	45
3.8.	Análisis de información del consumo de energía	45
3.9.	Método para determinación de hora solar pico (HSP)	46
3.10.	Dimensionamiento del sistema de generación	47
3.11.	Cotización de equipos	48
3.12.	Evaluación financiera	49
3.13.	Técnicas de análisis	50
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	53

4.1.	Dimensionamiento de equipos y diseño del sistema de generación con paneles solares.....	53
4.1.1.	Demanda de energía eléctrica	53
4.1.2.	Determinación de hora solar pico (HSP)	55
4.1.3.	Determinación del número de paneles fotovoltaicos y estructuras de soporte	57
4.1.4.	Cálculo de Inversor y conexión de los paneles fotovoltaicos	58
4.1.5.	Cálculo de conductores	59
4.1.6.	Equipo de protección para el sistema de generación fotovoltaico	60
4.2.	Conexión a red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía	62
4.3.	Resultados de análisis económico del sistema de generación fotovoltaico	63
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	69
5.1.	Determinación de la demanda de energía eléctrica del centro educativo.....	69
5.2.	Determinación de los componentes y diseño del sistema de generación con paneles fotovoltaicos	70
5.3.	Evaluación de requisitos para conectarse a la red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía.....	71
5.4.	Determinación del tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costo del proyecto	73
	CONCLUSIONES.....	75
	RECOMENDACIONES	77

REFERENCIAS	79
APÉNDICES	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Composición de la generación acumulada año 2020	12
Figura 2.	Participación de las energías renovables en la generación de energía eléctrica	13
Figura 3.	Paneles fotovoltaicos	17
Figura 4.	Inversor	18
Figura 5.	Orden de cálculo de componentes del sistema de generación....	47
Figura 6.	Consumo mensual de energía eléctrica del centro educativo.....	55
Figura 7.	Diagrama unifilar del sistema de generación	61

TABLAS

Tabla 1.	Dimensionamiento del inversor	27
Tabla 2.	Dimensionamiento de conductores.....	28
Tabla 3.	Sección de conductores en mm ²	29
Tabla 4.	Capacidad de corriente (amperios) de conductores de cobre aislado	30
Tabla 5.	Dimensionamiento de protección eléctrica	32
Tabla 6.	Fórmulas VPN	34
Tabla 7.	Criterios de decisión VPN	35
Tabla 8.	Criterios de decisión TIR.....	36
Tabla 9.	Variables y su clasificación	38
Tabla 10.	Variables en estudio	39
Tabla 11.	Demanda de energía del centro educativo	53

Tabla 12.	Determinación de HSP en la ubicación del centro educativo	56
Tabla 13.	Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico	57
Tabla 14.	Especificaciones técnicas del inversor	58
Tabla 15.	Costos del proyecto.....	63
Tabla 16.	Flujo de efectivo	64
Tabla 17.	Resultados VPN y TIR.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
CO ₂	Dióxido de carbono
GWh	Giga vatio hora
°C	Grados Celsius
=	Igual que
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
kWh/m ²	Kilovatio hora por metro cuadrado
lb	Libra
MW	Mega vatio
MWh	Mega vatio hora
m	Metro
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
i	Tasa de interés
W	Vatio
W/m ²	Vatios por metro cuadrado
V	Voltios

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista, ente operador del Sistema Nacional Interconectado.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica, ente regulador del subsector eléctrico de Guatemala.
Distribuidor	Persona individual o jurídica, titular o poseedora de instalaciones destinadas a distribuir comercialmente energía eléctrica.
Energía solar	Tipo de energía renovable obtenida del sol que se puede utilizar para producir calor y electricidad.
GDR	Generador Distribuido Renovable, es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de una central de generación de energía eléctrica, que utiliza recursos energéticos renovables y participa en la actividad de Generación Distribuida Renovable.
HSP	Hora solar pico.
IEMA	Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias.
ISR	Impuesto sobre la renta.

IVA	Impuesto al valor agregado.
MEM	Ministerio de Energía y Minas, ente rector del subsector eléctrico de Guatemala.
NASA	Siglas de National Aeronautics and Space Administration, es la agencia del gobierno estadounidense dedicada a la exploración espacial.
NTGDR	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable.
SEN	Sistema Eléctrico Nacional.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
TIR	Tasa interna de retorno.
UAEE	Usuario Autoproducer con Excedentes de Energía, es el usuario que inyecta energía eléctrica a la red de distribución, la cual es producida por generación con recursos renovables, ubicada dentro de las instalaciones de consumo, no percibiendo remuneración por los excedentes de energía.
VPN	Valor presente neto.

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue realizar el diseño de un sistema de generación fotovoltaico en un centro educativo del departamento de Escuintla y funcionar como UAEE. Se buscó determinar la factibilidad técnica y económica de la implementación del sistema de generación con paneles solares en la institución educativa.

En la actualidad la utilización de fuentes renovables de generación ha tomado un gran interés en la sociedad para reducir los costos de la energía eléctrica por lo que a través del presente trabajo de investigación se estableció un modelo de sistema de generación fotovoltaico que reduzca los altos costos de energía mensual de un centro educativo de la región sur de Guatemala.

El desarrollo del trabajo de investigación dio inicio a través de la recopilación de las facturas mensuales de energía de los años 2020, 2021 y 2022, esto permitió determinar el consumo máximo anual, el cual fue de 11,198 kWh. Se dimensionaron los diversos componentes y se elaboró el diagrama unifilar del sistema de generación solar fotovoltaico, a través de cotizaciones se determinó que el costo del proyecto es de Q 66, 431.87. En la siguiente etapa se determinó que el centro educativo cumple con los requisitos para registrarse como UAEE. Por último, se llevó cabo una evaluación económica por el método del VPN y TIR, obteniendo un VPN de Q 45, 471.07, una TIR de 18.72 %, un beneficio costo de 1.39 y un tiempo de recuperación de 7.31 años. Los resultados demuestran que el proyecto es factible tanto a nivel técnico como económico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Actualmente los costos del servicio de energía eléctrica son altos, lo cual perjudica de gran manera el presupuesto mensual y anual de instituciones del sector público y privado.

El uso de energías renovables ha tenido un aumento considerable en los últimos años debido a su bajo costo de funcionamiento y su baja contaminación ambiental por lo que la implementación de paneles solares es una buena opción para reducir costos mensuales de energía eléctrica.

- Descripción del problema

Desde el inicio de funcionamiento de la institución educativa se han tenido grandes gastos en el pago del servicio de energía eléctrica y la administración del centro educativo buscaba una alternativa para poder disminuir los costos mensuales a través de una opción legal en el mercado eléctrico y de beneficio para el medio ambiente. Adicionalmente se requería que el proyecto fuera eficiente, confiable y contará con las protecciones eléctricas adecuadas. La administración del centro educativo tenía incertidumbre sobre qué tipo de proyecto era el adecuado, tiempo de recuperación de la inversión y el marco legal para la implementación del mismo, por lo que se requirió de un profesional que brindará asesoramiento para llevar a cabo el diseño del proyecto y analizar la implementación para disminuir los costos mensuales del servicio de energía eléctrica.

- Formulación del problema

A continuación, se detallan las preguntas de tipo central y auxiliar para el presente proyecto de investigación:

- Pregunta central

¿Cuál es la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación fotovoltaico en institución educativa de Escuintla y conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía para reducir el costo mensual de la factura de energía eléctrica?

- Preguntas auxiliares

- ¿Qué dimensionamiento y diseño debe tener un sistema de generación fotovoltaico?
- ¿Cuáles son los requisitos y el procedimiento para conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía?
- ¿Cuál es el tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costeo del proyecto?

- Delimitación del problema

El presente trabajo de investigación se desarrolló en un centro educativo ubicado en carretera al pacífico, correspondiente al departamento de Escuintla,

siendo uno de los departamentos del área de la costa sur de Guatemala en donde se tiene un buen índice de radiación solar.

OBJETIVOS

General

Establecer la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación fotovoltaico en institución educativa de Escuintla y conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía para reducir el costo mensual de la factura de energía eléctrica.

Específicos

1. Establecer el dimensionamiento de los componentes y el diseño de un sistema de generación fotovoltaico para un centro educativo.
2. Evaluar si el proyecto de generación fotovoltaico del centro educativo cumple con los requisitos para conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía.
3. Determinar el tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costos del proyecto de generación fotovoltaico para la institución educativa.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

- Diseño de la investigación: el diseño adoptado fue no experimental.
- Enfoque: el enfoque de la presente investigación fue de tipo cuantitativo.
- Alcance: el alcance de esta investigación fue descriptivo.
- Unidad de análisis: la unidad de análisis fue un centro educativo, ubicado en el departamento de Escuintla.
- Variables: las variables que fueron consideradas para el presente estudio fueron tipo de usuario de energía, capacidad del sistema de generación solar fotovoltaico, número de paneles fotovoltaicos y tiempo de recuperación de la inversión.

El estudio fue realizado mediante cuatro fases, las cuales se detallan a continuación:

- Fase 1: se realizó una revisión bibliográfica estableciendo todas las referencias primarias y/o secundarias en relación al tema de la presente investigación.
- Fase 2: en esta fase se analizaron las facturas mensuales de energía eléctrica del centro educativo, con base en dicho análisis se determinó la demanda máxima anual de energía de dicha institución educativa,

seguidamente se realizó el dimensionamiento de los componentes, el diseño del sistema de generación con paneles solares y la cotización de los diversos equipos en el mercado guatemalteco para establecer el costo total del proyecto.

- Fase 3: en esta fase se determinó si se cumple con los requisitos técnicos y legales para conectar el sistema de generación con paneles solares a la red de distribución y funcionar como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía -UAEE-.
- Fase 4: consistió en establecer si el proyecto es viable económicamente, se utilizó el método del VPN y TIR, así también se determinó el beneficio costo del proyecto y el tiempo de recuperación de la inversión.
- Técnicas de análisis de información: la información fue ordenada y presentada mediante tablas, se utilizaron medidas de tendencia central (media aritmética, mediana y desviación estándar) y métodos de evaluación financiera (VPN, TIR, Beneficio-Costo).

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se inserta en las líneas de investigación de ingeniería de proyectos de generación eléctrica y diseño, operación y regulación de proyectos energéticos con recursos renovables de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

El presente estudio muestra una perspectiva general sobre la generación de energía eléctrica con uno de los recursos renovables que ha tomado un gran auge durante los últimos años. De acuerdo con el MEM (2018), “la energía solar es un recurso renovable que llega todos los días a la superficie de la tierra, y se mide en cada lugar como la cantidad diaria de energía que llega a cada metro cuadrado de superficie horizontal” (p. 1). Establece que Guatemala cuenta con un alto potencial solar en varias regiones del país, la radiación solar en Guatemala tiene un valor promedio de 5.3 kWh/m² siendo un excelente valor de acuerdo debido a su ubicación geográfica.

En el presente trabajo de investigación se realizó el dimensionamiento de los equipos y el diseño de un sistema de generación de energía con paneles fotovoltaicos a pequeña escala; se verificó si se cumple con los requisitos para funcionar como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía –UAEE-, así mismo se analizó la factibilidad del proyecto a través de una evaluación económica por el método del VPN y TIR. Es importante resaltar que la instalación de sistemas de generación eléctrica con paneles fotovoltaicos para autoconsumo ha tenido un incremento considerado en Guatemala, tanto a nivel comercial como a nivel residencial.

El estudio se llevó a cabo en una institución educativa del departamento de Escuintla, siendo este departamento un área con gran potencial solar en Guatemala. El problema principal del centro educativo es el alto costo de energía eléctrica mensual que afecta negativamente el presupuesto de la institución educativa.

La importancia del estudio fue realizar un diseño de un sistema de generación fotovoltaico que sirva de modelo para la implementación de proyectos de generación a pequeña escala, funcionando bajo el régimen de Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía. Se buscó reducir los costos mensuales de energía de la institución educativa y que el proyecto genere beneficios durante su vida útil.

La investigación se divide en 5 capítulos, en el primer capítulo se analizaron estudios previos en relación al tema de sistemas de generación eléctrica con recursos renovables, siendo de gran importancia para tomarlos como referencia para la presente investigación.

En el segundo capítulo se proporcionó una recopilación de conceptos relacionados a energía eléctrica, tipos de generación con recursos renovables, el mercado eléctrico guatemalteco, leyes y normativos del sector eléctrico de Guatemala, la metodología para el diseño de un sistema de generación fotovoltaico y finalmente dos métodos para realizar un análisis financiero de un proyecto.

El desarrollo del estudio se realizó en el tercer capítulo donde se mostró la información recolectada y los diferentes cálculos para el diseño del sistema de generación fotovoltaico; también se definió si se cumple con los requisitos para funcionar como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía. Por último,

se abordó el análisis económico del proyecto de generación que permitió determinar la factibilidad y rentabilidad durante su vida útil.

En el cuarto capítulo se presentaron los resultados del proyecto de investigación, mostrándolos de manera secuencial y clara, permitiendo una mejor comprensión de los mismos.

Finalmente, en el quinto capítulo se discutieron los resultados obtenidos, en relación a los objetivos planteados en la presente investigación.

1. MARCO REFERENCIAL

A continuación, se presentan los estudios previos y antecedentes que fueron de gran relevancia para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

1.1. Estudios previos

Se cuenta con estudios previos relacionados con sistemas de generación de energía con paneles fotovoltaicos, los cuales sirvieron de soporte para el desarrollo el presente estudio, cabe mencionar que el presente estudio buscó mostrar un modelo para la implementación de proyectos de generación de energía utilizando paneles fotovoltaicos a nivel de pequeña escala y determinar el beneficio-costos de dicho proyecto.

1.2. Antecedentes

En la actualidad existen diversos trabajos de investigación sobre el diseño de proyectos de generación con paneles fotovoltaicos, siendo un tema que ha tenido un aumento en el interés de la sociedad, los siguientes trabajos de investigación servirán de soporte para el desarrollo del presente estudio:

Martínez (2016) presenta el caso de electrificar la aldea Searranx, perteneciente al departamento de Izabal. En dicho sitio no se cuenta con suministro de energía eléctrica debido a que se encuentra lejana de un sitio de distribución de energía eléctrica, la instalación de líneas de transmisión o distribución requieren de una alta inversión y se busca la utilización de paneles

fotovoltaicos para abastecer de energía a la aldea a través de una inversión de menor costo.

Según Martínez (2016), “el planteamiento de este trabajo consiste en evaluar si la región en estudio tiene las condiciones meteorológicas para generar electricidad, por medio de paneles solares y su capacidad de suplir en forma individual los requerimientos de cada vivienda” (p. 8).

Pérez (2014) hace mención al uso de fuentes de energía renovable para sustituir a las fuentes de generación con recursos fósiles siendo estos carbón, petróleo y gas, que tienen un gran impacto con la generación de dióxido de carbono (CO₂) y contribuyen a la contaminación ambiental.

Pérez (2014) también hace mención al gran potencial solar con el que cuenta Guatemala, “por su posición geográfica, cuenta con un potencial solar de los más altos en el mundo (promedio de 5.3 kilovatios/hora)” (p. 1).

En vista de lo anterior se plantea el problema de evaluar la viabilidad financiera y ambiental de la inversión para la generación de energía renovable de fuente solar fotovoltaica en el departamento de Jutiapa. La metodología utilizada en el desarrollo de la presente investigación se basa en la utilización del método científico a través de sus distintas etapas: Definición del problema, formulación de objetivo general y objetivos específicos, planteamiento de hipótesis de investigación, instrumentos de medición aplicados; así como la definición de técnicas de investigación

documental y de campo, para recopilar, procesar y analizar la información para la comprobación de la hipótesis. (Pérez, 2014, p. I)

De León (2008) muestra el diseño de un sistema de generación eléctrica con paneles solares y un estudio de aprovechamiento en las instalaciones de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos. En la primera etapa se detallan conceptos importantes relaciones a la energía solar, generación fotovoltaica, equipo técnico para la instalar un sistema de generación fotovoltaico.

También se detalla en De León (2008):

Un estudio sobre la oferta de energía eléctrica generada por paneles fotovoltaicos, seguido de una cuantificación de demanda de energía en el Edificio T – 6 de la Facultad de Ingeniería, y un balance energético. Dando lugar a argumentos concluyentes con la oportuna y factible consideración de desarrollar proyectos de instalaciones de sistemas de generadores de energía alternativa, con paneles fotovoltaicos y recomendaciones alusivas al tema. (p. XIII)

Frías (2012) desarrolló un colector híbrido solar térmico fotovoltaico que puede generar energía eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos y colectores térmicos. Este trabajo planteó un nuevo diseño de paneles fotovoltaicos con un sistema de enfriamiento que utiliza un sistema de circulación de un fluido térmico que mejora la eficiencia de las células extrayendo un porcentaje de calor. El colector híbrido solar térmico fotovoltaico tiene un sistema que permite la interconexión a la red eléctrica de distribución, permitiendo el flujo de energía a

la red eléctrica nacional y un ahorro significativo de energía y recursos económicos para la población.

Frías (2012) establece en su tesis, “la construcción y diseño de un sistema solar térmico fotovoltaico en un solo panel es una solución viable que permitirá resolver problemas de eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico y poder aprovechar la energía térmica” (p. 6).

Ramos y Luna (2014) describen una propuesta de diseño de un sistema de generación eléctrica con paneles solares en una Universidad de México, este proyecto surge debido a dos problemas que fue enfrentarse a la falta de corriente eléctrica y la gran cantidad de usuarios conectados ilegalmente que presenta la red eléctrica de distribución. Se realizaron estudios de factibilidad, de radiación solar, análisis de consumo energético, estudio socioeconómico y un plan de acción para poder desarrollar el proyecto. El resultado fue que el sitio más conveniente para la instalación de los paneles fotovoltaicos es el estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Energía solar fotovoltaica

A continuación, se detallan algunos conceptos relacionados a la energía solar fotovoltaica.

2.1.1. Concepto de energía solar

La energía solar de acuerdo a Espitia (2017) es un tipo de energía renovable obtenida del sol que se puede utilizar para generar calor y electricidad. Hay varias formas de captar la radiación y utilizarla para generar energía a partir de la cual se crean los distintos tipos de energía entre las cuales podemos mencionar: fototérmica, termosolar y fotovoltaica.

Según De León (2008), “energía solar es la energía procedente del sol. En el contexto de las energías renovables, entendemos por energía solar la luz solar que incide en la tierra en sus componentes visibles e invisibles, infrarrojo y ultravioleta” (p. 31).

Adicionalmente Pérez (2014) señala:

Gran parte de la energía necesaria en el mundo puede ser suministrada directamente por la energía solar. Por lo que la práctica del aprovechamiento de ésta es estudiada cada día más, así como sus

ventajas e inconvenientes. Además, los usos de la energía solar son actualmente aplicados de manera frecuente. (p. 8)

2.1.2. Radiación solar

Es la energía solar que viaja por el espacio en forma de ondas electromagnéticas. Según Gastélum (2015) la luz que genera el sol posee un grupo de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia que poseen un rango y se le denomina espectro luminoso.

Gastélum (2015) indica:

Las ondas de frecuencias bajas del espectro solar llamadas ondas infrarrojas son las que proporcionan el calor y las de altas frecuencias son las ultravioletas que nos proporcionan la fotosíntesis y el bronceado de la piel. Esos 2 extremos forman parte del espectro solar. La variación de la longitud de onda nos indica la variación de la intensidad luminosa. (p. 5)

2.1.2.1. Hora solar pico (HSP)

La hora solar pico (HSP) es un concepto de gran importancia para el diseño de un sistema de generación con paneles fotovoltaicos, de acuerdo a Cantos (2016):

Proporciona una medida de la irradiación solar, y se trata de la duración (en horas) de una hipotética irradiancia solar de 1000 W/m^2 de forma

constante que es equivalente a la irradiación durante un día. Por ejemplo, si decimos que un día tiene 4.5 HSP, significa que la irradiación solar recibida equivale a un día que tuviera 4.5 horas de sol a 1000 W/m^2 y en el resto del día no hubiese nada de irradiación (p. 88).

2.1.3. Generación eléctrica con energía renovable

La generación eléctrica con energía renovable es toda aquella que utiliza como materia prima un recurso natural, como ejemplos consideramos la radiación solar, el viento, agua, biomasa, gas natural. La generación eléctrica con recursos renovables ha tomado mucho interés durante los últimos años siendo parte importante de la matriz energética de Guatemala, a continuación, se detallan los tipos de generación con recursos renovables que se utilizan en Guatemala.

2.1.3.1. Generación hidráulica

Este tipo de generación forma parte importante de la matriz energética de Guatemala, de acuerdo a Martínez (2016):

Consiste en generar energía eléctrica al aprovechar el agua en movimiento de los ríos o para formar embalses que permitan descargar el agua de acuerdo a programas específicos. El principio es aprovechar la diferencia de altura en los causes o del embalse con la casa de máquinas, de tal manera que el movimiento del agua permita hacer girar las turbinas que a su vez hacen girar los generadores de electricidad. (p. 19)

De acuerdo al informe general del Ministerio de Energía y Minas (2021), “La generación hidroeléctrica presenta la mayor participación con 5,816.54 GWh” (p. 10). Por lo que la generación hidroeléctrica equivale al 52.30 % del total de generación de energía de Guatemala para el año 2020.

2.1.3.2. Generación geotérmica

Conceptualmente hablando Martínez (2016) establece:

Consiste en aprovechar el calor proveniente del interior de la tierra para generar electricidad. Generalmente se explota en zonas volcánicas, pero no se restringe solamente a ellas; a medida que se profundiza en el interior del globo terráqueo la temperatura aumenta, por lo tanto, para que un pozo de extracción de vapor pueda ser aprovechado para generar energía eléctrica sus costos de explotación deberán ser relativamente bajos. (p. 20)

Para Guatemala la generación geotérmica tuvo una inyección a la red eléctrica durante el año 2020 de 273.86 GWh que corresponde al 2.46 % del total de generación de energía de Guatemala (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

2.1.3.3. Generación eólica

En Guatemala este tipo de generación ha tenido un incremento en su participación en la matriz energética durante los últimos años y es posible definirla de la siguiente manera de acuerdo a Martínez (2016):

Es la energía producida por el viento que permite mover el rotor de un generador, que a su vez producirá energía eléctrica. La generación de energía eléctrica eólica contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero al reemplazar métodos de generación a través de residuos fósiles. Es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas e inclusive estacionales de los vientos para seleccionar las zonas de instalación de plantas de generación eólica. La velocidad del viento, su comportamiento con respecto a la altura del suelo, entre otras, son variables que deberán de considerarse. (p. 21)

2.1.3.4. Generación con biomasa

La generación con biomasa en Guatemala es producida en gran medida por ingenios azucareros, pero es posible generarla con diversos residuos naturales, Martínez (2016) menciona que “consiste en generar energía eléctrica a través de la incineración de recursos animales y vegetales, son recursos renovables el bagazo de caña de azúcar, la cáscara de trigo, arroz y leña” (p. 21).

Para Guatemala la generación con biomasa tuvo una inyección a la red eléctrica durante el año 2020 de 1,717.96 GWh que corresponde al 15.45 % del total de generación de energía de Guatemala (MEM, 2021).

2.1.3.5. Generación solar fotovoltaica

Este tipo de generación de energía eléctrica ha tenido un crecimiento en el interés de la población a nivel mundial siendo utilizada en proyectos de

pequeña, mediana y gran escala. Zeceña (2018) hace mención en su trabajo de investigación que la energía solar se puede convertir en energía térmica utilizando colectores solares y con los paneles solares la energía luminosa puede convertirse en energía eléctrica.

La generación solar fotovoltaica para Martínez (2016):

Consiste en la transformación directa de la radiación solar en electricidad. La electricidad se produce a través de un dispositivo semiconductor denominado panel o célula fotovoltaica, donde la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor y se genera una diferencia de potencial y según su conexión, se pueden obtener diferencias de potencial mayores. Existen innumerables aplicaciones de utilizar esta energía, aparatos o equipos autónomos, viviendas y refugios aislados de la red eléctrica y en aplicaciones en serie de varios paneles para generar energía suficiente, para conectarla a la red de distribución eléctrica. (p. 24)

“Para Guatemala la generación solar tuvo una inyección a la red eléctrica durante el año 2020 de 221.51 GWh que corresponde al 1.99 % del total de generación de energía de Guatemala” (MEM, 2021, p. 10).

Entre las ventajas de la generación solar, Frías (2012) menciona:

No precisan suministro de combustible alguno para su operación, son absolutamente no contaminantes, son muy fiables, su operación y mantenimiento son muy sencillos y al alcance de personal escasamente

especializado, sus costos actualmente se han ido reduciendo considerablemente, su vida útil es muy larga, probablemente superior a los 30 años, sin que muestren apenas degradación. (p. 17)

Entre las desventajas de este tipo de generación eléctrica, Ramírez (2018) establece: “inversión inicial elevada, difícil almacenamiento, fabricación de tecnología compleja, gran extensión territorial para la instalación de los paneles, variabilidad” (p. 25).

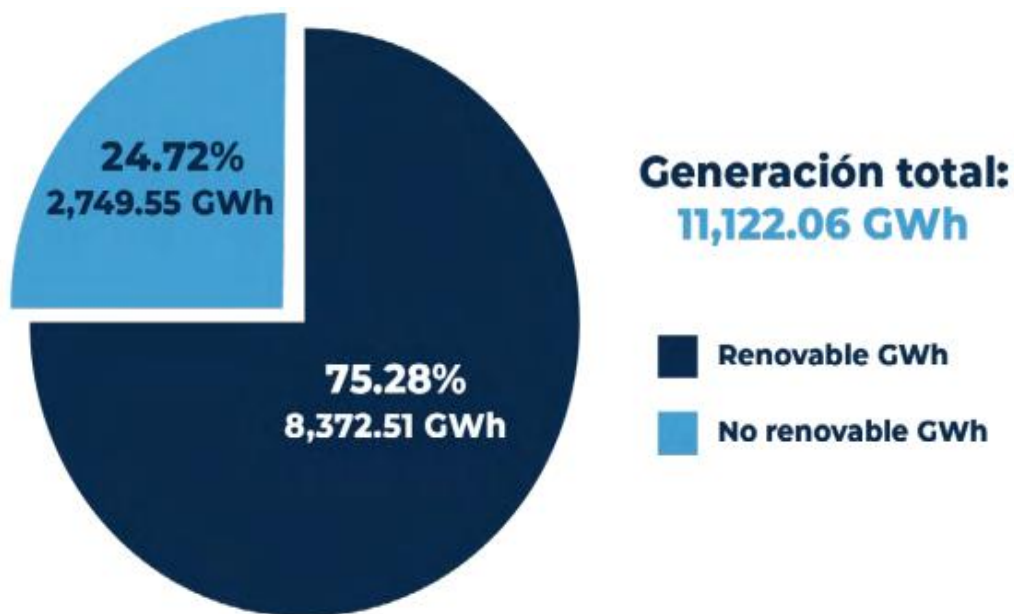
2.1.4. Matriz energética de Guatemala

Actualmente Guatemala posee una matriz energética con un alto porcentaje de generación con recursos renovables, disminuyendo durante los últimos años el uso de fuentes de generación que utilizan combustibles fósiles. De acuerdo al MEM (2021):

La participación de energía renovable en la matriz de generación eléctrica a diciembre del 2020 es aproximadamente de 75.28 por ciento, es decir, que del total de energía generada a la fecha 11,122.06 GWh, la renovable fue de 8,372.51 GWh. La generación hidroeléctrica presenta la mayor participación con 5,816.54 GWh (p. 10).

Figura 1.

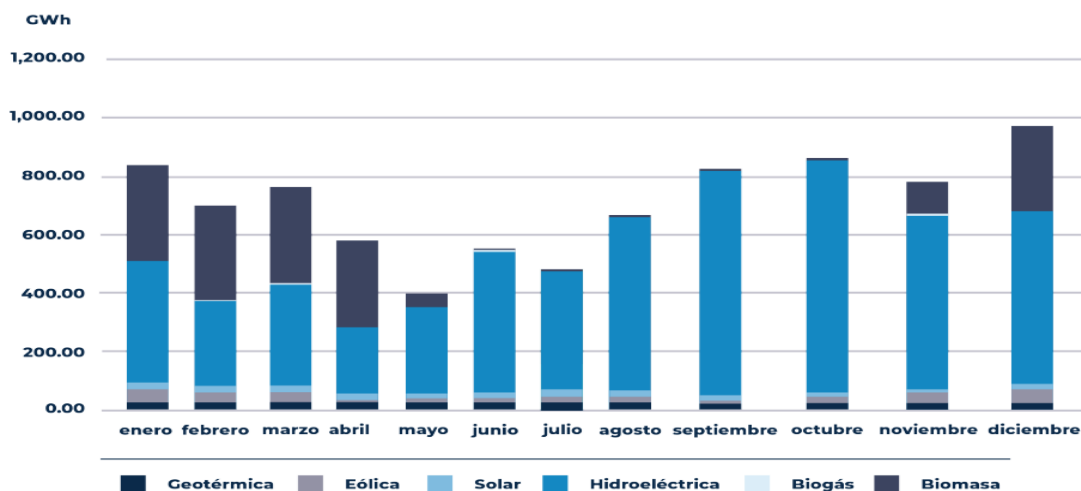
Composición de la generación acumulada año 2020



Nota. Generación de energía eléctrica con recursos renovables y no renovables en el año 2020. Obtenido del Ministerio de Energía y Minas (2021). *Informe general 2020*. (<https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Informe-MEM-2020.pdf>), consultado el 16 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 2.

Participación de las energías renovables en la generación de energía eléctrica



Nota. Comparativa mensual de la energía eléctrica generada en el año 2020 con recursos renovables. Obtenido del Ministerio de Energía y Minas (2021). *Informe general 2020*. (<https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Informe-MEM-2020.pdf>), consultado el 16 de septiembre de 2021. De dominio público.

2.1.5. Sistema de generación solar fotovoltaico

Un sistema de generación solar fotovoltaico posee diversos componentes eléctricos que permiten la transformación de la energía solar en energía eléctrica, de acuerdo a Frías (2012), “los sistemas fotovoltaicos pueden estar equipados con acumuladores que durante el día se encargan de almacenar energía que se podrá utilizar por las noches, en días lluviosos, pero que del mismo modo pueden estar interconectados a la red eléctrica” (p. 21).

En Guatemala un sistema de generación solar fotovoltaico puede funcionar en dos modalidades, Frías (2012), nos explica estos 2 tipos de sistemas fotovoltaicos:

- **Autónomos:** en este caso no hay una red de distribución pública disponible, lo que significa que la electricidad que se produce se utiliza de manera directa o utilizando un inversor, y se almacena en baterías para su uso por las noches o en periodos de escasez de luz solar.
- **Interconectados a la red:** este tipo de sistemas se encuentra instalado en lugares donde se cuenta con conexión a la red eléctrica disponible, (...) los excedentes generados por el sistema fotovoltaico se inyectan a la red a través de un medidor bidireccional, una ventaja importante de este tipo de sistemas es que no requiere un banco de baterías por ello, el costo disminuye y lo hace más accesible. (p. 22)

2.1.6. Componentes de un sistema de generación solar fotovoltaico

A continuación, se detallan los diversos equipos que conforman un sistema de generación solar fotovoltaico.

2.1.6.1. Celda fotovoltaica

Son fabricadas con materiales semiconductores y su función es transformar la energía solar en energía eléctrica, algunos autores la definen de la siguiente manera:

De acuerdo a Frías (2012):

Las celdas fotovoltaicas, se componen por capas de semiconductores, que están dopados para formar la parte positiva y la parte negativa para dar lugar a la formación del campo eléctrico, pueden ser tipo “p” o tipo “n”, la razón para usar estos materiales, es que a bajas temperaturas funcionan como aislantes y al aumentar la temperatura como conductores. Las células solares están fabricadas con dos o más capas de semiconductores, entre las cuales, se forma un campo eléctrico suficiente como para separar las cargas de signo diferente y permitir la generación de corriente cuando reciben radiación luminosa. (p. 18)

Según De León (2008), generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0.25 y los 0.35 mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 mm². Los materiales para la fabricación de las células solares son:

- Silicio monocristalino: de rendimiento energético hasta 15 – 17 %
- Silicio poli-cristalino: de rendimiento energético hasta 12 - 14 %
- Silicio amorfo: con rendimiento energético menor del 10 %;
- Otros materiales: arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio.

“Actualmente, el material más utilizado es el silicio monocristalino que tiene prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin” (De León, 2008, p. 49).

2.1.6.2. Paneles fotovoltaicos

Están compuestos por un conjunto de celdas fotovoltaicas. Pueden ser conectados en serie o paralelo, conceptualmente hablando Frías (2012) establece:

En un módulo fotovoltaico, hay un número determinado de celdas que al estar interconectadas producen la cantidad de electricidad que según el caso se requiere, también los módulos pueden interconectarse hasta lograr el voltaje necesario para la iluminación, el bombeo de agua, entre otros. Es importante destacar que las conexiones entre paneles se hacen en serie para alcanzar la salida de voltaje deseada y en paralelo para lograr la cantidad de corriente necesaria. (p. 20)

Espitia (2017) hace mención que para obtener la cantidad de energía necesaria para el consumo debemos realizar la unión de paneles fotovoltaicos. Es importante considerar que la potencia que puede entregar un módulo fotovoltaico depende del número de sus células que lo componen. Cuando no se obtiene la potencia necesaria para cubrir una determinada demanda se procede a realizar conexiones en serie y en paralelo hasta llegar al valor de potencia deseado.

Figura 3.

Paneles fotovoltaicos



Nota. La figura muestra un conjunto de paneles solares. Obtenido de Pixabay (2016). *Paneles solares.* (<https://pixabay.com/es/photos/solar-panel-paneles-solares-1595566/>), consultado el 25 de septiembre de 2021. De dominio público.

2.1.6.3. Regulador de carga

Es una pieza fundamental de un sistema de generación fotovoltaico, tiene varias funciones, entre ellas podemos mencionar según De León (2008):

- Evita sobrecargas a la batería que puedan producir daños.
- Impide la descarga de la batería en los periodos de luz solar suficiente.
- Asegura el funcionamiento del sistema en el punto de máxima eficacia.

El regulador mantiene constante la tensión, la alimentación del circuito y la carga de baterías. Existen dos tipos el paralelo o *shunt* y los

serie, los más utilizados son los *shunt*, la serie son para instalaciones mayores. (p. 50)

2.1.6.4. Inversor

Es un componente eléctrico que permite la transformación de voltaje o corriente directa en alterna, Pérez (2014) indica, “los inversores son los dispositivos que transforman la corriente continua o directa en corriente alterna, con la amplitud y frecuencia requerida por el usuario final de la corriente que usualmente es el distribuidor” (p. 16).

Figura 4.

Inversor



Nota. Ejemplo de un equipo inversor de voltaje o corriente directa en alterna. Obtenido de Cyanergy (2021). *SolarEdge-Inverter.jpg*. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarEdge-Inverter.jpg>), consultado el 25 de septiembre de 2021. De dominio público.

2.1.7. Protecciones eléctricas de un sistema de generación fotovoltaico

Las protecciones eléctricas son de gran importancia en un sistema de generación fotovoltaico ya que nos ayudan a evitar daños que son generados por cortocircuitos, sobrecargas y sobretensiones. Según Pérez (2014):

Las protecciones eléctricas son esenciales para el proyecto, básicamente consiste en poner a tierra tanto las estructuras metálicas de soporte de los paneles como el panel mismo, para reducir las cargas estáticas, con esta medida se limita la tensión que con respecto a la tierra producen las masas metálicas y permitir el paso a tierra de corrientes producidas por fenómenos atmosféricos. La puesta a tierra de los módulos debe realizarse con conductores unidos a los marcos de manera preferentemente atornillada. (p. 20)

2.2. Mercado eléctrico guatemalteco y normas aplicables para fuentes de generación renovable

A continuación, se describen las instituciones que conforman el mercado eléctrico de Guatemala.

2.2.1. Instituciones del mercado eléctrico guatemalteco

Los agentes del mercado eléctrico guatemalteco se describen a continuación de acuerdo a Martínez (2016):

- Ministerio de Energía y Minas, MEM: es el responsable de formular y coordinar políticas y planes de Estado relacionados al sector eléctrico y aplicar la Ley General de Electricidad y su Reglamento.
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE: le corresponden las funciones regulatorias y normativas, posee independencia funcional. Es responsable de determinar los precios y calidad de los servicios de transporte y distribución sujetos a autorizaciones, con lo cual asegura las condiciones de competencia en el Mercado Mayorista de Electricidad.
- Administrador del Mercado Mayorista, AMM: es el responsable de la administración y operación del Sistema Nacional Interconectado, coordina el despacho del Sistema Eléctrico Interconectado, establece precios a corto plazo del mercado, realiza las transacciones de compra y venta con lo que asegura el abastecimiento de energía eléctrica. (p. 33)

2.2.2. Marco legal

Existen diversas leyes, reglas y normas relacionadas a la generación de energía eléctrica con recursos renovables, nos establecen los lineamientos para

poder desarrollar un proyecto de generación de energía, de acuerdo a Pérez (2014):

El marco jurídico guatemalteco para el sector eléctrico vigente parte de la promulgación de la Ley General de Electricidad, emitida en el año de 1996, esta ley es la base para otras que intervienen en el sector y para una serie de normativa inherentes a la aplicación técnica de casos específicos de los proyectos eléctricos. (p. 4)

Por otra parte, Martínez (2016) menciona las bases legales del mercado eléctrico guatemalteco:

- Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96.
- Reglamento de la Ley General de Electricidad, Acuerdo Gubernativo No. 256-97 y sus reformas.
- Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, Acuerdo Gubernativo No. 299-98 y sus reformas.
- Normas Técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
- Normas de Coordinación Comercial y Operativa del Administrador del Mercado Mayorista.
- Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, Decreto No. 52-2003.
- Ley de Tarifa Social, Decreto No. 96-2000. (p. 1)

2.2.3. Ley General de Electricidad

La Ley General de Electricidad fue creada para promover el desarrollo del mercado eléctrico guatemalteco a través de una competencia mayorista, de acuerdo a Ramírez (2018), “reformó la estructura del subsector eléctrico creando el Mercado Mayorista de Electricidad, proyectando eficiencia y competitividad, fomentando inversión, separando actividades dentro del sector por una solo entidad y abriendo la puerta a la sostenibilidad energética” (p. 30).

La Ley General de Electricidad (LGE) establece el procedimiento a seguir en el caso de instalación de obras de generación, transporte y distribución de electricidad. En su artículo 3, dicta que el Ministerio de Energía y Minas, es el órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico y aplicar esta ley y su reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones; y en su artículo 7, regula la separación de funciones en la actividad eléctrica, es decir, una misma persona, individual o jurídica, al efectuar simultáneamente las actividades de generar y transportar y/o distribuir energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional -SEN- deberá realizarlo a través de empresas o personas jurídicas diferentes. (MEM, 2017, p. 22)

2.2.4. Ley de Incentivos para el Desarrollo de Energía Renovable

Esta ley es de suma importancia en el sector eléctrico guatemalteco ya que promueve la utilización de recursos renovables para la generación de

energía. El artículo 1 de la ley de incentivos para el desarrollo de energía renovable establece de acuerdo a la Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable (2003), “se declara de urgencia e interés nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables. El órgano competente estimulará, promoverá, facilitará y creará las condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con ese fin” (p. 95).

La principal causa del cambio climático es la utilización de combustibles fósiles, por lo que en la actualidad se promueve implementar a gran escala la utilización de fuentes de energía renovables para contrarrestar el cambio climático. Las bondades de las fuentes que producen energía, con recursos renovables, es que no emiten cantidades significativas de GEI y que mediante un uso adecuado de ellas la fuente de energía es renovable en un tiempo corto, no así los combustibles fósiles. (MEM, 2017, p. 23)

2.2.5. Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable – NTGDR – y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía – UAEE –

La Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía (2014) establece los requisitos que deben cumplir los generadores distribuidos renovables y los distribuidores para realizar la conexión al SNI, operación, control y comercialización de energía.

La industria eléctrica en sus inicios se fundamentó en la generación centralizada, es decir, la generación cercana a los sitios de consumo,

mientras que los consumidores crecían a su alrededor; sin embargo, este sistema tuvo restricciones de crecimiento a no más de 60 kilómetros, por lo que surgió las líneas de transmisión en corriente alterna, para llevar energía a sitios lejanos de los puntos de producción. Guatemala avanza a tener una combinación de los dos sistemas: el convencional y el distribuido, para hacer más eficiente la utilización de los recursos energéticos y es por eso la norma NTGDR. El objeto de esta Norma es establecer las disposiciones generales que deben cumplir los Generadores Distribuidos Renovables y los Distribuidores para la conexión, operación, control y comercialización de energía eléctrica producida con fuentes renovables. (Pérez, 2014, p. 7)

2.2.6. Política Energética 2019-2050

La Política Energética 2019-2050 fue creada por el MEM con el fin de crear una red eléctrica más eficiente, competitiva y dar un mejor aprovechamiento a los recursos energéticos.

De acuerdo al MEM (2018) la política energética 2019-2050 considera cinco ejes de acción, siendo estos: Consumo de leña, Abastecimiento y Uso final de la electricidad, Abastecimiento y Uso final de los combustibles, Desarrollo Sostenible y Eficiencia Energética.

2.3. Fundamentos metodológicos del diseño de sistemas fotovoltaicos de pequeña escala

Los aspectos a considerar para el dimensionamiento adecuado de los diversos componentes del sistema de generación solar fotovoltaico se detallan a continuación:

2.3.1. Determinación de la demanda

Para determinar el consumo máximo de un usuario debemos conocer la potencia de cada equipo o elemento eléctrico a conectar a la red interna, multiplicamos la potencia por el número de horas a utilizar los dispositivos, finalmente sumamos el consumo de cada equipo durante el día y obtendremos el consumo máximo diario.

Por otra parte, las facturas de energía eléctrica mensual nos muestran las mediciones del contador de energía durante todos los días del mes por lo que es posible determinar de una manera más sencilla el consumo máximo de un usuario durante el mes.

2.3.2. *Software web* para determinación de hora solar pico (HSP)

Para determinar el valor de horas solares pico en el área de Escuintla se utilizará un *software web* gratuito elaborado por la NASA, dicho *software* lleva por nombre POWER Data Access Viewer. Esta herramienta permite conocer datos climáticos y para el caso del presente estudio se podrá determinar la cantidad de radiación solar en superficies inclinadas y horizontales, horas solares pico de

cada mes del año, ángulos de colocación de paneles fotovoltaicos y recomendaciones de ubicación óptima para los paneles fotovoltaicos.

2.3.3. Cálculo del número de paneles

La determinación del número de paneles fotovoltaicos es de gran relevancia en el diseño de un sistema de generación de energía debido a que si establecemos un valor menor al adecuado no cubriremos la demanda que requiere el usuario, también si sobredimensionamos el número de paneles tendríamos exceso de generación lo que incrementaría los costos del proyecto, por lo que debemos realizar una aproximación adecuada al momento de calcular el número de paneles. De acuerdo a Ramos y Luna (2014) la fórmula para determinar el número de paneles es:

$$NT = \frac{LMD_{crit}}{PMPP * HPS_{crit} * PR} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

NT = número total de paneles

LMD_{crit} = consumo medio diario crítico (Wh)

PMPP = potencia pico del módulo en condiciones estándar STC (W)

HPS_{crit} = horas pico del mes crítico (h)

PR = factor global de funcionamiento

2.3.4. Dimensionamiento del inversor

El inversor es un dispositivo eléctrico encargado de transformar la corriente directa a corriente alterna para luego ser suministrada a la red de distribución de energía. De acuerdo a Espitia (2017), “los inversores vienen

caracterizados principalmente por la tensión de entrada, que se debe adaptar al generador, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia” (p. 59).

Para determinar el tipo de inversor necesario para el sistema de generación fotovoltaico a diseñar se requiere tener conocimiento de la capacidad del sistema (W), para luego cotizarlo y seleccionar de acuerdo al presupuesto. Adicionalmente Espitia (2017) en su trabajo de investigación establece las fórmulas para determinar el inversor.

Tabla 1.

Dimensionamiento del inversor

Descripción	Ecuación
Potencia del inversor	$P_{inversor} = \sum P_{Panel} * N^o_{paneles}$ (Ec. 2)
Números de paneles en serie	$N^o_{paneles\ en\ serie} = \frac{V_{Max\ entrada\ inversor}}{V_{OC\ panel}}$ (Ec. 3)
Voltaje máximo de los paneles en serie	$V_{Max\ paneles\ en\ serie} = V_{max\ pot} * N^o_{paneles\ en\ serie}$ (Ec. 4)
Número de ramales en paralelo	$N^o_{ramas\ en\ paralelo} = \frac{N^o_{total\ de\ paneles}}{N^o_{paneles\ en\ serie}}$ (Ec. 5)
Potencia eléctrica	$P = V * I$ (Ec. 6)
Energía eléctrica	$E = P * t$ (Ec. 7)
Módulos solares en serie	$V = V_1 + V_2 + \dots V_n$ (Ec. 8)
Módulos solares en paralelo	$I = I_1 + I_2 + \dots I_n$ (Ec. 9)

Donde: P = Potencia (W), V = Voltaje (V), I = Corriente (A),
E = Energía (kWh), t = Tiempo (horas)

Nota. Fórmulas para el dimensionamiento del equipo inversor. Elaboración propia, realizado con Word.

2.3.5. Dimensionamiento del cableado y protección eléctrica

El cableado permite conectar los diferentes componentes del sistema de generación y es de gran importancia el dimensionamiento adecuado para el correcto funcionamiento del equipo.

Según Espitia (2017) el cableado de los paneles fotovoltaicos debe ser fabricado con materiales de alta calidad para garantizar la durabilidad y fiabilidad del sistema en exteriores. También deben tener una capa protectora con un material resistente a la intemperie y la humedad. Es de gran importancia la corriente a transportar y las pérdidas de voltaje. Las fórmulas para el dimensionamiento del conductor para corriente continua y corriente alterna son:

Tabla 2.

Dimensionamiento de conductores

Descripción	Ecuación
	$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\sigma \cdot \Delta V} \quad (\text{Ec. 10})$
Sección transversal en corriente continua	Donde: <i>S</i>: sección del cable (mm²) <i>L</i>: Largo del cable (m) <i>I</i>: corriente (A) <i>σ</i>: conductividad eléctrica (cobre = 59 S/m) <i>ΔV</i>: caída de tensión (V) → 1 V

Continuación de la tabla 2.

Descripción	Ecuación
	$S = \frac{2 * L * I * \cos(\phi)}{\sigma * \Delta V}$ (Ec. 11)
	Donde:
	S: sección del cable (mm ²)
Sección transversal en corriente alterna	L: largo del cable (m)
	I: corriente (A)
	σ: conductividad eléctrica (cobre = 59 S/m)
	ΔV: caída de tensión (V) → 5 V
	Cos(φ): Factor de potencia (0.9)

Nota. Fórmulas para el dimensionamiento de los conductores en corriente directa y corriente alterna. Elaboración propia, realizado con Word.

Tabla 3.

Sección de conductores en mm²

Calibre	Sección del cobre		Díámetro del conductor	Suma de las secciones para cada cantidad de conductores				
AWG ó MCM	MCM	mm ²	mm	1	2	3	4	5
14	1.107	2.08	3.43	9.2	18.5	27.7	37.0	46.2
12	6.530	3.31	3.91	12.0	24.0	36.0	48.0	60.0
10	10.38	5.26	4.52	16.1	32.1	48.1	64.2	80.2
8	16.51	8.37	6.10	29.2	58.5	87.7	116.9	146.1
6	26.50	13.30	7.82	48.0	96.1	144.1	192.1	240.1
4	41.74	21.15	9.04	64.2	128.4	192.6	256.7	321.9
2	66.37	33.63	10.57	87.8	175.5	263.3	351.0	438.7
1/0	105.5	53.48	13.44	142	284	425.6	567.5	709.3
2/0	133.1	67.43	14.61	168	335	502.9	670.6	838.2

Continuación de la tabla 3.

Calibre	Sección del cobre		Diámetro del conductor	Suma de las secciones para cada cantidad de conductores				
	MCM	mm ²		1	2	3	4	5
AWG ó MCM								
3/0	167.8	85.05	15.90	199	397	595.7	794.2	992.8
4/0	211.6	107.2	17.37	237	474	710.9	947.9	1185
250	250	126.7	19.38	295	590	885	1180	1475
300	300	152.2	20.78	339	678	1017	1357	1696
350	350	177.6	22.07	383	765	1148	1530	1913
400	400	202.6	23.27	425	851	1276	1701	2127
500	500	253.1	25.43	508	1016	1524	2032	2540
600	600	303.7	28.22	326	1251	1876	2502	3127
750	750	379.3	30.89	749	1499	2248	2998	3747
1000	1000	506.7	34.80	951	1902	2853	3805	4756

Nota. Sección transversal de conductores eléctricos. Elaboración propia, realizado con Word.

Tabla 4.

Capacidad de corriente (amperios) de conductores de cobre aislado

Tipo de aislam.	THWN, RUW, T, TW, TWD, MTW		RH, RHW, THW, THWN, DF, XHHW, RUH		PILC, V, MI		TBS, AVB SIS, THHW TA, SA, FEP THW, RHH EP, MTV, XHHW*	
Temp. máxima	60 °C		75 °C		85 °C		90 °C	
Calibre AWG/MCM	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire
14	15	20	15	20	25	30	25	30

Continuación de la tabla 4.

Tipo de aislam.	THWN, RUW, T, TW, TWD, MTW		RH, RHW, THW, THWN, DF, XHHW, RUH		PILC, V, MI		TBS, AVB SIS, THHW TA, SA, FEP THW, RHH EP, MTV, XHHW*	
							90 °C	
Temp. Máxima	60 °C		75 °C		85 °C		90 °C	
Calibre AWG/MCM	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire
12	20	25	20	25	30	40	30	40
10	30	40	30	40	40	55	40	55
8	40	55	45	65	50	70	50	70
6	55	80	65	95	70	100	70	100
4	70	105	85	125	90	135	90	135
3	80	120	100	145	105	155	105	155
2	95	140	115	170	120	180	120	180
1	110	165	130	195	140	210	140	210
0	125	195	150	230	155	245	155	245
00	145	225	175	265	185	285	185	285
000	165	260	200	310	210	330	210	330
0000	195	300	230	360	235	385	235	385
250	215	340	255	405	270	425	270	425
300	240	375	285	445	300	480	300	480
350	260	420	310	505	325	530	325	530
400	280	455	335	545	360	575	360	575
500	320	515	380	620	405	660	405	660
600	355	575	420	690	455	740	455	740
700	385	630	460	755	490	815	490	815
750	400	655	475	785	500	845	500	845
800	410	680	490	815	515	880	515	880

Continuación de la tabla 4.

Tipo de aislam.	THWN, RUW, T, TW, TWD, MTW		RH, RHW, THW, THWN, DF, XHHW, RUH		PILC, V, MI		TBS, AVB SIS, THHW TA, SA, FEP THW, RHH EP, MTV, XHHW*	
Temp. máxima	60 °C		75 °C		85 °C		90 °C	
Calibre AWG/MCM	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire
900	435	730	520	870	555	940	555	940
1000	455	780	545	935	585	1000	585	1000

Nota. Tabla comparativa de la capacidad de corriente de conductores de cobre aislado. Elaboración propia, realizado con Word.

Para el dimensionamiento del equipo de protección eléctrica del sistema fotovoltaico se utilizarán las fórmulas siguientes:

Tabla 5.

Dimensionamiento de protección eléctrica

Descripción	Ecuación	
Corriente eléctrica	$I = \frac{P}{V}$	(Ec. 12)
Corriente de interruptor termomagnético	$I_{IT} = I_C + 0.15 \times I_C$	(Ec. 13)
Donde:		
	I = corriente (A)	
	V = voltaje (V)	
	P = potencia (W)	

Nota. Fórmulas para el cálculo de las protecciones eléctricas del sistema de generación. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4. Análisis económico

A continuación, se describen dos métodos de análisis económico para el presente proyecto de generación de energía eléctrica.

2.4.1. Valor presente neto (VPN)

El valor presente neto nos “muestra cuánto aumentará el valor de la empresa y por tanto cuánto se incrementará la riqueza de los accionistas, siempre que sea positivo” (Pérez, 2014, p. 21).

Álvarez (2017) define el valor presente neto de la siguiente manera:

VPN es la suma, en valor presente, de todos los flujos de caja (positivos y negativos) que ocurren en la actualidad y los que se espera que ocurran durante la vida del proyecto. Según sea positivo o negativo, representará generación o pérdida de valor para la persona o empresa que invierte. Generación de valor es sinónimo de enriquecimiento de los dueños del proyecto, y destrucción de valor lo es de empobrecimiento de ellos. La idea fundamental es: conviene realizar una inversión si ella crea valor para el inversionista. (p. 8)

Las fórmulas para determinar el VPN se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.*Fórmulas VPN*

Descripción	Ecuación
Fórmula de VPN	$VPN = -I_0 + \frac{FC_1}{(1+i^*)^1} + \frac{FC_2}{(1+i^*)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i^*)^n} \quad (\text{Ec. 14})$
	$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i^*)^t} \quad (\text{Ec. 15})$
Fórmula General para el VPN	Donde: I_0: inversión inicial en el año cero. FC_t: flujo de caja del proyecto en el año o periodo t (positivo o negativo). n: periodo. i^*: tasa de oportunidad

Nota. Fórmulas para el cálculo del Valor Presente Neto del Proyecto. Elaboración propia, realizado con Word.

De acuerdo al trabajo de investigación de Espitia (2017) la mayor desventaja de un análisis de rentabilidad basado en este criterio es que hay que establecer la tasa de interés, esta depende de muchos elementos entre ellos podemos mencionar: los costos de oportunidad, riesgos del tipo de inversión y el valor del dinero.

Los criterios de decisión para el VPN se pueden clasificar de tres maneras, siendo la primera cuando el VPN es mayor que cero, la segunda es cuando el VPN es menor que cero, por último, cuando el VPN es igual a cero, a continuación, analizaremos el significado de cada criterio según lo menciona Álvarez (2017):

Tabla 7.

Criterios de decisión VPN

Valor de VPN	Significado
Si $VPN > 0$	Se acepta el proyecto, quiere decir que el dinero que se invierte en el proyecto da una rentabilidad mayor que la tasa de oportunidad.
Si $VPN < 0$	Se rechaza el proyecto, quiere decir que el dinero que se invierte en el proyecto da una rentabilidad esperada menor que la tasa de oportunidad, y por lo tanto se genera una pérdida.
Si $VPN = 0$	Hay indiferencia financiera, pero tampoco debiera realizarse el proyecto, puesto que esta situación de equilibrio entre ingresos y egresos no estaría generando riqueza para los inversionistas.

Nota. Criterios a considerar en el Valor Presente Neto. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.2. Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR forma parte importante de la evaluación económica de un proyecto, básicamente es la máxima tasa de descuento que puede tener una inversión o proyecto para que sea rentable. La TIR es la tasa de descuento que forza el valor presente de los flujos de efectivo esperados de un proyecto para que sea igual a su costo inicial.

Álvarez (2017) define la TIR de la siguiente manera:

Matemáticamente, la tasa interna de retorno es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos de un proyecto. En otras palabras, es la tasa de descuento que hace cero al VPN. De modo sencillo: si $VPN(i) = 0$, esto implica que, $i = TIR$. Al plantear VPN igual a cero se está mostrando que los dineros

invertidos en el proyecto ganan un interés igual a la tasa con la cual se descuentan los flujos. Para un proyecto de inversión, matemáticamente la TIR se obtiene resolviendo la tasa i para el VPN igualado a cero. (p. 12)

Adicionalmente Espitia (2017) define a la TIR como “la tasa en la que los flujos de entrada y de salida de un proyecto traídos a valor presente se igualan, es la tasa en la cual el VPN se iguala a cero” (p. 78).

Para determinar el valor de la TIR se puede utilizar hojas de cálculo, calculadora financiera y el método de prueba o error. Los criterios de decisión en la TIR se pueden clasificar de la siguiente manera como lo indica Álvarez (2017):

Tabla 8.

Criterios de decisión TIR

Valor de TIR	Significado
Si $TIR > \text{tasa de oportunidad } (i^*)$	Se acepta el proyecto, es claro que un proyecto se puede realizar si provee un retorno que exceda la tasa de oportunidad.
$TIR = i^*$	Hay indiferencia financiera, lo que significaría que el inversionista debería estar igualmente dispuesto a aceptar o a rechazar el proyecto, con las implicaciones de poder perder ante ligeras disminuciones de los flujos de ingresos futuros que se presenten en el proyecto.
Si $TIR < \text{tasa de oportunidad } (i^*)$	Se rechaza el proyecto.

Nota. Criterios a considerar en la tasa interna de retorno. Elaboración propia, realizado con Word.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado de acuerdo a la siguiente metodología:

3.1. Características del estudio

El enfoque de la presente investigación fue de tipo cuantitativo, ya que se determinó a través de cálculos matemáticos el dimensionamiento adecuado de un sistema de generación fotovoltaico en un centro educativo.

El alcance de esta investigación fue descriptivo, dado que se estableció el equipo necesario para la implementación del sistema de generación fotovoltaico, los requisitos para ser usuario autoprodutor con excedentes de energía y el tiempo de recuperación de la inversión.

El diseño adoptado fue no experimental, ya que no se realizó manipulación de variables para el desarrollo de la investigación, es decir se realizó únicamente una propuesta para la reducción de costos de energía eléctrica mensual a través del diseño de un sistema de generación solar fotovoltaico.

3.2. Unidades de análisis

La unidad de análisis fue un centro educativo ubicado en el departamento de Escuintla.

3.3. Variables

Las variables y su clasificación se listan en la tabla 9:

Tabla 9.

Variables y su clasificación

Variable	Criterio	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Escala de medición
		Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
Tipo de usuario de energía			X			X		Nominal
Capacidad del sistema de generación solar fotovoltaico					X		X	Razón
Número de paneles fotovoltaicos				X			X	Razón
Tiempo de recuperación de la inversión					X		X	Razón

Nota. Clasificación de variables a considerar en el estudio. Elaboración propia, realizado con Word.

Las variables de estudio se describen en la tabla 10, que observaremos a continuación:

Tabla 10.*Variables en estudio*

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Tipo de usuario	Clasificación del usuario del servicio de energía eléctrica considerando criterios como nivel de tensión, consumo y potencia.	Se determinó el consumo (kWh), nivel de tensión (V) y potencia eléctrica (W).
Capacidad del sistema de generación solar fotovoltaico	Potencia máxima que puede entregar el sistema de generación de energía eléctrica.	Se determinó la potencia máxima del sistema (W) tomando en consideración todos los elementos o equipos eléctricos de la red interna de energía eléctrica.
Número de paneles fotovoltaicos	Cantidad de paneles fotovoltaicos que permiten el funcionamiento correcto de una red de energía eléctrica.	Se calculó el número de paneles solares (adimensional) a través del consumo diario promedio (W) y la generación media de cada panel solar (W)
Tiempo de recuperación de la inversión	Método de valoración de inversiones que mide el tiempo que una inversión tarda en recuperar el desembolso inicial, con los flujos de caja generados en el futuro por la misma.	Se determinó a través del método de VPN y TIR el tiempo de recuperación de la inversión (años).

Nota. Descripción de las variables del estudio. Elaboración propia, realizado con Word.

3.4. Fases del estudio

A continuación, se describirán las fases del presente trabajo de investigación:

3.4.1. Fase 1: revisión documental

En la primera fase se realizó una revisión bibliográfica estableciendo todas las referencias primarias y/o secundarias en relación al tema de la presente investigación, las referencias primarias son documentos cuya información no se obtuvo de otros trabajos de investigación, entre las referencias primarias encontramos: artículos científicos, noticias de prensa, estadísticas públicas o privadas, fotografías, entre otros. Las referencias secundarias son documentos que poseen como fuente de información las referencias primarias, entre las referencias secundarias podemos nombrar: manuales profesionales, columnas de opinión, tesis a nivel de maestría, entre otros.

Para esta investigación se utilizaron libros relacionados al campo de la electricidad, leyes, normas, reglamentos e informes del mercado eléctrico guatemalteco, tesis a nivel de maestría y artículos científicos publicados en internet. Se analizó detenidamente la información recopilada para desarrollar el diseño de un sistema de generación solar fotovoltaico.

3.4.2. Fase 2: dimensionamiento y diseño de un sistema de generación fotovoltaico

Para esta fase se realizarán los siguientes pasos:

- Se analizaron las facturas mensuales de energía eléctrica comprendidas del mes de enero de 2020 hasta el mes de agosto de 2022. Lo anterior permitió tener un amplio panorama en la fluctuación de los consumos y costos mensuales de energía eléctrica, siendo de gran utilidad para establecer la capacidad necesaria del sistema de generación solar fotovoltaico que sustenté la demanda de la institución. De acuerdo al análisis anterior, se determinó el consumo de energía diario y la demanda máxima anual de la institución educativa.
- Se determinó la radiación que incide sobre el área seleccionada para la implementación del sistema de generación fotovoltaico, considerando la latitud y longitud de la localidad, de acuerdo al MEM (2018): “Guatemala es un país con un gran potencial solar, que, debido a su posicionamiento geográfico, el valor promedio de radiación solar global para todo el país de 5.3 kWh/m² al día” (p. 2).
- Se cotizaron paneles fotovoltaicos en el mercado guatemalteco, analizando las siguientes características: tamaño (m.), peso (lb.), potencia pico (W), voltaje máximo (V), corriente máxima (A), tipo de panel fotovoltaico.
- Se determinó el número de paneles solares necesarios, utilizando la potencia a generar para cubrir la demanda de la institución educativa y la capacidad de cada panel, también se estableció el tipo de conexión de los paneles fotovoltaicos (serie o paralelo).
- Se calculó el tipo de inversor, la capacidad y clase del cableado eléctrico, en función del arreglo de conexión de los paneles fotovoltaicos, el voltaje y la corriente eléctrica del arreglo.

- Se determinaron las protecciones eléctricas y las dimensiones de la estructura de soporte, realizando un dimensionamiento adecuado para evitar daños en el sistema.
- Se realizó un diagrama eléctrico del sistema de generación que muestra el diseño final del proyecto.
- Finalmente se cotizaron los restantes componentes del sistema de generación en el mercado guatemalteco y se procedió a determinar el costo total del proyecto, considerando funcionar como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía.

3.4.3. Fase 3: requisitos y procedimiento para conectarse a la red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía

Para conectarse a la red de distribución de energía como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía se debe contar con una fuente de generación de energía con recursos renovables, estos pueden ser: eólica, hidráulica, biomasa, solar, geotérmica, entre otras. Los pasos a seguir para registrarse como UAEE son:

- Instalar un sistema de generación de energía eléctrica con recursos renovables en el sitio de consumo.
- Descargar y llenar el formulario para UAEE, para conseguirlo se debe visitar la página web de la CNEE o de la distribuidora de energía de la localidad.

- La distribuidora de energía después de ser recibido el formulario por parte del interesado realiza una inspección técnica de las instalaciones.
- Al ser positivos los resultados de la evaluación se procede a la instalación del medidor bidireccional, realizando las siguientes consideraciones de acuerdo a la CNEE (2014): “si es usuario regulado el distribuidor procederá a la instalación del medidor correspondiente, en un plazo no mayor a 28 días de recibida la notificación por parte del interesado” (p. 2). En caso contrario la CNEE (2014) estipula: “para el caso de grandes usuarios (>100 kW), son ellos los responsables de su sistema de medición” (p. 2).

3.4.4. Fase 4: análisis económico

Se realizó un análisis económico para determinar si el proyecto es viable, tomando en cuenta los siguientes métodos de evaluación económica:

- Se utilizó el método del valor presente neto (VPN) descrito en la sección 2.4.1, el VPN es una sumatoria de todos los flujos del proyecto desde la actualidad y la vida útil del proyecto. Utilizando la fórmula descrita en la sección anterior se determinó si el proyecto es viable de acuerdo a los siguientes criterios: si el VPN es mayor que cero se aceptará el proyecto, si el VPN es menor o igual a cero se rechazará el proyecto.
- En la segunda etapa del análisis económico se consideró el método de la tasa interna de retorno (TIR) explicado en la sección 2.4.2, en donde utilizando una fórmula matemática descrita en la sección anterior se determinó la máxima tasa de descuento que puede tener nuestro proyecto para que sea rentable.

3.5. Situación actual

El centro educativo ubicado en el municipio de Palín, departamento de Escuintla posee un alto consumo mensual de Energía Eléctrica, provocando un alto costo por el uso de dicho servicio a lo largo del año, afectando de manera significativa el presupuesto anual del centro educativo, reduciendo la posibilidad de inversión en ampliaciones de infraestructura, nuevos equipos, publicidad, entre otros. Actualmente no se cuenta con un sistema de generación de energía eléctrica en las instalaciones del centro educativo y la administración de dicha institución muestra interés en la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando recursos renovables y que permita reducir de manera significativa los costos de facturación del servicio de energía eléctrica.

3.6. Servicio de energía

La empresa que presta el servicio de energía eléctrica al centro educativo es ajena al Sistema Nacional Interconectado (SNI), dicha empresa posee su sistema de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, prestando el servicio en los departamentos de Guatemala y Escuintla. A través de comunicación con personal de la empresa de distribución de energía eléctrica se obtuvo información respecto a los requisitos para conectarse a la red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía. En la actualidad se cuenta con un contador unidireccional 120/240 Voltios propiedad de la empresa de distribución, dicho contador mide el consumo de las instalaciones del centro educativo.

3.7. Recopilación de información del consumo de energía

A través de la administración del centro educativo se obtuvo acceso a las facturas de consumo de energía eléctrica del contador de las instalaciones de la institución educativa, con previa autorización de la Junta Directiva. De acuerdo a lo planificado para el desarrollo de la presente investigación hubo un retraso en la entrega de dichas facturas, reduciendo el tiempo considerado para la realización de las cotizaciones de los equipos del sistema de generación fotovoltaico.

A pesar del retraso, la institución educativa apoyó en facilitar al investigador la información requerida, teniendo acceso a las facturas de consumo de energía eléctrica para el período comprendido del mes de enero del año dos mil veinte (2020) hasta el mes de agosto del año dos mil veintidós (2022), permitiendo analizar información del consumo de energía de 32 meses. Luego se procedió a tabular la información en Microsoft Excel, considerando el consumo (kWh), tarifa (Q/kWh.) y costo de facturación mensual (Q.), generando una base de datos con valiosa información para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

3.8. Análisis de información del consumo de energía

Se analizó la información recopilada en las facturas de energía eléctrica utilizando herramientas estadísticas como: promedio, media aritmética, desviación estándar; luego se procedió a tabular dichos resultados en una tabla de resumen.

Cabe mencionar que las mediciones del consumo de energía eléctrica del año 2020 fueron de menor valor debido a la pandemia generada por el virus

SARS-CoV-2, no siendo utilizadas las instalaciones del centro educativo durante varios meses para impartir clases, sin embargo, dichas facturas de energía eléctrica son de gran relevancia para la determinación de la tarifa mensual.

Se realizó una gráfica de los consumos mensuales para tener una mejor interpretación en el comportamiento de la demanda a lo largo de los meses del año.

3.9. Método para determinación de hora solar pico (HSP)

Para la determinación de la Hora Solar Pico del área donde se realizó el diseño del sistema de generación solar fotovoltaico fue necesaria la utilización de una herramienta web gratuita elaborada por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, conocida como NASA, dicha herramienta lleva por nombre POWER Data Access Viewer. El *software* mencionado anteriormente también proporciona el ángulo óptimo de inclinación de los paneles fotovoltaicos para cada mes del año.

En la actualidad existen varias plataformas para poder determinar las HSP y son de gran utilidad para el dimensionamiento de sistemas de generación solar fotovoltaico.

Se optó por utilizar la plataforma POWER Data Access Viewer debido a que es una herramienta de gran confiabilidad ya que fue creado por la NASA, proporciona datos meteorológicos y solares, es gratuita, compatible con diversos sistemas operativos (Windows, Apple, Android), permite utilizarse en diversos equipos electrónicos (Computadora, Tableta, Teléfono), diversos navegadores web, su configuración es bastante sencilla que permite comprender con facilidad la interfaz, permite descargar los resultados en formato Excel para un manejo

más fácil de los datos y en actualidad es una de las plataformas más utilizadas para el diseño de sistemas de generación con paneles fotovoltaicos.

3.10. Dimensionamiento del sistema de generación

Para el dimensionamiento de los equipos del sistema de generación con paneles fotovoltaicos se procedió a utilizar la demanda máxima anual, siendo para el presente trabajo de investigación las últimas 12 facturas a las cuales se tuvo acceso. El orden de cálculo de los componentes fue el siguiente:

Figura 5.

Orden de cálculo de componentes del sistema de generación



Nota. Etapas para el dimensionamiento de los equipos del sistema de generación. Elaboración propia, realizado con Word.

En la determinación del número de paneles fotovoltaicos también se utilizó el valor de HSP determinado por medio del *software* POWER Data Access Viewer y para el presente trabajo de investigación se utilizó un factor de rendimiento o *performance ratio* de 0.75, dicho factor considera las pérdidas de los equipos del sistema de generación.

Para medir las longitudes y área de la zona donde se instalarán los paneles fotovoltaicos se utilizó la plataforma Google Earth, la cual ofrece una herramienta de medición bastante precisa, permitiendo determinar el área disponible para el presente proyecto.

3.11. Cotización de equipos

Se realizó una búsqueda vía internet de empresas locales relacionadas con sistemas de generación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos, actualmente existen ya varias empresas en el mercado, ofreciendo variedad de equipos y servicios.

Seguidamente se procedió a contactar algunas de estas empresas vía llamada telefónica, correo electrónico y chat de WhatsApp con el fin de conocer las marcas de equipos, modelos de equipos, precios, información técnica, servicios de instalación y mantenimiento, con el fin de conocer el mercado.

Se tuvieron algunas complicaciones por parte de las empresas consultadas para el envío de las cotizaciones, algunas de las razones del retraso fueron: cotizaciones en cola, descuido en el envío de la información, errores al remitir la información al interesado.

A pesar de los inconvenientes mencionados en el párrafo anterior, se obtuvo respuesta de algunas empresas, se procedió al análisis de dichas cotizaciones y fichas técnicas de los equipos ofrecidos, luego se procedió a seleccionar la propuesta de mejor calidad-precio.

3.12. Evaluación financiera

Para determinar la rentabilidad del proyecto se utilizaron las herramientas de valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR), aplicando los conceptos de la tabla 7 y 8 respectivamente.

Los cálculos se realizaron en Microsoft Excel, permitiendo realizar los cálculos de una forma sencilla y precisa, se realizaron las siguientes consideraciones:

- Los paneles fotovoltaicos tendrán anualmente una disminución de 0.5 % en su capacidad de generación.
- La tarifa promedio de consumo de energía eléctrica tendrá un incremento anual del 1 %.
- Mantenimiento preventivo una vez al año, para tener una óptima generación de energía.
- Reemplazo de inversor cada 10 años de funcionamiento del sistema de generación.
- Cargos fijos.

- Para el análisis de VPN se tomó como base una tasa de descuento de 10 %.

3.13. Técnicas de análisis

Se solicitó autorización a la administración del centro educativo tener acceso a la información de los consumos de energía eléctrica, lográndose recolectar facturas de consumo de energía eléctrica mensual de los últimos 3 años, se analizó la demanda de energía mensual en kWh y el costo en quetzales, luego a través de medidas de tendencia central se realizaron cálculos para determinar la media aritmética, mediana y desviación estándar, de acuerdo a los cálculos anteriores se determinó el consumo anual del centro educativo que permitió establecer la capacidad del sistema de generación solar fotovoltaico.

Se realizaron cotizaciones de paneles solares en el mercado nacional, comparando las siguientes características: tamaño (mm.), peso (lb.), potencia pico (W), voltaje máximo (V), corriente máxima (A), costo (Q.), tipo de panel fotovoltaico. Esto permitió determinar el modelo de panel fotovoltaico para el diseño del proyecto de generación de energía de la institución educativa.

Una vez seleccionado el modelo de panel fotovoltaico se realizaron cálculos matemáticos para determinar el número de paneles que cubra la demanda máxima del centro educativo, estructura de soporte, tipo de inversor, cableado y protecciones eléctricas.

Para analizar la variable tipo de usuario se evaluó si se cumple con los requisitos que exige la CNEE y el distribuidor de energía de la región para funcionar como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía.

Finalmente se utilizó métodos de evaluación financiera (VPN y TIR) para determinar el tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-coste del proyecto de generación de energía del centro educativo.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Dimensionamiento de equipos y diseño del sistema de generación con paneles solares

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el dimensionamiento y diseño del sistema de generación fotovoltaico.

4.1.1. Demanda de energía eléctrica

La tabla 11 muestra los consumos mensuales de energía eléctrica del período anual con mayor demanda en el centro educativo, dichas mediciones fueron obtenidas por medio de la facturación eléctrica mensual comprendida desde el mes de septiembre de dos mil veintiuno (2021) hasta agosto de dos mil veintidós (2022), las mediciones corresponden al contador no. 22102925:

Tabla 11.

Demanda de energía del centro educativo

Mes y Año	Consumo de energía
Septiembre 2021	888 kWh/mes
Octubre 2021	977 kWh/mes
Noviembre 2021	447 kWh/mes
Diciembre 2021	329 kWh/mes
Enero 2022	845 kWh/mes
Febrero 2022	1,106 kWh/mes
Marzo 2022	1,260 kWh/mes

Continuación de la tabla 11.

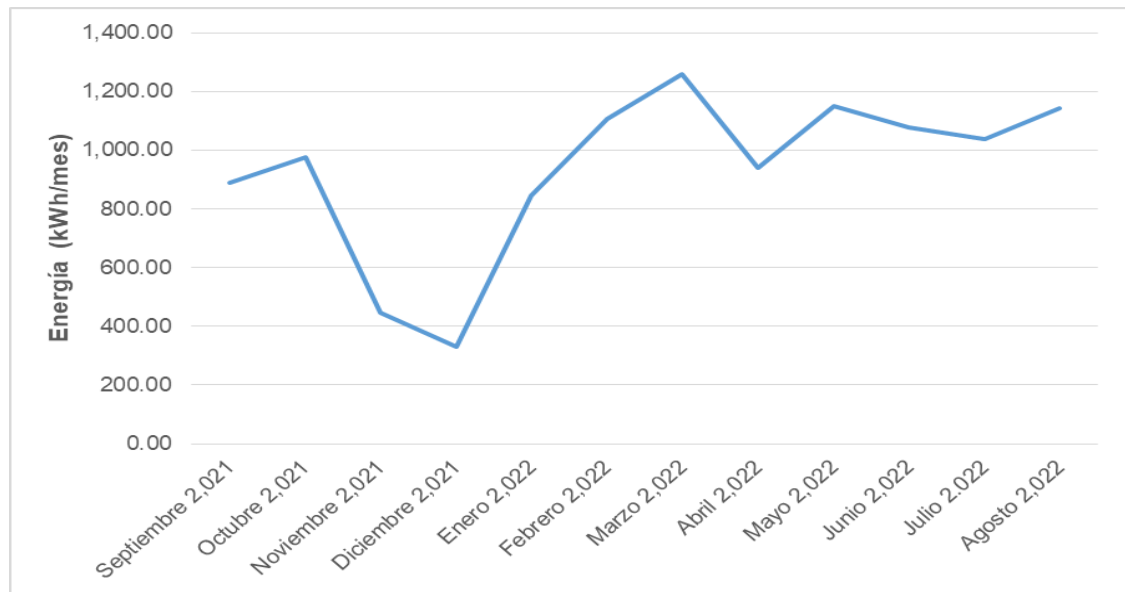
Mes y Año	Consumo de energía
Abril 2022	939 kWh/mes
Mayo 2022	1,150 kWh/mes
Junio 2022	1,077 kWh/mes
Julio 2022	1,036 kWh/mes
Agosto 2022	1,144 kWh/mes
Consumo anual total	11,198 kWh/año
Consumo diario	30.68 kWh/día

Nota. Consumo mensual de energía eléctrica del centro educativo. Elaboración propia, realizado con Excel.

De acuerdo a los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 11, el centro educativo tiene una demanda anual de energía eléctrica de 11,198 kWh y una demanda diaria de 30.68 kWh.

Figura 6.

Consumo mensual de energía eléctrica del centro educativo



Nota. Gráfico comparativo de los consumos mensuales de energía eléctrica del centro educativo. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.1.2. Determinación de hora solar pico (HSP)

Por medio de la herramienta POWER Data Access Viewer se obtuvo las mediciones de hora solar pico (HSP) para cada mes del año, estableciendo como punto de referencia las coordenadas geográficas de la institución educativa, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 12.*Determinación de HSP en la ubicación del centro educativo*

Mes	HSP (horas)
Enero	6.47
Febrero	6.34
Marzo	6.20
Abril	5.73
Mayo	5.09
Junio	5.04
Julio	5.65
Agosto	5.53
Septiembre	5.05
Octubre	4.99
Noviembre	5.83
Diciembre	6.47
Promedio	5.70

Nota. Hora Solar Pico en el área de ubicación del centro educativo. Elaboración propia, realizado con POWER Data Access Viewer.

El valor de HSP para el área donde se desarrolló el presente estudio es de 5.7 horas. El ángulo óptimo de irradiación solar para los paneles solares es de 22.8 grados con orientación hacia el sur, sin embargo, para el presente diseño se utilizará un ángulo de 25 grados ya que es el ángulo de inclinación con que cuenta la sección del techo del centro educativo.

4.1.3. Determinación del número de paneles fotovoltaicos y estructuras de soporte

De acuerdo al sondeo realizado en el mercado guatemalteco, se decidió utilizar paneles solares monocristalinos con capacidad de 460 Watts, las especificaciones técnicas se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 13.

Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico

Descripción	Valor
Potencia pico (P_{max})	460 W
Tensión a P_{max} (V_{mp})	42.87 V
Corriente a P_{max} (I_{mp})	10.73 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	49.85 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	11.61 A
Tensión máxima de sistema	1,500 V
Dimensiones	2094x1038x35/40 mm
Peso	23.60 kg

Nota. Datos técnicos del panel fotovoltaico considerado en el presente estudio. Elaboración propia, realizado con Excel.

Para determinar el número de paneles fotovoltaicos se utilizó la fórmula descrita en la sección 2.3.3, considerando un factor de rendimiento de 0.75

$$NT = \frac{30.68 \text{ kWh}}{0.46 \text{ kW} * 5.7 \text{ h} * 0.75} = 15.60 \approx 16 \text{ Paneles}$$

Para montar los 16 paneles se utilizarán estructuras de aluminio con bases fijas, esto permite reducir costos y aprovechar el ángulo de inclinación de 25

grados con que cuenta el techo de la institución educativa, se considera una separación entre paneles de 10 cm. El techo donde se montarán las estructuras de soporte está conformado por láminas galvanizadas y vigas de acero.

4.1.4. Cálculo de Inversor y conexión de los paneles fotovoltaicos

Para calcular la capacidad máxima del inversor se utilizó la fórmula de la sección 2.3.4:

$$P_{inversor} = 460\text{ W} * 16 = 7,360\text{ W}$$

De acuerdo a las cotizaciones realizadas el inversor seleccionado para el presente trabajo de investigación es marca Deye modelo SUN-10K-G, cuenta con las siguientes características técnicas:

Tabla 14.

Especificaciones técnicas del inversor

Descripción	Valor
Potencia nominal	10 kW
Potencia pico máxima	13 kW
Peso	15.7 kg
No. de MPPT	2
Rango de voltaje de MPPT	70-500 V
I _{sc} max	39 A
Dimensiones	330x410x198.5 mm
Voltaje de red	220/230 V
Frecuencia	60 Hz

Continuación de la tabla 14.

Descripción	Valor
Eficiencia	97.7 %

Nota. Datos técnicos del inversor considerado en el presente estudio. Elaboración propia, realizado con Excel.

La conexión de los paneles fotovoltaicos hacia el inversor se realizará mediante la configuración de 2 *strings* de 8 módulos cada una, utilizando las fórmulas de la sección 2.3.4 y las especificaciones técnicas del módulo se obtienen los siguientes niveles de tensión y corriente:

$$V = 42.87 V + 42.87 V + 42.87 V + 42.87 V + 42.87 V + 42.87 V + 42.87 V + 42.87 V = \mathbf{342.96 V}$$

$$I = 10.73 A + 10.73 A = \mathbf{21.46 A}$$

4.1.5. Cálculo de conductores

Se determinó la sección transversal del conductor de corriente continúa utilizando la fórmula de la tabla 2 obteniendo el siguiente resultado:

$$S = \frac{2 * 14 * 10.73}{59 * 1} = 5.09 \text{ mm}^2$$

De acuerdo a la sección transversal obtenida se requiere un conductor de calibre #10 AWG.

La sección transversal del conductor de corriente alterna se determinó utilizando la fórmula indicada en la tabla II, obteniendo el siguiente resultado:

$$S = \frac{2 * 12 * 39 * \cos(0.9)}{59 * 5} = 3.17 \text{ mm}^2$$

De acuerdo a la sección transversal obtenida se requiere un conductor de cobre calibre #12 AWG, dicho conductor es capaz de transportar 30 Amperios a 90°C. La tubería seleccionada para los conductores de corriente alterna es modelo Liquid Tight flexible de 3/4".

4.1.6. Equipo de protección para el sistema de generación fotovoltaico

La potencia pico del sistema de generación es de 7,360 W y el voltaje de la red es 240 V, por lo que se determinó la corriente del circuito utilizando las fórmulas establecidas en la tabla no. 3, obteniendo el siguiente resultado:

$$I = \frac{7360 \text{ W}}{240 \text{ V}} = 30.67 \text{ A}$$

$$I_{IT} = 30.67 \text{ A} + 0.15 \times 30.67 \text{ A}$$

$$I_{IT} = 35.27 \text{ A}$$

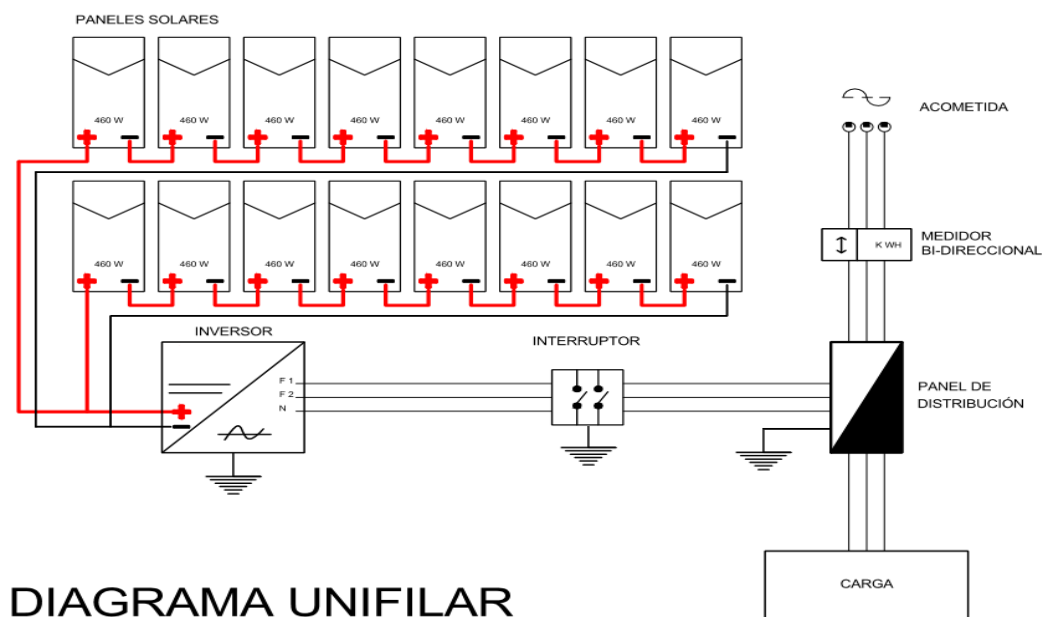
De acuerdo a la corriente obtenida anteriormente, la capacidad del interruptor termomagnético es de 40 Amperios x 2 Polos.

Para el presente diseño del sistema de generación se consideró una puesta a tierra conformada por una varilla de cobre de 5/8" x 8', 28 metros de cable THHN #10, mordaza de cobre de 5/8" y quibacsol.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar del sistema de generación fotovoltaico:

Figura 7.

Diagrama unifilar del sistema de generación



Nota. Configuración del sistema de generación fotovoltaico. Elaboración propia, realizado con AutoCAD.

4.2. Conexión a red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía

De acuerdo a la comunicación con la empresa de distribución de energía eléctrica que presta el servicio al centro educativo, se determinó que es posible conectarse a la red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía –UAEE-, ya que se utiliza como materia prima un recurso renovable y una generación menor a 5 MW.

Para registrarse como UAEE se debe llenar un formulario que proporciona la distribuidora, agregando datos generales del usuario (nombre, dirección, correo electrónico, número de identificación del usuario ante el distribuidor) e información técnica del sistema de generación (fuente de energía renovable, número de unidades generadoras, potencia instalada, equipos de protección).

Luego de presentado el formulario ante la empresa de distribución de energía eléctrica, la distribuidora tiene un plazo de 15 días para realizar la inspección técnica del sistema de generación, verificando que se cumpla con todos los requisitos técnicos para conectarse a la red de distribución.

Al obtener un resultado positivo de la inspección técnica la empresa distribuidora entregará al interesado una constancia en donde se indicaba que las instalaciones fueron revisadas y se procederá al cambio de contador unidireccional a bidireccional, sin ningún costo adicional.

4.3. Resultados de análisis económico del sistema de generación fotovoltaico

A continuación, se muestra el resumen de costos para la implementación del sistema de generación con paneles fotovoltaicos interconectado a la red:

Tabla 15.

Costos del proyecto

Descripción	Costo (Q.)
16 Paneles Fotovoltaicos de 460 W	38,400.00
Estructuras de soporte para paneles solares (Incluye tornillería, tarugos, silicón, separadores medios y finales)	5,316.00
Inversor de 10kW	16,115.00
Interruptor Termomagnético 2x40 Amperios	119.30
32 Conectores MC4 simples	800.00
2 conectores MC4 dobles	180.00
132 pies de tubo Liquid Tight flexible de 3/4"	417.12
26 metros de cable solar #10 AWG	676.00
12 metros de cable TSJ 3x12	162.00
28 metros de cable THHN calibre #10 - puesta a tierra	166.04
Varilla de cobre de 5/8" x 8'	191.61
Materiales varios (tarugos, tornillos, cinchos plásticos, quibacsol, mordaza de bronce 5/8", abrazaderas, cinta aislante)	688.80
Mano de obra	3,200.00
Costo total (Q.)	66,431.87

Nota. Costo total por implementación de proyecto del sistema de generación fotovoltaico. Elaboración propia, realizado con Excel.

En la tabla 16 se muestran los flujos de efectivo proyectados a lo largo de la vida útil de los paneles fotovoltaicos (25 años), considerando los aspectos descritos en la sección 3.12:

Tabla 16.

Flujo de efectivo

A Ñ O	Tarifa promedio Q/kWh (aumento 1 % anual)	Consumo de energía eléctrica (kWh)	Energía generada (kWh)- degradación panel	Egresos (Q)	Ingresos (Q.)	Flujo de efectivo (Q.)
0				66,431.87		-66,431.87
1	1.50	11,198.00	11,484.36	4,200.00	17,226.54	13,026.54
2	1.52	11,198.00	11,426.94	4,200.00	17,311.81	13,111.81
3	1.53	11,198.00	11,369.52	4,200.00	17,397.07	13,197.07
4	1.55	11,198.00	11,312.09	4,200.00	17,482.29	13,282.29
5	1.56	11,198.00	11,254.67	4,200.00	17,567.49	13,367.49
6	1.58	11,198.00	11,197.25	4,201.18	17,652.64	13,451.45
7	1.59	11,198.00	11,139.83	4,292.62	17,737.73	13,445.11
8	1.61	11,198.00	11,082.41	4,385.90	17,822.76	13,436.86
9	1.62	11,198.00	11,024.99	4,481.02	17,907.72	13,426.69
10	1.64	11,198.00	10,967.56	20,693.04	17,992.59	-2,700.44
11	1.66	11,198.00	10,910.14	4,676.96	18,077.38	13,400.41
12	1.67	11,198.00	10,852.72	4,777.83	18,162.05	13,384.23
13	1.69	11,198.00	10,795.30	4,880.66	18,246.62	13,365.96
14	1.71	11,198.00	10,737.88	4,985.50	18,331.06	13,345.56
15	1.72	11,198.00	10,680.45	5,092.36	18,415.36	13,323.00
16	1.74	11,198.00	10,623.03	5,201.28	18,499.52	13,298.24
17	1.76	11,198.00	10,565.61	5,312.29	18,583.52	13,271.23
18	1.78	11,198.00	10,508.19	5,425.42	18,667.34	13,241.92
19	1.79	11,198.00	10,450.77	5,540.70	18,750.99	13,210.29

Continuación de la tabla 16.

A Ñ O	Tarifa promedio Q/kWh (aumento 1 % anual)	Consumo de energía eléctrica (kWh)	Energía generada (kWh)- degradación panel	Egresos (Q)	Ingresos (Q.)	Flujo de efectivo (Q.)
20	1.81	11,198.00	10,393.35	21,773.16	18,834.44	-2,938.72
21	1.83	11,198.00	10,335.92	5,777.84	18,917.69	13,139.84
22	1.85	11,198.00	10,278.50	5,899.77	19,000.71	13,100.94
23	1.87	11,198.00	10,221.08	6,023.98	19,083.51	13,059.53
24	1.89	11,198.00	10,163.66	6,150.50	19,166.06	13,015.56
25	1.90	11,198.00	10,106.24	6,279.37	19,248.36	12,968.98

Nota. Análisis de flujo de efectivo del proyecto del sistema de generación fotovoltaico. Elaboración propia, realizado con Excel.

.

Utilizando Microsoft Excel se determinó el VPN y TIR, aplicando las fórmulas y conceptos descritos en las secciones 2.4.1 y 2.4.2 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 17.

Resultados VPN y TIR

Año	Valor presente egresos (Q.)	Valor presente ingresos (Q.)	Valor presente neto (Q.)	Valor presente actualizado (Q.)
0	66,431.87		-66,431.87	-66,431.87
1	3,818.18	15,660.49	11,842.31	-54,589.56
2	3,471.07	14,307.28	10,836.21	-43,753.35
3	3,155.52	13,070.67	9,915.15	-33,838.20
4	2,868.66	11,940.64	9,071.99	-24,766.22
5	2,607.87	10,908.03	8,300.16	-16,466.06

Continuación de la tabla 17.

Año	Valor presente egresos (Q.)	Valor presente ingresos (Q.)	Valor presente neto (Q.)	Valor presente actualizado (Q.)
6	2,371.46	9,964.45	7,593.00	-8,873.06
7	2,202.79	9,102.26	6,899.47	-1,973.60
8	2,046.05	8,314.45	6,268.40	4,294.80
9	1,900.39	7,594.62	5,694.23	9,989.03
10	7,978.06	6,936.92	-1,041.14	8,947.89
11	1,639.25	6,336.01	4,696.76	13,644.65
12	1,522.36	5,786.99	4,264.63	17,909.28
13	1,413.75	5,285.40	3,871.64	21,780.92
14	1,312.84	4,827.14	3,514.30	25,295.23
15	1,219.07	4,408.49	3,189.42	28,484.65
16	1,131.95	4,026.03	2,894.08	31,378.73
17	1,051.01	3,676.65	2,625.64	34,004.37
18	975.81	3,357.49	2,381.68	36,386.05
19	905.95	3,065.94	2,159.99	38,546.04
20	3,236.44	2,799.62	-436.82	38,109.21
21	780.76	2,556.36	1,775.59	39,884.81
22	724.76	2,334.16	1,609.40	41,494.21
23	672.75	2,131.21	1,458.46	42,952.67
24	624.43	1,945.85	1,321.41	44,274.08
25	579.56	1,776.55	1,196.99	45,471.07
VPE = 116,642.63	VPI = 162,113.70	VPN = 45,471.07	TIR = 18.72 %	

Nota. Análisis del VPN y TIR del proyecto del sistema de generación fotovoltaico. Elaboración propia, realizado con Excel.

Por lo tanto, el valor presente neto del sistema de generación fotovoltaico es de Q 45,471.07 y la tasa interna de retorno es de 18.72 %.

Utilizando los datos de la tabla 17 se determinó el beneficio costo del proyecto y el tiempo de recuperación de la inversión:

$$B/C = \frac{Q. 162,113.70}{Q. 116,642.63} = 1.39$$

$$Tiempo de recuperación = 7 - \frac{(-Q. 1,973.60)}{Q. 6,268.40} = 7.31 \text{ años}$$

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se muestra el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo número cuatro:

5.1. Determinación de la demanda de energía eléctrica del centro educativo

Para el presente estudio se seleccionaron las facturas de consumo de energía eléctrica de la institución educativa del periodo comprendido entre el mes de septiembre de dos mil veintiuno (2021) hasta el mes de agosto de dos mil veintidós (2022), debido a que fue el periodo anual que presentó el mayor consumo de los tres periodos tabulados.

De acuerdo al análisis realizado el consumo mínimo mensual fue de 329 kWh y se presentó en el mes de diciembre de 2021, debido a que durante ese mes el ciclo escolar ha concluido, únicamente se encuentra en labores el personal administrativo del centro educativo, también se realizan actividades de capacitaciones, charlas informativas y procesos de admisión, por lo que el consumo se reduce considerablemente, esto sucede principalmente en los meses de noviembre y diciembre. El consumo máximo mensual fue de 1,260 kWh el cual se presentó en el mes de marzo de 2022, esto se debe al mayor uso de equipos de ventilación debido al incremento de temperaturas en el área de Palín, Escuintla. El consumo promedio mensual es de 933.17 kWh y el consumo anual fue de 11,198 kWh, la desviación estándar de los 12 datos utilizados para el dimensionamiento del sistema de generación fue de 281.65 kWh por lo que existe alta dispersión de los datos respecto a la media aritmética.

Para el caso de las horas solares pico existen en la actualidad diversos *softwares* que permiten su cálculo, se optó por utilizar la herramienta POWER Data Access Viewer ya que fue elaborada por la NASA, siendo una agencia de gran reconocimiento a nivel mundial. La media aritmética de los datos obtenidos para la región donde se realizó el diseño del sistema de generación fue de 5.70 horas, siendo un excelente valor para el diseño de sistemas de generación con paneles fotovoltaicos.

5.2. Determinación de los componentes y diseño del sistema de generación con paneles fotovoltaicos

Se seleccionaron paneles fotovoltaicos con capacidad de 460 W, con el fin de instalar una menor cantidad de paneles fotovoltaicos, luego de realizado el cálculo se obtuvo un resultado de 16 paneles fotovoltaicos capaces de cubrir la demanda de energía eléctrica del centro educativo.

Para el presente diseño se optó por utilizar estructuras de soporte fijas, esto permite reducir el costo de inversión y aprovechar el ángulo de inclinación del techo de las instalaciones de la institución educativa, dichas estructuras son rieles de aluminio con sección transversal de 2"x1'. Se requiere un área aproximada de 39 m² para la instalación de las estructuras de soporte y los paneles fotovoltaicos, de acuerdo a las mediciones realizadas en el sitio donde se propone la instalación de los equipos anteriormente descritos, se cuenta con un área de 52.25 m², la cual se encuentra libre de sombra y con espacio suficiente para instalar dichos equipos.

Después que fue determinado el número de paneles fotovoltaicos, se procedió al cálculo del inversor, la capacidad del conjunto de módulos fotovoltaicos es de 7,360 W, se optó por utilizar un inversor de mayor capacidad

considerando un futuro incremento de la demanda del centro educativo, esto conllevaría la instalación de paneles solares adicionales.

En relación a las protecciones eléctricas del sistema de generación fotovoltaico, es importante mencionar que el inversor ya cuenta con varios tipos de protecciones eléctricas, siendo éstas: protección de polaridad inversa CC, protección de cortocircuito CA, protección contra sobre corriente de salida de CA, protección contra sobretensiones de salida, protección de resistencia de aislamiento, monitoreo de fallas a tierra, protección anti-isla, protección de temperatura, interruptor de CC, protección contra sobretensiones. Adicionalmente es posible monitorear el funcionamiento del sistema a través de conexión remota. Por lo tanto, se cuenta con las protecciones eléctricas en corriente continua y corriente alterna que solicita la empresa distribuidora que presta el servicio de energía eléctrica al centro educativo.

La instalación de sistemas de generación con paneles fotovoltaicos requiere un tiempo relativamente corto y para el caso del presente proyecto se estima un tiempo entre 2 a 3 días.

5.3. Evaluación de requisitos para conectarse a la red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía

Guatemala ya cuenta con una norma técnica que establece los lineamientos para que un usuario pueda inyectar la energía que produce su sistema de generación con recursos renovables a la red de distribución, esta lleva por nombre Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía –NTGDR-.

De acuerdo a la comunicación que se tuvo con la empresa que presta el servicio de energía eléctrica al centro educativo, se determinó que dicha empresa a pesar de contar con una red aislada, ajena al Sistema Nacional Interconectado, utiliza la NTGDR como referencia para la instalación de sistemas generación con fuentes renovables y usuarios autoprodutores con excedentes de energía. Por lo tanto, para conectarse a la red de distribución como UAEE se deben seguir los pasos descritos en la sección 4.6, siendo estos:

- Utilizar recursos renovables para la generación de energía.
- Capacidad de generación menor a 5 MW.
- Cumplir con las protecciones eléctricas indicadas en la NTGDR

En relación a lo anterior, para el presente trabajo de investigación se realizó el diseño de un sistema de generación con paneles solares cuya potencia pico es de 7.36 kW, así mismo se cumple con las debidas protecciones eléctricas en corriente continua y corriente alterna, por lo tanto, es factible técnicamente la implementación del sistema de generación fotovoltaico.

Seguidamente se debe cumplir con los requisitos legales, siendo estos:

- Completar el formulario que proporciona la distribuidora, agregando datos generales del usuario (nombre, dirección, correo electrónico, número de identificación del usuario ante el distribuidor) e información técnica del sistema de generación (fuente de energía renovable, número de unidades generadoras, potencia instalada, equipos de protección).
- Después de presentar dicho formulario ante la empresa de distribución de energía eléctrica, la distribuidora tiene un plazo de 15 días para realizar la inspección técnica del sistema de generación, verificando que se cumpla

con todos los requisitos técnicos para conectarse a la red de distribución. Al obtener un resultado positivo se procede al cambio de contador de unidireccional a bidireccional, sin ningún costo.

5.4. Determinación del tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costo del proyecto

El método de valor presente neto permitió ver el comportamiento del flujo de efectivo a lo largo de la vida útil de los paneles solares. De acuerdo a los resultados indicados en la tabla 17, el VPN para el presente proyecto es de Q 45, 471.07, por lo que el proyecto genera rentabilidad. La Tasa Interna de Retorno fue de 18.72 % siendo mayor que la tasa de oportunidad (10.00 %).

El tiempo de recuperación de la inversión es de 7.31 años, siendo un período de tiempo relativamente corto comparado a la vida útil de los paneles solares, la cual es de 25 años.

El beneficio-costo del presente proyecto es de 1.39, esto indica que por cada Quetzal invertido se genera una utilidad de treinta y nueve centavos de Quetzal, debido a que el valor obtenido de beneficio costo es mayor a 1, es recomendable realizar la inversión ya que el beneficio es mayor al costo.

Los parámetros técnicos y financieros calculados en el presente trabajo demuestran que el proyecto es factible y ofrece una rápida recuperación de la inversión, permitiendo a la institución educativa mejorar su presupuesto anual en un corto plazo y utilizar la rentabilidad obtenida en otros proyectos.

En las secciones 4.1 y 4.2 se demostró la factibilidad técnica del proyecto y se cuenta con las condiciones para conectarse a la red de distribución como

Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía, así mismo en la sección 4.3 se demostró la factibilidad económica del proyecto, por lo que podemos concluir que es factible la implementación del sistema de generación fotovoltaico en el centro educativo.

CONCLUSIONES

1. Con base a los resultados obtenidos, se determinó que la implementación del sistema de generación fotovoltaico en la institución educativa del departamento de Escuintla y conectarse a la red de distribución como UAEE es factible a nivel técnico y económico, permitiendo reducir los costos mensuales de facturación de energía eléctrica y recuperar la inversión del proyecto en poco tiempo.
2. Se determinó los diversos componentes y el diseño del sistema de generación fotovoltaico capaz de cubrir la demanda de energía eléctrica del centro educativo, el proyecto tiene un costo de Q 66,431.87, conectándose a la red de distribución como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía.
3. El proyecto cumple con los requisitos establecidos por la empresa que presta el servicio de distribución de energía eléctrica al centro educativo para conectarse como Usuario Autoprodutor con Excedentes de Energía, por lo que es posible inyectar energía a la red de distribución como UAEE.
4. Se determinó el tiempo de recuperación de la inversión, obteniendo un tiempo de retorno de 7.31 años, por lo que es una inversión con recuperación de capital a corto plazo considerando la vida útil de 25 años de los paneles solares; el beneficio costo del proyecto es de 1.39, por lo tanto, los ingresos superan a los egresos.

RECOMENDACIONES

1. Considerar la administración del centro educativo realizar la inversión para la implementación de dicho sistema de generación con paneles fotovoltaicos en sus instalaciones, derivado que técnicamente es factible la implementación del proyecto y el tiempo de recuperación de la inversión se da en un corto plazo, respecto a la vida útil de los paneles solares.
2. Tomar en consideración para el dimensionamiento y diseño óptimo de un sistema de generación con paneles solares, la demanda de energía de las instalaciones, la ubicación geográfica donde se desea implementar el proyecto, las horas solar pico, potencia y configuración de los paneles fotovoltaicos, estructuras de soporte, la eficiencia de los componentes del sistema de generación, orientación de los paneles, sombreado, equipos de protección, marco regulatorio y estructuras tarifarias.
3. Considerar la Comisión Nacional de Energía Eléctrica la implementación en normativa la remuneración de excedentes de energía para Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía, de esta manera incentivar proyectos de generación cuya medición neta de energía corresponda a inyectar energía a la red de distribución.
4. Analizar la implementación del sistema de generación fotovoltaico en el centro educativo mediante financiamiento con alguna cooperativa o banco del sistema, ya que en el presente trabajo se planteó la implementación del proyecto con recursos del centro educativo,

obteniendo un beneficio costo aceptable y un tiempo de recuperación a corto plazo.

REFERENCIAS

- Álvarez, F. (2017). *Técnicas para evaluar financieramente proyectos de inversión*. Universidad ICESI.
https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/83189/1/alvarez_tecnicas_evaluar_2017..pdf
- Bratu, N., & Campero, E. (1995). *Instalaciones eléctricas conceptos básicos y diseño*. Alfaomega.
- Cantos, J. (2016). *Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas*. Paraninfo.
<https://books.google.com.co/books?id=EHDICwAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). *Preguntas frecuentes sobre usuario autoprodutor con excedentes de energía -UAEE-*.
<https://www.cnee.gob.gt/pdf/normas/docs/GDR/FAQ-UAEE.pdf>
- De León, V. (2008). *Generación eléctrica fotovoltaica en la facultad de ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala y estudio del aprovechamiento*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/7779/1/V%C3%ADctor%20Herbert%20De%20Le%C3%B3n%20Morales.pdf>
- Espitia, C. (2017). *Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia*. [Tesis de maestría,

Universidad de Santander de Guatemala]. Archivo digital
<https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/0cb7ae08-d49d-4b94-b9f2-9a8fbb548582/content>

Frías, T. (2012). *Colector térmico fotovoltaico interconectado a la red*. [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados de México]. Archivo digital
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/447/1/Tesis%20Teresa%20Yadira%20Fr%C3%ADas%20Mart%C3%ADnez.pdf>

Gastélum, F. (2015). *Diseño, instalación y análisis energético del sistema fotovoltaico del prototipo de vivienda sustentable casa UNAM*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Archivo digital.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8111/Tesis%20de%20maestr%C3%ADa%20-%20Filiberto%20Gast%C3%A9lum%20Michel.pdf?sequence=1>

Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable. Decreto 52-2003. (10 de noviembre de 2003). Congreso de la República. Diario de Centroamérica. Guatemala. <https://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LeydeIncentivosEnerg%C3%ADaRenovable2014.pdf>

Martínez, B. (2016). *Suministro de energía eléctrica con paneles solares individuales a la aldea Searranx, Livingston, Izabal*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/5816/1/Benedicto%20Estuardo%20Mart%C3%ADnez%20Guerra.pdf>

Ministerio de Energía y Minas (2016). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*.
<http://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/10/15.-Plan-Nacional-de-Energia-2018-2032.pdf>

Ministerio de Energía y Minas (2018). *Política energética 2019-2050*.
<https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Pol%C3%ADtica-Energ%C3%A9tica-2019-2050.pdf>

Ministerio de Energía y Minas (2021). *Informe general 2020*.
<https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Informe-MEM-2020.pdf>

Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía. Resolución CNEE-227-2014. (25 de agosto de 2014). Diario de Centroamérica No.34. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Guatemala.
<https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/08%20NTGDR.pdf>

Pérez, J. (2014). *Análisis de viabilidad financiera de inversión en energía de fuente solar fotovoltaica en el departamento de Jutiapa de la República de Guatemala*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03_4917.pdf

Ramírez, J. (2018). *Evaluación técnica-económica de los efectos de la introducción de energías renovables no convencionales al sistema nacional interconectado de Guatemala*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/9192/1/Josu%C3%A9%20Miguel%20Ram%C3%ADrez%20Lemus.pdf>

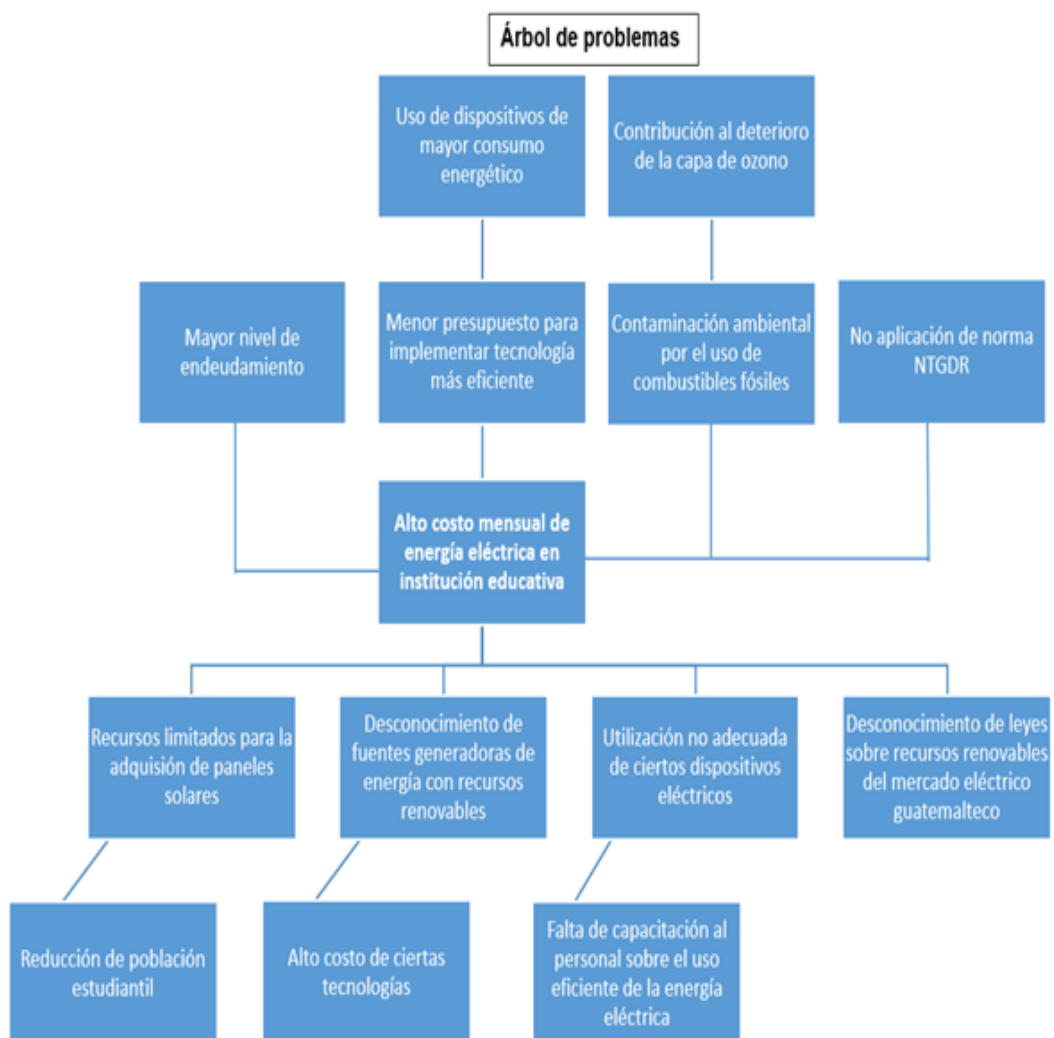
Ramos, H., y Luna, R. (2014). *Diseño de un sistema fotovoltaico integrado a la red para el área de estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca*. [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Salamanca de México]. Archivo digital.
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/521/1/Tesis%20Rafael%20Luna%20Puente%2C%20Humberto%20Ramos%20L%C3%B3pez.pdf>

Zeceña, D. (2018). *Impacto de la generación distribuida renovable en el circuito de media tensión de 13.8 kV La Tinta, en el departamento de Alta Verapaz*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/12205/1/Douglas%20Eduardo%20Zece%C3%B1a%20Aguirre.pdf>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas del presente estudio. Elaboración propia.

Apéndice 2.

Matriz de coherencia

Matriz de coherencia					
Título de la investigación	Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Metodología	Resultados esperados
Diseño de un sistema de generación fotovoltaico en centro educativo de Escuintla y aplicación como usuario autoprodutor con excedentes de energía.	Alto costo mensual de energía eléctrica en institución educativa de Escuintla, Guatemala.	Principal: ¿Cuál es la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación fotovoltaico en institución educativa de Escuintla y conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía para reducir el costo mensual de la factura de energía eléctrica?	General: Establecer la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación fotovoltaico en institución educativa de Escuintla y conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía para reducir el costo mensual de la factura de energía eléctrica.	1) Revisión documental 2) Dimensionamiento y diseño del sistema de generación. 3) Requisitos y procedimiento para conectarse a la red de distribución como usuario autoprodutor con excedentes de energía. 4) Análisis económico.	1) Dimensionamiento de los componentes de un sistema de generación fotovoltaico, resumiéndolos en una tabla y realización del diagrama unifilar que muestre el diseño y orden de conexión de los diversos componentes. 2) Establecimiento de los requisitos y proceso a realizar para la inscripción del sistema de generación como usuario autoprodutor con excedentes de energía y poder inyectar energía a la red de distribución.

Continuación del apéndice 2.

Título de la investigación	Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Metodología	Resultados esperados
		Específicos: - ¿Qué dimensionamiento y diseño debe tener un sistema de generación fotovoltaico? - ¿Cuáles son los requisitos y el procedimiento para conectarse a la red de distribución como usuario autoproducer con excedentes de energía? - ¿Cuál es el tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costo del proyecto?	Específicos: - Establecer el dimensionamiento y diseño de un sistema de generación fotovoltaico. - Evaluar si se cumple con los requisitos para conectarse a la red de distribución como usuario autoproducer con excedentes de energía. - Determinar el tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costo del proyecto.		3) Cálculo del tiempo de recuperación de la inversión a través de los métodos de evaluación económica del VPN y TIR, estableciendo el beneficio-costo del proyecto.

Nota. Matriz de coherencia del presente estudio. Elaboración propia.

Apéndice 3.

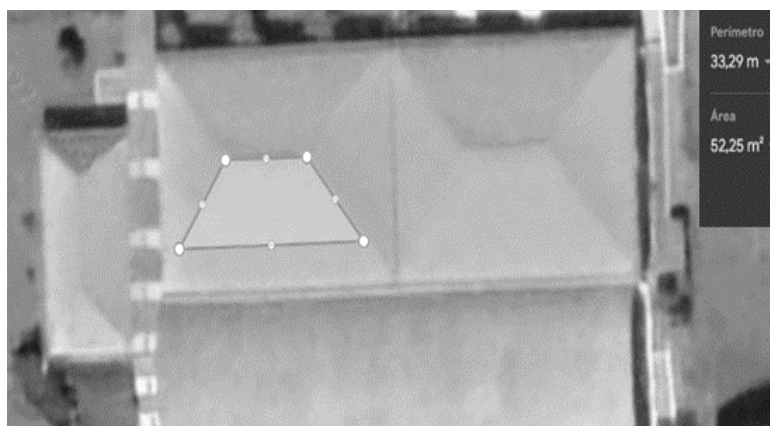
Contador



Nota. Contador de energía eléctrica del centro educativo. Elaboración propia.

Apéndice 4.

Área de instalación de paneles fotovoltaicos



Nota. Área para instalación de paneles fotovoltaicos en el centro educativo. Elaboración propia.

Apéndice 5.

Consumo de energía eléctrica del centro educativo

Período	Consumo de energía (kWh)	Costo de energía (Q/kWh)
Enero 2020	756	1.40
Febrero 2020	1484	1.40
Marzo 2020	671	1.40
Abril 2020	463	1.41
Mayo 2020	521	1.40
Junio 2020	418	1.40
Julio 2020	238	1.41
Agosto 2020	451	1.41
Septiembre 2020	282	1.42
Octubre 2020	393	1.42
Noviembre 2020	395	1.42
Diciembre 2020	322	1.42
Enero 2021	552	1.42
Febrero 2021	1293	1.41
Marzo 2021	1118	1.41
Abril 2021	927	1.41
Mayo 2021	1205	1.41
Junio 2021	924	1.41
Julio 2021	801	1.41
Agosto 2021	1120	1.41
Septiembre 2021	888	1.41
Octubre 2021	977	1.41
Noviembre 2021	447	1.48
Diciembre 2021	329	1.48
Enero 2022	845	1.47
Febrero 2022	1106	1.48
Marzo 2022	1260	1.47

Continuación del apéndice 5.

Período	Consumo de energía (kWh)	Costo de energía (Q/kWh)
Abril 2022	939	1.47
Mayo 2022	1150	1.47
Junio 2022	1077	1.48
Julio 2022	1036	1.69
Agosto 2022	1144	1.69

Nota. Consumo mensual de energía eléctrica del centro educativo desde el año 2020 al 2022.
Elaboración propia, realizado con Excel.