



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO GDR EN EL ESTADIO REVOLUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SAN
CARLOS DE GUATEMALA**

Kevin Alexander García Hernández

Asesorado por la M.A. Ing. José Miguel Cardona de La Rosa

Guatemala, marzo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO GDR EN EL ESTADIO REVOLUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SAN
CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KEVIN ALEXANDER GARCÍA HERNÁNDEZ

ASESORADO POR EL M.A. ING. JOSÉ MIGUEL CARDONA DE LA ROSA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Sitaví Cos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Snell Chicol Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO GDR EN EL ESTADIO REVOLUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SAN
CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 16 de noviembre de 2022.

Kevin Alexander García Hernández



EEPFI-PP-2097-2022

Guatemala, 16 de noviembre de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO GDR EN EL ESTADIO REVOLUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos**, presentado por el estudiante **Kevin Alexander García Hernández** carné número **201504189**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

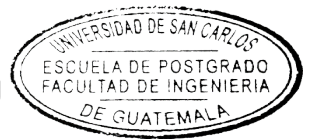
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

José Miguel Cardona de La Rosa
Ingeniero Electrónico
Colegiado No. 16,754

Mtro. José Miguel Cardona De La Rosa
Asesor(a)

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



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





EEP-EIME-1718-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO GDR EN EL ESTADIO REVOLUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Kevin Alexander García Hernández**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, noviembre de 2022



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

LNG.DECANATO.OI.305.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO GDR EN EL ESTADO REVOLUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por **Kevin Alexander García Hernández**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, marzo de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Sebastián García y Marta Hernández, por su amor, enseñanza, esfuerzo, apoyo y dedicación a lo largo de mi vida, porque a ellos debo quien soy y este enorme logro.

Mi hermano

Josué García, por su amor, apoyo incondicional y compañía durante toda mi vida.

Mis abuelos

Santos García, Catalina Talo (q.e.p.d), Simón Hernández (q.e.p.d), y Natividad Gómez, por su amor, enseñanzas y consejos.

Amigos

Luís Solís, Esaú Tal, Vinicio Fuentes, Daniel Vicente, Pamela Sikahall, Valeska Ortiz, por su genuina amistad, tiempo y apoyo incondicional, en las buenas y en las malas, por no dejarme caer y siempre sostenerme.

Familia

Por su apoyo y enseñanza durante toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el <i>alma mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por haberme permitido y brindado la oportunidad de graduarme bajo su programa de estudios y culminar mi carrera.
Mis amigos de la Facultad	Por haberme acompañado durante la carrera, por su amistad y haber hecho alegre y bonita esta etapa.
Familia y amigos en general	Por su tiempo y apoyo, por estar presentes y darme ánimos y palabras de aliento en los tiempos difíciles, sin ellos esto no habría podido ser posible.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS.....	13
5.1 General.....	13
5.2 Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Auditoría Energética.	17
7.1.1. Demanda energética.....	17
7.1.2. Consumo energético.	18
7.1.3. Calidad de la energía.	18
7.1.4. Cómo se realiza una auditoría energética.	18

7.2.	Fuentes de energía en Guatemala	19
7.2.1.	Fuentes de energía renovable	19
7.2.1.1.	Energía hidráulica.....	19
7.2.1.2.	Energía eólica.....	20
7.2.1.3.	Energía biomásica.	20
7.2.1.4.	Energía geotérmica.	20
7.2.1.5.	Energía solar	21
7.2.1.5.1.	Radiación solar.	21
7.2.1.5.2.	Hora solar pico (HSP) o insolación.....	21
7.3.	Sistema de generación fotovoltaica.....	23
7.3.1.	Efecto fotoeléctrico.	23
7.3.2.	Sistema de generación fotovoltaico conectado a la red.....	24
7.3.2.1.	Componentes de un generador fotovoltaico conectado a la red.	25
7.3.2.2.	Panel solar.....	25
7.3.2.2.1.	Curvas V-P y V-I de los paneles fotovoltaicos. ..	26
7.3.2.2.2.	Construcción física de módulos fotovoltaicos. .	27
7.3.2.2.3.	Tipos de módulos solares.	28
7.3.2.2.4.	Conexión de paneles solares.	29
7.3.2.2.5.	Eficiencia del panel solar.....	31

	7.3.2.2.6.	Inclinación y orientación de la instalación fotovoltaica.	31
	7.3.2.2.7.	Distancias mínimas entre módulos solares. .	32
7.3.2.3.	Inversor		33
	7.3.2.3.1.	Seguidor del punto de potencia máxima (MPPT).....	35
	7.3.2.3.2.	Algoritmo P&O o perturbación y observación.....	36
	7.3.2.3.3.	Algoritmo de conductancia incremental.....	37
	7.3.2.3.4.	Parámetros técnicos de un inversor.	38
7.3.2.4.	Medidores.		39
7.3.2.5.	Protecciones eléctricas.		39
	7.3.2.5.1.	Fusibles.....	40
	7.3.2.5.2.	Interruptores termomagnéticos.....	41
	7.3.2.5.3.	Interruptor diferencial. ..	42
	7.3.2.5.4.	Supresores de tensión o transitorios.....	43
	7.3.2.5.5.	Caja de concentración o combinadora.	44
7.3.2.6.	Estructuras y accesorios.		46

	7.3.2.6.1.	Instalaciones en el suelo.	46
	7.3.2.6.2.	Instalaciones en postes o torres.	47
	7.3.2.6.3.	Instalaciones en paredes.....	47
	7.3.2.6.4.	Instalaciones en techos.....	47
	7.3.2.6.5.	Fuerzas que actúan sobre los paneles fotovoltaicos.....	48
	7.3.2.6.6.	Velocidad del viento en Guatemala.	49
7.3.3.		Dimensionamiento de cableado.....	50
	7.3.3.1.	Requerimientos técnicos de cableado de una instalación fotovoltaica.	51
	7.3.3.2.	Factores de corrección.	51
	7.3.3.3.	Dimensionamiento de cableado según su ampacidad.	53
	7.3.3.4.	Dimensionamiento de cableado por caída de tensión.	54
	7.3.3.5.	Dimensionamiento de tuberías para cableado.	55
7.3.4.		Pararrayos.....	56
7.3.5.		Sistema de tierra física.	60
7.4.		Normas y reglamentos para GDR´S.....	61
	7.4.1.	Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía.	61

7.4.1.1.	Disposiciones generales.	61
7.4.1.1.1.	Acrónimos, siglas y definiciones.	62
7.4.1.1.2.	Ámbito de aplicación. ...	62
7.4.1.2.	Autorización y conexión.	62
7.4.1.2.1.	Del dictamen de capacidad y conexión...	63
7.4.1.2.2.	Equipo eléctrico necesario para la conexión.....	64
7.4.1.2.3.	Conexión.....	65
7.4.1.3.	Operación y control.	66
7.4.1.3.1.	Generalidades.....	66
7.4.1.3.2.	Desconexiones.....	66
7.4.1.3.3.	Mantenimiento e inspecciones.	67
7.4.1.4.	Comercialización.....	67
7.4.1.4.1.	Generalidades.....	67
7.4.1.4.2.	Contratos.	68
7.4.1.4.3.	Peajes.....	68
7.4.2.	Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable.	68
7.5.	Análisis económico	69
7.5.1.	Valor presente neto.....	69
7.5.2.	Tasa Interna de retorno.....	70
7.5.3.	Costo nivelado de energía (LCOE)	70
7.6.	Beneficios	71
7.6.1.	Beneficios ambientales (CO ₂)	71
7.6.2.	Beneficios económicos	72

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	73
9.	METODOLOGÍA	79
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	89
11.	CRONOGRAMA	91
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	93
13.	REFERENCIAS	95
14.	APÉNDICES	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Insolación promedio para la ciudad de guatemala.....	22
2.	Conexión de equipos en un sistema de paneles solares conectado a la red.....	24
3.	Circuito equivalente de celdas solares	25
4.	Construcción de módulos solares.....	27
5.	Tipos de módulos solares.....	29
6.	Conexión paralelo y serie entre paneles solares	30
7.	Placa técnica de un módulo solar	30
8.	Inclinación y orientación de la instalación	32
9.	Distancias mínimas entre módulos solares	33
10.	Algoritmo de perturbación y observación.....	37
11.	Tipo de supresores por el equipo a proteger	44
12.	Ejemplo de conexión en una caja de concentración.	45
13.	Fuerzas que actúan sobre los paneles fotovoltaicos debido al viento.....	48
14.	Velocidad del viento en territorio guatemalteco	50
15.	Cronograma de actividades.....	91

TABLAS

I.	Tabla de coeficientes de corrección de temperatura ambiente	52
II.	Factor de corrección por disipación de calor	52
III.	Coeficiente de corrección por la cantidad de conductores.....	52
IV.	Tabla de conductores y su ampacidad	53

V.	Factor de relleno y arreglo para dimensionamiento de tuberías.....	56
VI.	Valores de coeficiente ambiental	58
VII.	Tabla de coeficientes para el sistema de protección contra rayos.	59
VIII.	Valores de resistencia según la instalación.....	60
IX.	Tabla de especificación de los requerimientos de conexión.....	64
X.	Tabla de recursos del estudio de investigación.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
A	Amperios
I	Corriente eléctrica
CO ₂	Dióxido de Carbono
\$	Dólar estadounidense
E	Energía
°	Grados
°C	Grados Celsius
Hz	Hercio
h	Horas
=	Igual que
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
<i>kWh/m²/día</i>	Kilovatio hora por metro cuadrado al día
kV	Kilovoltio
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
MWh/año	Megavatio hora por año
m	Metro
<i>m²</i>	Metro cuadrado
<i>m/s</i>	Metros por segundo
mm	Milímetro
%	Porcentaje

P	Potencia
Q	Quetzales
W	Vatio
V	Voltaje o voltios

GLOSARIO

AC	Corriente Alterna.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Autoproduктор	Es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de una central de generación de energía eléctrica, cuya producción destina exclusivamente a su propio consumo.
AWG	American Wire Gauge (Calibre de Alambre Estadounidense).
CC o DC	Corriente Directa.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Corriente	Flujo de electrones.
DGE	Dirección General de Energía.
Energía	Capacidad de realizar un trabajo.
Energía cinética	Energía debida a un movimiento determinado.
GDR	Generador Distribuido Renovable.

GEI	Gases de Efecto Invernadero. Son aquellos gases que se acumulan en la atmósfera de la Tierra y que absorben la energía del sol, que crea el denominado efecto invernadero.
Gran Usuario	Es un consumidor de energía cuya demanda de potencia excede cien kilovatios.
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Nacional).
IVA	Impuesto al Valor Agregado.
LCOE	Levelized Cost Of Energy (Costo Nivelado de Energía).
Matriz Energética	Es la distribución donde se analiza la procedencia, la importancia y el uso de las diferentes fuentes energéticas de un país o región.
MPP	Maximum Power Point (Punto de Potencia Máxima).
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Seguidor del Punto de Potencia Máxima).
NEC	National Electrical Code.
NOM	Norma Oficial Mexicana.

NTDOLD	Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución.
NTGDR	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía.
NTSD	Normas Técnicas del Servicio de Distribución.
Potencia	Cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento por unidad de tiempo.
Spot	Costo del MWh en Guatemala.
TIR	Tasa Interna de Retorno.
UAEE	Usuario autoprodutor con excedente de energía. Es un usuario de distribución que inyecta energía eléctrica al dicho sistema producida por generación con fuentes de energía renovable, ubicada dentro de sus instalaciones de consumo, y que no recibe remuneración por dichos excedentes.
Voltaje	Trabajo por unidad de carga ejercido por un campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla de un punto A a un punto B.
VPN	Valor Presente Neto.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca desarrollar el diseño técnico y estudio de viabilidad económica de un sistema generador distribuido renovable fotovoltaico (GDR), como una propuesta alterna de la generación de energía eléctrica que satisfaga el consumo del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a la vez que sea capaz de inyectar la energía excedente a la red de distribución para su venta, minimizando el impacto ambiental.

Para ello se hará uso del historial de consumo energético para un periodo de funcionamiento prepandemia o normal de las instalaciones para caracterizar el consumo de las instalaciones y así determinar la energía mínima que la instalación fotovoltaica debe generar para satisfacer dicha demanda; de forma paralela, se harán propuestas para la mejora de la eficiencia energética de los sistemas actuales que componen las instalaciones para disminuir dicho consumo energético. Con ello se realizará un análisis y de diseño técnico y financiero, evaluando y manipulando las variables técnicas a través de ecuaciones para establecer los parámetros y dimensionamiento de todos los equipos que componen la instalación fotovoltaica y de esta manera concluir con la viabilidad de este.

También se buscará una estimación de la cantidad equivalente de dióxido de carbono no liberados a la atmósfera a través de factores y ecuaciones matemáticas para cuantificar los beneficios ambientales por la implementación del proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

Un alto costo en las facturas de energía eléctrica dentro del estadio Revolución a pesar de su operación como 'gran usuario' es derivado principalmente a su consumo energético, el cual consiste mayormente en el uso de luminarias y sistemas dedicados a su mantenimiento. La eficiencia de los equipos que componen estos sistemas dentro del estadio tiene consecuencias más allá de los altos costos económicos, en vista de que derivan a su vez a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero lo que genera impactos negativos al ambiente, así como de salud por el uso excesivo de energía basada en combustibles fósiles.

Dado a la importancia que tiene la búsqueda de alternativas para satisfacer la demanda energética del estadio y la disminución del costo de las facturas eléctricas, el presente estudio busca realizar un estudio técnico y económico de un sistema fotovoltaico generador distribuidor renovable (GDR), que sea capaz, no solo de la generación de energía eléctrica necesaria dentro del estadio, sino también de la inyección y venta de energía eléctrica hacia la red de distribución.

Por lo anterior, se busca obtener las características técnicas del sistema fotovoltaico, la especificación de todos los componentes del sistema, la viabilidad de su implementación, así como los beneficios económicos y la cantidad de toneladas de dióxido de carbono no emitidos a la atmosfera, para lo que se implementará una metodología basada en tres fases; la primera, es una exploración bibliográfica que busca comprender los fundamentos teóricos y determinar las variables a considerar para el estudio técnico y económico; la

segunda, se basa en la recolección de datos necesarios para conocer la naturaleza y características del consumo dentro de las instalaciones, para ello se propone obtener las facturas mensuales de energía eléctrica y planos de las instalaciones.

En el capítulo uno se hará una revisión bibliográfica sobre los fundamentos teóricos que rigen el diseño técnico del sistema, cómo realizar el estudio de viabilidad económica y la posterior cuantificación de los beneficios de su implementación. En el capítulo dos se desarrollará y describirá la metodología a implementar para el alcance de los objetivos planteados.

Dentro del capítulo tres se desarrollará la muestra de cálculo de las variables de interés para establecer las especificaciones técnicas del sistema y del estudio ambiental y económico. En el capítulo cuatro se presentarán los resultados obtenidos dentro del capítulo tres, así como su interpretación y discusión.

2. ANTECEDENTES

Para el desarrollo del análisis de viabilidad de un sistema fotovoltaico GDR para el estadio revolución de la universidad de San Carlos de Guatemala, se plantean los siguientes antecedentes:

Según Alvarado (2017) en su tesis *diseño preliminar de los sistemas de generación fotovoltaica y su protección eléctrica para los edificios de la escuela de ciencias de la comunicación de la Universidad de San Carlos de Guatemala*, se analizó el diseño y dimensionamiento para un sistema fotovoltaico operando de dos formas distintas; el primero, operando como un generador auto productor para la disminución de costos de consumo como también la inyección de energía a la red de distribución; y el segundo como un generador distribuidor renovable (GDR), con el objetivo de vender energía eléctrica. Así mismo, se analizó la factibilidad y la rentabilidad del proyecto, para ello se estimó un ingreso anual de 130.000 quetzales. Se estimó un periodo de 8 años para el retorno completo de la inversión y un valor del 11 % para el parámetro TIR, concluyendo que el proyecto es rentable (Alvarado, 2017).

Según Díaz (2017) en su tesis *Diseño preliminar de un sistema de generación fotovoltaico y sistema de protección eléctrica, para la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala*, se propuso un diseño de una red fotovoltaica para suministrar la energía demandada por varios edificios pertenecientes a la USAC, realizando el dimensionamiento de la red y su análisis financiero; así como, determinando las cantidad de emisiones evitadas de dióxido de carbono por la búsqueda de otra alternativa de generación a la de combustible fósiles, mediante el factor de emisión de CO₂, determinándose

que se evitarían 273.63 toneladas de CO₂ por año con la cantidad de paneles solares para cubrir únicamente la demanda de los edificios y de 304.68 toneladas de CO₂ cubriendo completamente las terrazas de dichos edificios. Se concluyó que la demanda eléctrica de los edificios T-11 T-12 y T-13 son cubiertas por el proyecto, pagando únicamente el derecho de utilización de las instalaciones de la red de distribución eléctrica (Díaz, 2017).

Dentro del artículo *Solar PV system design for a sports stadium* se realizó el diseño y análisis de un sistema de paneles fotovoltaicos para un estadio en la universidad de Sultan Qaboos en Uman para reducir el consumo de electricidad basada en combustibles fósiles. Dicho diseño se basó en la energía total consumida en un año, así como también, la variación de generación por parte del sistema fotovoltaico debido al aumento de temperatura. Este diseño mostró que dicho sistema no solo puede satisfacer una demanda de 61.3 MWh/año por parte de la carga, sino que es capaz de vender 43.3 MWh/año para producir un ingreso financiero extra. Se concluyó que el sistema puede operar dentro de un rango de temperatura de 14 °C a 46.32 °C (Ahshan et al., 2019).

En el artículo *Design and simulation of a solar photovoltaic system for a sports stadium* se realizó el diseño técnico y análisis económico de un sistema de módulos solares en el King Abdullah Sport City Stadium para suministrar una demanda que asciende a 111,000 kWh por día utilizando tomando datos del recurso solar proporcionados por la NASA y el simulador System Advisor Model (SAM), para el análisis económico dentro de un periodo de 25 años para determinar su rentabilidad y flujos de costo anual. Determinando de esta forma un diseño con 53,374 módulos solares de 250 W distribuidos en un área de 87,000 m²; concluyendo así que el proyecto es rentable obteniendo una retribución económica en 16 años (Maghfuri & Chiasson, 2020).

Según Boror (2021) en su tesis *Estudio de eficiencia energética y calidad de energía del edificio, Flor del Café, zona 1, Ciudad de Guatemala*, se diseñó un sistema fotovoltaico para el edificio Flor de café ubicado en la zona 1 capitalina de Guatemala, en él se realizó una auditoría energética para los años 2016, 2017 y 2018 a través de facturas de consumo, así como la proyección del consumo energético para los años 2016-2027. Se realizó un inventario de los equipos utilizados para evaluar la eficiencia del sistema; concluyéndose de esta forma que el sistema eléctrico presenta deficiencias determinándose así los puntos de mejora en la instalación (Boror, 2021).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un alto consumo energético de los servicios que son utilizados dentro del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala deriva un alto precio de las facturas de energía eléctrica que la universidad paga a pesar de operar como 'gran usuario' dentro del estadio, lo que presenta un problema económico importante. Este alto consumo como en cualquier instalación pueden deberse a distintas causas, como la eficiencia de los equipos de iluminación y servicios de mantenimiento, cultura energética, morfología estructural, entre otros, a partir de este se derivan impactos negativos económicos, ambientales y de salud para las personas y los trabajadores que se encuentran dentro de las instalaciones día con día, tal como lo indica De León (2021) donde se estimó que el estadio Revolución puede llegar a consumir un total de 384 kWh y 240 kWh por motivos de iluminación y otras actividades en un día común.

Las causas de un alto consumo energético tienen su origen por el estado actual de las instalaciones, y pueden ser muchos, pero a grandes rasgos, las principales causas tienen su origen por la ineficiencia en sistemas como: Sistema de iluminación, sistema de riego de la cancha, equipo de bombeo para llenado y vaciado de la piscina olímpica, debido a que esto determina el aprovechamiento del recurso eléctrico para desempeñar cada una de las tareas a las cuales están destinados.

Las luminarias forman una parte importante dentro del consumo energético del estadio revolución, puesto que estas son utilizadas por las noches para la iluminación de toda la instalación deportiva, la cancha de juego, vestidores, domo polideportivo, graderío, entre otros.

Derivado de la ineficiencia del sistema de riego utilizado para el mantenimiento adecuado de la cancha también se presenta un alto consumo energético, de esta forma se hace necesario evaluarlo, ya que es utilizado de forma periódica; esto estaría determinado por todos los equipos que forman parte de esta tarea, pequeñas bombas de agua, aspersores, entre otros. De forma similar se podría hacer énfasis para el sistema de llenado y vaciado de la piscina olímpica, porque se utiliza de forma periódica dentro de las instalaciones deportivas.

Un consumo alto de energía también puede deberse a la morfología estructural del estadio, como en cualquier instalación, puede darse la reducción del consumo de energía al realizar cambios estructurales.

Así mismo, como bien se ha mencionado, un alto consumo energético deriva efectos ambientales negativos dado al consumo de energía eléctrica a partir de fuentes de combustibles fósiles para lograr satisfacer la demanda de las instalaciones, los cuales emiten y liberan gases de efecto invernadero; como resultado de la liberación de estos gases a la atmosfera se pueden enumerar algunos de sus efectos: Destrucción de los ecosistemas, derretimiento de glaciares, el calentamiento global, contaminación de los recursos necesarios para la vida como lo son el aire, agua, entre otros; como resultado de la contaminación de estos recursos se tienen impactos negativos en la salud de las personas y animales.

Una reducción del consumo de energía en el estadio revolución es indispensable si se requiere implementar un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico, para disminuir el consumo propio y contar con un porcentaje de energía mayor para su venta que haga que el proyecto sea rentable y viable.

Actualmente existen distintos tipos de tecnología para la generación de energía eléctrica a través de recursos renovables como el agua, el aire y la radiación solar de una forma rentable; derivado de esto, cada vez se están desarrollando más proyectos a nivel residencial, industrial y de potencia.

Por lo anterior se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- Pregunta principal

¿Cómo evaluar la viabilidad de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico dentro del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala?

- Preguntas auxiliares:
 - ¿Cómo caracterizar el consumo energético de los sistemas del estadio revolución?
 - ¿Qué variables técnicas se deben considerar para el diseño de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico del estadio?
 - ¿Cuál es la viabilidad económica de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico del estadio?
 - ¿Qué beneficios ambientales se tendrían al implementar el sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico?

4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en el área energética, específicamente en la gestión y uso eficiente de la energía en la línea de investigación de aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos de la maestría en energía y ambiente.

La presente investigación tiene como objetivo tener una incursión en el estudio, diseño y análisis de la implementación de generadores distribuidores renovables fotovoltaicos en instalaciones deportivas, dado que dentro de Guatemala no se cuentan con estudios similares que sean de acceso público; así como también, específicamente buscar evaluar la factibilidad técnica y viabilidad económica para la implementación de un Sistema Generador Distribuidor Renovable en el estadio revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala; aportando una alternativa para la generación y suministro de energía necesaria dentro del estadio Revolución y una disminución del impacto ambiental por el uso de energía de fuentes emisoras de gases de efecto invernadero.

Los estudios de factibilidad técnica y viabilidad económica proporcionarán productos de un alto valor que ayudarán al estudio y aplicación de proyectos solares (GDR's); como lo es una guía detallada de diseño para la implementación de una instalación que cumpla con las normas dictadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), para un generador distribuidor renovable fotovoltaico, el análisis y proyección económica del proyecto que brinde una perspectiva muy clara de la viabilidad de la implementación del proyecto; así como, la estimación de la cantidad de dióxido de carbono no generado y liberado

a la atmósfera por la no utilización de energía eléctrica basada en combustibles fósiles.

El alcance técnico de esta investigación busca suministrar y satisfacer la demanda de energía eléctrica de las instalaciones del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos, así como la venta de energía, que contribuiría a las finanzas de dicha casa de estudios.

La presente investigación beneficiará a la población deportiva estudiantil universitaria y administrativa de la Universidad San Carlos de Guatemala.

La relevancia de este estudio se debe a la inminente búsqueda de alternativas de generación en el país, no solo para la diversificación de nuestra matriz energética, sino para la disminución del impacto ambiental generados por el uso de combustibles fósiles. Es por lo que cada vez se pueden observar instalaciones fotovoltaicas en diferentes sectores, como lo son en la industria, centros comerciales, negocios, casas, condominios que contribuyan a mejorar la eficiencia energética en cada uno de ellos.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Evaluar la viabilidad de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico dentro del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

5.2. Específicos

- Caracterizar el consumo energético de los sistemas actuales utilizados dentro del estadio Revolución a través de sus facturas de energía eléctrica.
- Analizar las variables técnicas para el diseño de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico para el estadio Revolución.
- Determinar la viabilidad económica de un sistema distribuidor generador renovable fotovoltaico para el estadio Revolución.
- Estimar la cantidad de dióxido de carbono equivalentes evitadas a la atmósfera a partir de la implementación del sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

A partir del presente estudio se evaluará la viabilidad tecno-económica de un diseño de generador distribuidor renovable fotovoltaico en el estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala, mediante el cual se busca concluir que el diseño de un sistema fotovoltaico (GDR), se justifica técnica y financieramente para su implementación dentro de un estadio deportivo como solución por el alto costo de las facturas de energía eléctrica a través de la implementación de otra alternativa de generación para satisfacer la demanda energética y la venta de energía eléctrica a la red de distribución.

El desarrollo del presente estudio de investigación busca satisfacer la demanda energética a partir de la implementación de los sistemas Generadores Distribuidores Renovables en el ámbito deportivo a través del diseño técnico y evaluación económica del proyecto.

A partir de ello se busca generar la información necesaria para la evaluación del consumo energético de los sistemas dentro del estadio Revolución, a través del historial existente de consumo energético. Se realizarán recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética dentro del estadio para la disminución de la generación eléctrica de autoconsumo. Esto como una solución para la mejora de la eficiencia energética dentro de instalaciones de características similares. Se establecerá a través de los planos de las instalaciones los espacios más convenientes y las adecuaciones, de ser necesarias, para su implementación.

El presente estudio aportará la información general, directrices técnicas y de evaluación financiera para que todas aquellas instalaciones deportivas que deseen implementar un sistema Generador Distribuidor Renovable fotovoltaico evalúen la viabilidad de su implementación.

La presente investigación busca incentivar el desarrollo y la implementación de más proyectos de esta índole en el ámbito deportivo, que representa una solución viable y atractiva para los interesados a la vez que se minimiza el impacto ambiental por la no utilización de combustibles fósiles, a través del diseño y estudio tecno-económico del proyecto.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Auditoría Energética

Según el Real Decreto 56/2016, como es citado por Gómez (2021), se define como aquella metodología que se aplica con la finalidad de conocer el perfil de consumo actual de una instalación para ser capaz de realizar un estudio que determine posibles alternativas de ahorro energético.

7.1.1. Demanda energética

Se define de esta forma a la energía que los equipos y sistemas dentro de una instalación utilizan para su funcionamiento. Dentro de un estadio promedio se puede encontrar diferentes tipos de sistemas y equipos que van en función del tamaño, comodidades y servicios que presentan para las personas que las visitan; pero estas presentan varias en común, que tienen como objetivo el mantenimiento e iluminación del recinto deportivo.

Dentro de las instalaciones deportivas de la Universidad de San Carlos de Guatemala se encuentran la cancha de fútbol del estadio, un polideportivo, canchas de tenis y una piscina semiolímpica, además de áreas como vestidores, duchas y graderíos. De esta forma se podría definir de forma general, que la demanda energética se debe a: Sistemas de iluminación, sistemas de riego, sistemas de llenado y vaciado de la piscina semiolímpica y sistemas de servicios básicos.

7.1.2. Consumo energético

Se define como aquella energía utilizada por un sistema o equipo, muchas veces cuantificada por equipos especiales de medición (Contadores), que luego representa ese gasto económico mes a mes. Según Blanco y Gutiérrez (2019), este consumo energético es inversamente proporcional a la eficiencia energética, de tal forma que, si se tiene una instalación con una alta eficiencia energética, se tendrá un bajo consumo energético.

7.1.3. Calidad de la energía

Esta puede ser relacionada a la ausencia o existencia de ondas armónicas, interrupciones en el fluido eléctrico, perturbaciones como variaciones de voltaje, sobretensiones, estabilidad del voltaje y frecuencia. Los factores que pueden influir en la calidad de la energía son: *flicker*, armónicas, variación de frecuencia, swell, Sag (Alvarado, 2017).

7.1.4. Cómo se realiza una auditoría energética

Gómez (2021) define un proceso cinco pasos para la realización de una auditoría energética; la primera consiste en la recopilación de toda la documentación de las instalaciones, facturas de electricidad y gas así como un inventario de equipos que consumen energía; la segunda se realiza una toma de datos del estado general de la instalación, equipos, tiempo de funcionamiento y todo lo relacionado con el flujo energético; la tercera, se realiza un análisis de los datos recabados, distribución del consumo eléctrico y se definen indicadores energéticos con gráficas, cálculos, entre otros, la cuarta, se presentan las propuestas de mejoras técnicas que deriven ahorros energéticos susceptibles,

valorando su potencial y viabilidad económica; y la quinta, es la elaboración del informe final con detalles del proyecto.

7.2. Fuentes de energía en Guatemala

Guatemala tiene una gran diversidad de fuentes de energía, renovables y no renovables. Según el informe estadístico anual 2021 del administrador del mercado mayorista, la participación que la energía renovable tiene en la matriz de generación eléctrica fue de 64.62 %, mientras que la participación de energía no renovable fue de 26.05 % y un 9.33 % de importación de un total de 13,172.54 GWh (AMM, 2021).

7.2.1. Fuentes de energía renovable

La dirección general de energía, 2018; Guatemala tiene un gran potencial de recursos renovables que ha sido poco aprovechados, esto derivado de que solo un 24.1 % de un total de 6000 MW de potencial de energía hidroeléctrica y tan solo un 3.5 % de un total de 1000 MW de energía geotérmica ha sido aprovechada (Dirección General de Energía, 2018).

Dentro del territorio nacional se puede encontrar:

7.2.1.1. Energía hidráulica

Es el aprovechamiento de la energía potencial que se encuentra en la corriente de agua por diferencia de altura, debido a que la gravedad hace que este fluya de un punto alto hacia uno más bajo; de esta forma, dicha energía, se convierte en energía mecánica, por el movimiento rotacional de turbinas, estas son conectadas a generadores para su conversión hacia energía eléctrica. Tanto

el caudal como la altura que se utilice son función del potencial disponible en el río (DGE, 2018).

7.2.1.2. Energía eólica

Este tipo de energía está asociado al movimiento de las masas de aire, o sea, una energía cinética, esta depende de la cantidad de masa y la velocidad del aire; con la cual puede realizarse una conversión para generar energía eléctrica. Esta energía es considerada como una forma indirecta de la solar, dado que las masas de aire experimentan una diferencia de temperatura, lo cual tiene como consecuencia una diferente presión atmosférica, lo que da lugar al movimiento del aire desde un área de alta presión hasta una de menor presión (Dirección General de Energía, 2018).

7.2.1.3. Energía biomásica

Este tipo de energía es la que puede obtenerse a partir de la quema directa o procesamiento de obtención de otro tipo de combustibles orgánicos de origen vegetal o animal (biomasa) (Dirección General de Energía, 2018).

7.2.1.4. Energía geotérmica

Es aquella que proviene del calor del interior del planeta, y es utilizada para generar energía eléctrica y otros propósitos. Estos sistemas consisten en reservorios de roca porosa y permeable que, por la circulación de vapor o agua caliente se forma el proceso de convección. Esta agua subterránea se filtra a profundidades donde se calienta de forma directa o indirecta por el magma, expandiéndose y ascendiendo a la superficie a una temperatura elevada en forma líquida o vapor (Dirección General de Energía, 2018).

7.2.1.5. Energía solar

Es aquella energía que proviene del astro del sistema solar como radiación solar, derivado de la cual se puede obtener electricidad y calor con el uso de paneles fotovoltaicos y colectores térmicos, respectivamente. Guatemala está en una posición geográfica que es considerada como idónea para el aprovechamiento de la energía solar durante casi todo el año, teniendo una radiación solar promedio anual de $5.3 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{año}$ (Dirección General de Energía, 2018).

7.2.1.5.1. Radiación solar

También es conocida como irradiación, esta es la energía por unidad de tiempo y superficie que incide sobre la tierra, es importante mencionar que, debido a que parte de ella es absorbida por la capa atmosférica o nubes, no toda la irradiación que incide en la capa exterior de la tierra incide en la superficie, siendo el valor de esta última de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (Díaz, 2017).

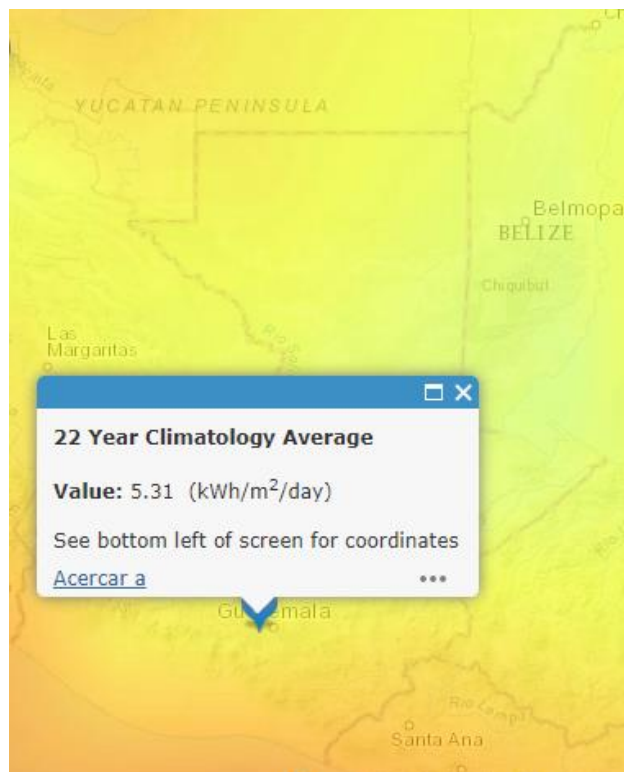
7.2.1.5.2. Hora solar pico (HSP) o insolación

El cálculo de este valor es indispensable, dado que a través de ella se hace posible el cálculo de la cantidad de paneles solares del sistema. Esto no es más que la energía por unidad de tiempo que se incide en forma de radiación solar y se presenta en cantidad de horas aprovechables para la generación por los paneles solares (Alvarado, 2017).

A través de “The Power Project” se proporcionan conjuntos de datos solares y meteorológicos de investigaciones de la NASA para respaldar las

necesidades de energía renovable, eficiencia energética de edificios y agricultura a través de satélites; de esta forma es posible determinar y establecer el valor de HSP, el cual tiene un promedio de $5.31 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$.

Figura 1. **Insolación promedio para la ciudad de Guatemala**



Fuente: National Aeronautics and Space Administration (1997). *Climatología*.

Consultado el 12 de septiembre de 2022. Recuperado de
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

7.3. Sistema de generación fotovoltaica

Es un conjunto de componentes y quipos electrónicos, eléctricos y mecánicos que se utilizan en la conversión de energía solar en energía eléctrica. Estos pueden ser sistemas aislados o sistemas conectadas a una red de distribución, el uso dependerá de las aplicaciones y necesidades que se quieran cubrir, así como del recurso solar del área geográfica en la cual estará ubicado (Buele y Chazi, 2019).

7.3.1. Efecto fotoeléctrico

Según Rodríguez y Cervantes (2006), el fenómeno fotoeléctrico se puede entender como sigue:

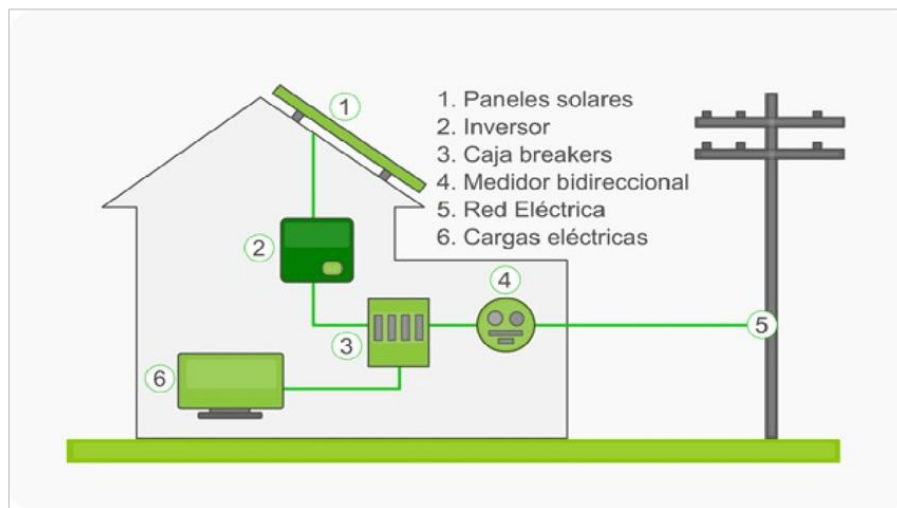
Si iluminamos una superficie metálica con un haz luminoso de frecuencia apropiada (por ejemplo, se ilumina sodio con luz a una frecuencia de $6 \times 10^{14}/s$) se emiten electrones de la superficie. Esta emisión de electrones desde la superficie por la acción de la luz se denomina efecto fotoeléctrico. (Rodríguez y Cervantes, 2006, p. 304)

Se determinó que la energía cinética con la que los fotoelectrones se mueven son independientes de la intensidad de radiación incidente en el material, esta únicamente depende de la longitud de onda o la frecuencia de dicha radiación, se estableció que la frecuencia de umbral de la radiación incidente que permite la liberación de los fotoelectrones está definida bajo la función de trabajo del material; el número de fotoelectrones (corriente eléctrica), que se pueden liberar del material dependen de la intensidad de la luz incidente (Rodríguez y Cervantes, 2006).

7.3.2. Sistema de generación fotovoltaico conectado a la red

Es un sistema caracterizado por operar de forma conjunta a la red eléctrica de distribución para el suministro de la demanda eléctrica en la instalación. Este sistema es capaz de generar electricidad durante el día para su inyección a la red de distribución y la consumida por parte de las instalaciones. Durante los periodos de baja radiación solar o noches, la red eléctrica existente es la encargada de suministrar la energía a la edificación debido a que este sistema no cuenta con banco de baterías para su almacenamiento; por lo que este sistema es bastante utilizado a diferencia de los sistemas aislados debido a su alta confiabilidad y menor costo (Buele y Chazi, 2024; Chis, 2021).

Figura 2. **Conexión de equipos en un sistema de paneles solares conectado a la red**



Fuente: Lata (2015). *Estimación del potencial urbano de sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Guayaquil.*

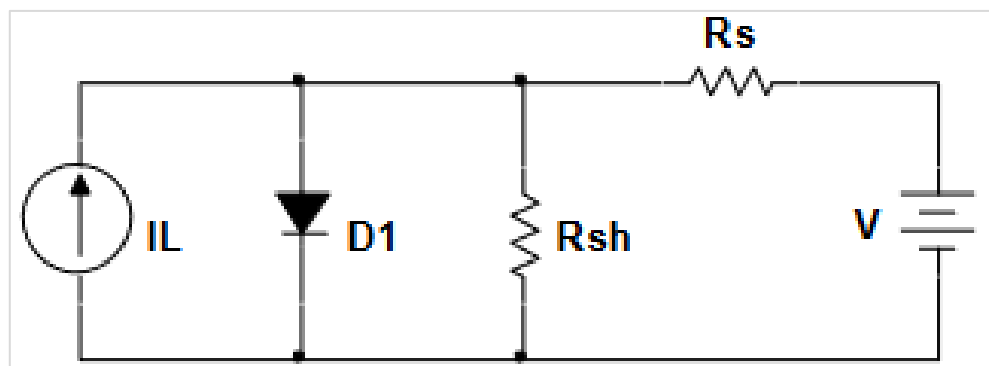
7.3.2.1. Componentes de un generador fotovoltaico conectado a la red

Todo sistema generador debe conformarse por equipos que sean capaces de llevar a cabo cada una de las etapas necesarias para su funcionamiento, dicho lo anterior, a continuación, se detallan cada uno de ellos.

7.3.2.2. Panel solar

Está constituida físicamente por la unión de semiconductores tipo “P” y tipo “N” que, por lo general son de silicio, a través del efecto fotoeléctrico se obtiene una corriente directa en sus bornes. El comportamiento de las celdas fotovoltaicas se puede representar eléctricamente por una fuente de corriente, una resistencia en paralelo y una en serie de la siguiente manera: (Granda et al., 2013).

Figura 3. Circuito Equivalente de celdas solares



Fuente: Granda et al. (2013). *Modelado y simulación de celdas y paneles solares*.

7.3.2.2.1. Curvas V-P y V-I de los paneles fotovoltaicos

Las características principales de los paneles solares están representadas por las variables que se muestran gráficamente en el comportamiento voltaje-potencia y voltaje-corriente, estas son:

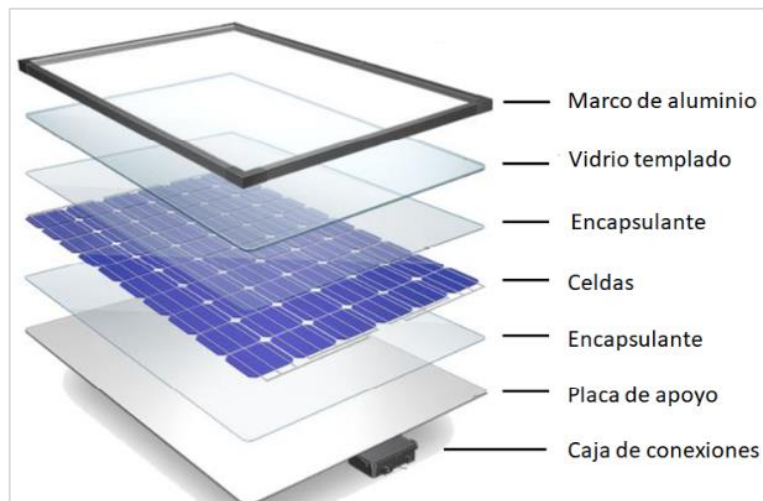
- I_{sc} : es la corriente en condición de corto circuito entre sus conectores, es decir de tensión cero, este es equivalente a la corriente máxima que el panel solar puede proveer (Romero et al., 2019).
- V_{oc} : es el valor de tensión máxima que puede obtenerse del panel solar en condición de circuito abierto o sin carga, es decir, una corriente a través del panel solar igual a cero (Romero et al., 2019).
- MPP: es el punto de máxima potencia, este establece las condiciones óptimas de operación de los paneles, en este punto convergen la potencia máxima de generación, corriente y voltaje que dan lugar a dicha potencia (Romero et al., 2019).
- P_{MPP} : es la potencia en el punto máximo de potencia, esta característica representa el valor de potencia máxima que el panel solar es capaz de generar (Romero et al., 2019).
- I_{MPP} : es la corriente en condiciones de MPP, es decir, es la corriente que circula a óptimas condiciones (Romero et al., 2019).

- V_{MPP} : es el voltaje en condiciones de MPP, es el valor de tensión que puede ser generado bajo la condición de óptimas condiciones (Romero et al., 2019).

7.3.2.2.2. Construcción física de módulos fotovoltaicos

Los paneles solares están compuestos físicamente por células fotovoltaicas, sin embargo, no es suficiente visto que estas estarán expuestas a condiciones que pueden causarle daños, es por ello que cuentan con una estructura de protección mecánica que les permite operar minimizando posibles daños a su estructura principal, estas son: Cubierta exterior, encapsulantes, cubierta posterior y marco de soporte (Romero et al., 2019).

Figura 4. **Construcción de módulos solares**



Fuente: Romero et al. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*.

7.3.2.2.3. Tipos de módulos solares

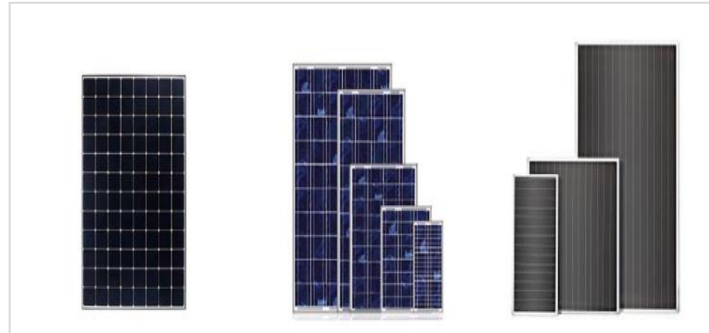
Panel solar de silicio monocristalino: estos forman un cristal uniforme en el que los átomos se alinean perfectamente. Este tipo de paneles tiene un mayor rendimiento debido a que son elaboradas con silicio altamente puro, tiene un mejor comportamiento ante los de silicio policristalino en escenarios de poca luz (Romero et al., 2019).

Actualmente se les puede encontrar en el mercado de tipo *Mono Half Cell Module*, los cuales son paneles solares compuestas por células solares cortadas a la mitad, lo cual mejora su durabilidad y rendimiento, actualmente estos pueden alcanzar una potencia de hasta 670 W.

Silicio policristalino: forman un cristal en el que sus átomos se encuentran en distintas direcciones ordenadas por regiones. El proceso de fabricación de este tipo de paneles solares es bastante sencillo, por lo que su costo económico es menor a los monocristalinos, estos tienen un mejor comportamiento ante el cambio de temperaturas más elevadas (Romero et al., 2019).

Silicio amorfo: esta estructura semiconductor se deposita en soportes en forma de una capa fina, esto permite que se formen módulos flexibles o rígidos (Romero et al., 2019).

Figura 5. **Tipos de módulos solares**



Fuente: Romero et al. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*.

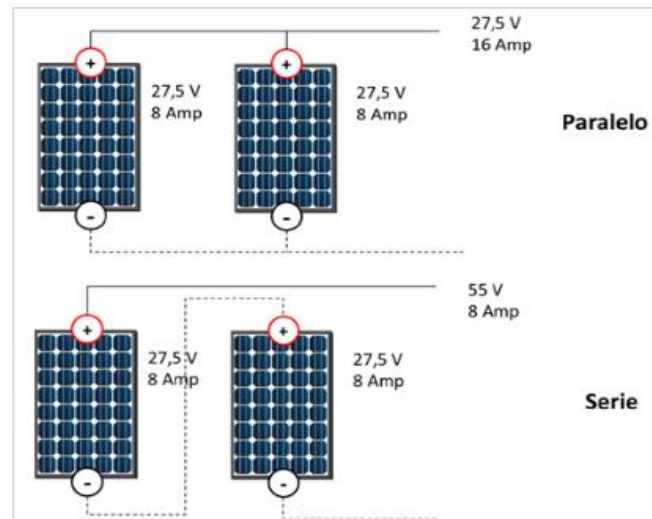
7.3.2.2.4. Conexión de paneles solares

La conexión entre paneles solares se hace necesario debido a que la carga puede consumir mayor energía, lo que se traduce a admitir una corriente y tensión mayor de la que un solo modulo fotovoltaico es capaz de suministrar, estos pueden ser: (Romero et al., 2019).

Serie: esta conexión se caracteriza porque suma la tensión de cada módulo fotovoltaico mientras que la corriente total es la misma, formando de esta forma una cadena o *string*.

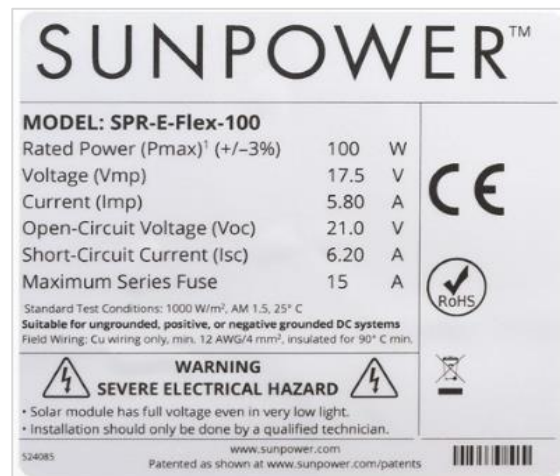
Paralelo: es una conexión que se caracteriza por que la tensión en cada módulo es la misma mientras que las corrientes se suman.

Figura 6. **Conexión paralelo y serie entre paneles solares**



Fuente: Romero et al. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*.

Figura 7. **Placa técnica de un módulo solar**



Fuente: Romero et al. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*.

7.3.2.2.5. Eficiencia del panel solar

Se entiende como eficiencia al porcentaje de potencia eléctrica que sale del panel con respecto a la que es absorbida de la radiación. Este valor da indicios de la calidad de la construcción y materiales del panel solar. La ecuación que la define es (Alvarado, 2017).

7.3.2.2.6. Inclinación y orientación de la instalación fotovoltaica

Los módulos deben contar con una inclinación y orientación que garantice el aprovechamiento de la energía del sol lo máximo posible. Ésta está determinada por diferentes variables, entre los que se pueden mencionar: La radiación incidente del lugar, el cielo solar, la sombra de objetos existentes como edificios, montañas, y los niveles de reflexión del lugar. Estas se determinan por dos ángulos (Fernández, 2009).

Acimut (α): es el ángulo que define la desviación con el ecuador, con una posición idónea apuntando hacia él, es decir con ángulo azimutal igual a cero (Fernández, 2009).

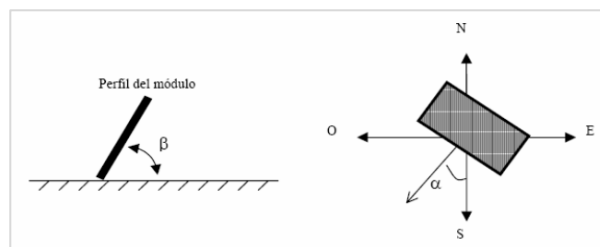
Inclinación (β): es el ángulo que hay entre el plano horizontal y la inclinación del módulo fotovoltaico. Para ello es importante considerar el fin del proyecto, es decir, si se quiere producir energía el año completo o solo para cierta época, pues la altura máxima que alcanza el sol en el cielo varía según la época en que se encuentre, alcanzando su máximo para los solsticios de verano y su mínimo para los solsticios de invierno (Fernández, 2009).

Para Guatemala la latitud es de 14.58659° y longitud de -90.54784° encontrándose muy cerca al ecuador, en el hemisferio norte; derivado de lo anterior se puede concluir que la orientación α debe ser cero o hacia el sur. Ahora bien, para la inclinación se debe hacer uso de la ecuación siguiente:

$$\beta = 0.96 * Latitud$$

Sin embargo, debe considerarse la existencia de un mínimo de inclinación, para evitar la acumulación de polvo y humedad, por lo que se establece que la inclinación será de 15° (Fernández, 2009).

Figura 8. **Inclinación y orientación de la instalación**



Fuente: Fernández (2009). *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil.*

7.3.2.2.7. Distancias mínimas entre módulos solares

Tal y como se hace mención en Alvarado (2017), es la distancia horizontal que existe entre filas de módulos fotovoltaicos en la instalación, necesaria para que no se produzcan sombras entre ellas mismas, garantizando por lo menos

cuatro horas de sol en el día más desfavorable del año, es decir el solsticio de invierno.

$$d = \frac{h}{\operatorname{tg}(61 - \text{Latitud})}$$

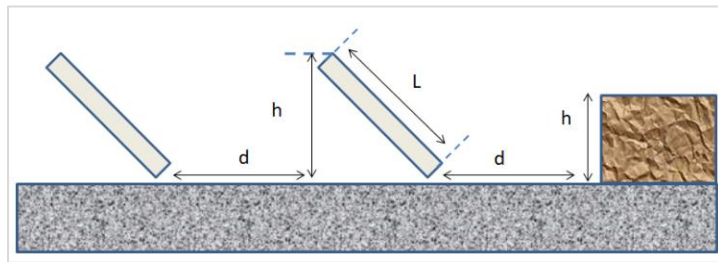
Dónde:

d: Distancia horizontal mínima entre filas.

h: Altura del punto más alto del panel solar con respecto al suelo.

Latitud: 14.58659° para Guatemala.

Figura 9. **Distancias mínimas entre módulos solares**



Fuente: Romero et. al. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*.

7.3.2.3. Inversor

Los inversores son equipos necesarios derivado del requisito de conversión de DC hacia AC y que de esta forma pueda ser acoplada la instalación hacia la red de distribución. Es importante mencionar que este equipo realiza la conversión con las características necesarias para la sincronización, es decir, con la frecuencia, tensión y secuencia establecidas por la red.

Estos equipos utilizan la electrónica de potencia para poder realizar la conversión de corriente, alcanzando un muy alto grado de onda sinusoidal a través de la modulación por ancho de pulso o PWM, haciendo que las armónicas superiores sean mucho menores que la propia onda sinusoidal (Díaz y Alvarado, 2017).

Existen varios tipos de inversores dentro del mercado, su clasificación puede estar establecida por:

- Configuración del sistema
 - Inversores centrales: se utiliza un solo inversor para un número de filas o *strings* de módulos solares.
 - Inversores en cadena: se utiliza un inversor por cada fila o *string* de paneles fotovoltaicos.
 - Inversores modulares: estos van incorporados detrás de cada panel fotovoltaico y se utiliza para potencias pequeñas.
- Cantidad de fases del sistema
 - Monofásicos
 - Trifásicos: pueden encontrarse fabricados o contruidos por tres inversores monofásicos.
- Número de etapas
 - una etapa

- Dos etapas
- Multietapa
- Topología
 - Baja frecuencia: este contiene la conversión DC/AC seguido de un transformador interno.
 - Alta frecuencia: esta contiene dos etapas; la primera, una conversión DC/DC; la segunda, una conversión DC/AC, para la posterior conexión a la red.

Sin transformador: Tiene la característica de no tener un aislamiento galvánico a diferencia de los anteriores, siendo este el más eficiente de los tres (Alvarado, 2017).

7.3.2.3.1. Seguidor del punto de potencia máxima (MPPT)

Según Alvarado (2017) derivado de las condiciones no lineales que pueden existir en las variables climáticas y de recurso solar, la demanda de la carga, la generación por parte de la instalación también será de carácter no lineal. Existe un único valor de temperatura, irradiancia y carga para el cual los que los módulos entreguen su potencia máxima, que para estas condiciones el inversor funciona de forma óptima; sin embargo, estas condiciones se cumplen muy pocas veces, derivado de ello, el inversor ajusta las variaciones realizando un *maximum power point tracking* (MPPT).

Según Alvarado (2017) este es un algoritmo que toma periódicamente el voltaje y corriente generada en los módulos para el cálculo de potencia generada, el objetivo es establecer una referencia de corriente de régimen estacionario en función de la derivada de la potencia que obliga a que se opere en torno al MPP.

El MPPT busca maximizar la potencia generada para distintos puntos de operación minimizando las pérdidas que puedan darse durante la conversión DC/AC regulando el flujo de corriente y voltaje a su salida.

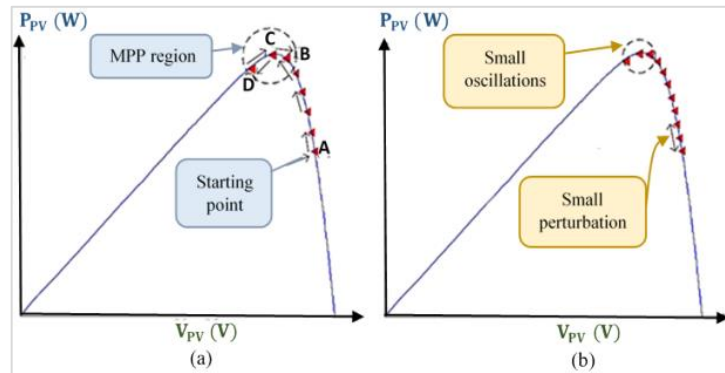
Alvarado (2017), menciona que se han desarrollado varios algoritmos MPPT que se adaptan a diferentes condiciones de operación, sin embargo, para los sistemas conectados a la red se pueden encontrar dos.

7.3.2.3.2. Algoritmo P&O o perturbación y observación

Es uno de los algoritmos más utilizados para inversores debido a su fácil implementación y que no se hace necesario conocer las características del generador. Debido a la naturaleza del algoritmo, este prescinde de mecanismos complejos que requieran mantenimiento continuo, lo cual hace que el inversor sea muy utilizado en aplicaciones de alta confiabilidad y versatilidad (Gaston y Maximiliano, 2017).

Según Albarracín (2010) este algoritmo varía la tensión de los paneles fotovoltaicos para representar la potencia resultante. Si la potencia presente es mayor que la anterior, se debe seguir con la misma variación anterior, es decir aumento o disminución; pero si la potencia es menor que la potencia de muestra anterior, se debe variar la tensión de forma opuesta, es decir disminución o aumento, a la del ciclo anterior. Una vez se alcanzado el MPP, este algoritmo establecerá el punto de operación de los módulos alrededor de él.

Figura 10. **Algoritmo de perturbación y observación**



Fuente: Saad Motahir, Aboubakr El Hammoui. & Abdelaziz El Ghzizal (2019). *The most used MPPT algorithms: review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm*, journal of cleaner production.

7.3.2.3.3. **Algoritmo de conductancia incremental**

Este método presenta mejoras frente al algoritmo anterior en la velocidad de respuesta ante variaciones rápidas de las condiciones climáticas y la eliminación de oscilaciones en régimen permanente (Echeverría, Judewicz, Murcia, Strack y González, 2014).

Según Echeverría et al. (2014), este algoritmo está basado en el hecho que la pendiente de la curva de potencia de los módulos es cero en el MPP, que es positiva a la izquierda y a la derecha negativa de dicho punto. Este verifica las variaciones de tensión en la operación entre ciclos, de existir ésta, se comparan la conductancia incremental con la conductancia incremental instantánea, de esta forma se decide el acercamiento al punto de potencia máxima.

Pueden darse tres casos distintos de operación; la primera se da cuando la conductancia incremental es mayor a la instantánea, es decir que la operación es a la izquierda del MPP, por lo que se necesita disminuir la conductancia instantánea disminuyendo el ciclo de trabajo; la segunda se da cuando la conductancia incremental es menor a la instantánea, es decir que la operación es a la derecha del punto, se necesita aumentar la conductancia instantánea aumentando el ciclo de trabajo; y la tercera se da cuando la operación se da en el MPP y no se necesita acción alguna de control en los ciclos (Echeverría, et al., 2014).

7.3.2.3.4. Parámetros técnicos de un inversor

Según Díaz (2017), los parámetros de especificación de los inversores que establecen las condiciones nominales, mínimas y máximas de operación segura durante el proceso de generación y transformación DC/AC, es importante mencionar que estos dependerán del modelo y fabricante, son:

- Tensión cc máxima de entrada $V_{CCMáx}$
- Tensión cc mínima de entrada $V_{CCMín}$
- Tensión de entrada de arranque $V_{CC,Arr}$
- Tensión nominal de entrada $V_{CC,n}$
- Tensión máxima del MPP $V_{MPPmáx}$
- Tensión mínima del MPP $V_{MPPmín}$
- Corriente cc máxima de entrada $I_{CCmáx}$

7.3.2.4. Medidores

Dentro de una instalación de este tipo se hace necesario un dispositivo que sea capaz de contabilizar la energía excedente que sea vendida a la red de distribución, producto de una generación mayor de la demandada por la instalación, así como la energía que sea consumida proveniente del sistema de distribución para aquellas ocasiones en las que el sistema no sea capaz de suministrar completamente la energía demandada. Esto es posible utilizando un contador o medidor bidireccional. El objetivo de la contabilización de dicha energía entrante y saliente de la instalación GDR fotovoltaica, es que se tendrá una remuneración o cargos mensuales por la cantidad de energía vendida o consumida.

Estos medidores al igual que los convencionales pueden ser monofásicos como trifásicos y de diferentes tipos de tecnología, electromecánicos, digitales, entre otros. En la actualidad se les puede encontrar con protocolos de comunicación para un mejor control.

Las especificaciones técnicas estarán acorde a las condiciones de la instalación GDR así como las del sistema de distribución a conectarse, alguna de ellas son: Número de fases, número de hilos, precisión, frecuencia, tensión nominal, corriente máxima.

7.3.2.5. Protecciones eléctricas

Es importante reconocer que en cualquier instalación eléctrica es necesario contar con dispositivos que velen por la seguridad de la propia instalación, personal de mantenimiento y cualquier otra persona que se encuentre cerca del equipo. Según Alvarado (2020), las protecciones disminuyen

los efectos negativos en los equipos disminuyendo el tiempo de funcionamiento en falla a través de la detección, localización y desconexión de las fallas. Para ello, las protecciones eléctricas deben cumplir con tres principales características; deben ser confiables, estables y selectivas.

Dado que en una instalación fotovoltaica se pueden encontrar corrientes de tipo directas (DC) y alternas (AC), es necesario determinar los dispositivos adecuados para cada uno de ellos.

7.3.2.5.1. Fusibles

Los fusibles son equipos de protección contra sobrecorrientes dentro de una instalación, su construcción básica es de un soporte adecuado y un filamento de metal o aleación de bajo punto de fusión diseñado para que este se funda por efecto Joule cuando la corriente sobrepase un valor normal de funcionamiento (Laj, 2011).

En instalaciones fotovoltaicas en las que existen conexiones en paralelo se hacen muy útiles para la protección contra corrientes inversas que puedan llegar a producirse (Canal Autoconsumo Solar Fácil 0m44s, 2022).

En la actualidad existen fusibles con características que se adecuan de mejor forma a las necesidades de una instalación fotovoltaica. Las características que definen a los fusibles son:

- Poder de corte: se define de esta forma a la corriente máxima que el fusible puede interrumpir.
- Tensión nominal: es el valor de tensión al cual el fusible estará funcionando y depende de la tensión de la instalación o equipo a proteger.

- Corriente nominal: es la corriente que sea conducida por el fusible durante el funcionamiento.
- Corriente de fusión: es el valor de corriente a la cual el filamento del fusil se fusiona y deja de pasar corriente a través de él.
- Curva de fusión: es la encargada de definir la relación del tiempo y corriente de desconexión de un fusible.

7.3.2.5.2. Interruptores termomagnéticos

Es un elemento electromecánico que se utiliza para la protección contra sobre corrientes y sobrevoltajes bajo dos principios de funcionamiento, tal y como su nombre lo indica, este es un interruptor que combina efectos magnéticos y térmicos.

El funcionamiento de estos interruptores puede ser explicado de dos formas; el primero, a través de la dilatación del bimetálico por el paso de una corriente excesiva, interrumpiendo el circuito de esta forma; el segundo, es a través del aumento de los campos magnéticos en la bobina del interruptor por el aumento excesivo de la corriente, lo cual produce la fuerza necesaria para atraer el núcleo y de esta forma aperturar el circuito (José R. 2022).

Es importante tomar en cuenta la aplicación o equipos que serán protegidos, dado que de esta dependerá la velocidad de respuesta ante la presencia de alguna falla; es decir, bajo el efecto térmico se tendrá una apertura más lenta que bajo el efecto magnético.

Su funcionamiento está definido a través de su curva característica, existen muchos tipos de curvas, los cuales dependen de la aplicación, construcción y calidad de estos.

Para la especificación técnica de un interruptor termomagnético es importante tomar en cuenta las necesidades de protección en la instalación como la corriente en el sistema, tensión de la instalación, si es AC o DC, frecuencia, número de polos, así como la capacidad de interrupción porque de esto dependerá la robustez del interruptor y su capacidad para mitigar las fallas que puedan existir de forma eficaz.

7.3.2.5.3. Interruptor diferencial

Es un dispositivo electromecánico que se utiliza dentro de una instalación eléctrica como protección principalmente del personal, puesto que este es capaz de evitar choques o toques eléctricos al momento de tocar los equipos en una instalación.

Este equipo tiene un funcionamiento muy similar al de los termomagnéticos, más específicamente su parte magnética. Según Haverland (2020), este elemento cuenta con dos bobinas, una conectada a la entrada y la otra a la salida de la carga, su función es generar un campo magnético neto para producir una fuerza con la capacidad de cortar el paso de la corriente cuando exista una derivación a tierra. Es decir, si la corriente que pasa por la primera bobina es de la misma magnitud que la corriente que pasa por la segunda, el campo magnético neto es igual a cero, por lo que habrá una fuerza de magnitud cero sobre la parte móvil del elemento, lo que supone un funcionamiento normal en la instalación y la no apertura del circuito; sin embargo, si la corriente que pasa por la segunda bobina es menor a la corriente que pasa por la primera, esto

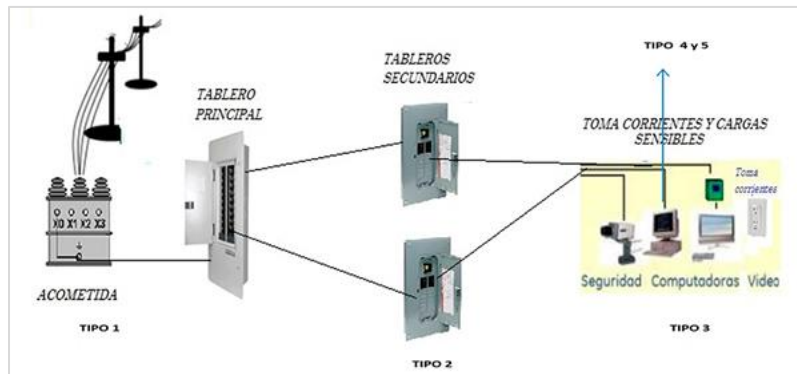
supone que hubo una corriente de fuga desde el elemento protegido a tierra, entonces el interruptor experimentará un campo magnético neto con un valor diferente de cero, el cual será capaz de accionar el interruptor y abrir el circuito como medida de protección, drenando la falla hacia tierra.

7.3.2.5.4. Supresores de tensión o transitorios

Son dispositivos eléctricos de protección contra sobre tensiones transitorias que pueden generarse en una instalación eléctrica, desviando toda esta energía a través de una baja impedancia hacia el sistema de tierras. De esta forma quedan protegidos los equipos ante sobretensiones por las inclemencias climáticas como rayos o una conexión/desconexión de cargas capacitivas o inductivas. En una instalación fotovoltaica es necesaria su implementación teniendo en cuenta que dichas fallas pueden reducir la vida útil de equipos electrónicos, como los inversores, o la destrucción completa de ellos, así como el rompimiento de sus aislantes (Corona, 2021).

Existen diferentes clases de supresores en el mercado, estos se clasifican principalmente por el nivel de protección y el equipo al cual está destinado a proteger, los cuales se pueden observar mediante la figura 11.

Figura 11. Tipo de supresores por el equipo a proteger



Fuente: International Trading (2020). *¿Qué es un supresor de picos?* Consultado el 22 de septiembre de 2022. Recuperado de <http://www.internationaltrading.com.mx/supresores/>).

7.3.2.5.5. Caja de concentración o combinadora

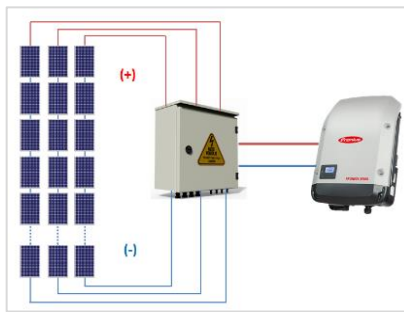
Estos son dispositivos que permiten la combinación o conexión de varias cadenas de módulos, lo cual resulta muy útil en aquellas instalaciones industriales o generadoras en las que se instalarán una gran cantidad de módulos solares.

La implementación de estos dispositivos resulta muy conveniente ya que permite una reducción de conductores y dispositivos de conexión y los compacta a una sola salida para su posterior conexión hacia el inversor, de esta forma se hace mucho más fácil y cómoda las operaciones de mantenimiento y corrección de fallas en la instalación (Díaz, 2017).

La función de estos equipos no solo es la simplificación en las conexiones de la instalación, estas cajas también permiten la instalación de los dispositivos

de protección descritos con anterioridad necesarias en una instalación, es decir, cuentan con espacios para la instalación de portafusibles, fusibles, interruptores termomagnéticos, interruptores diferenciales, interruptores contra sobrevoltajes, entre otros. Algunos de ellos cuentan con seccionadores incluidos, lo que suma versatilidad a la instalación fotovoltaica para realizar conexiones/desconexiones bajo carga para trabajos de mantenimientos o correcciones dentro de la instalación.

Figura 12. **Ejemplo de conexión en una caja de concentración**



Fuente: Pérez (2020). *Cajas de concentración*. Consultado el 25 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://www.conermex.com.mx/blog-cajasdeconcentracion.html>.

Según Alvarado, es posible encontrar en la actualidad cajas de concentración con sistemas de monitoreo que permiten un mejor control sobre las variables de corriente y voltaje por cada cadena de módulos fotovoltaico. Esto añade mayor confiabilidad y un grado mayor de protección a la instalación para la detección de anomalías. Todo esto es logrado a través de protocolos de comunicación alámbricas o inalámbricas hacia un centro de control.

7.3.2.6. Estructuras y accesorios

Como bien se ha mencionado anteriormente, los paneles solares deben ubicarse en lugares libres de sombras durante el tiempo de máxima incidencia de radiación solar, además de cumplir con la orientación (α) e inclinación (β) adecuada para su mayor aprovechamiento. Por ello se hace necesario la utilización de estructuras, para lograr la instalación del sistema fotovoltaico garantizando dichas condiciones de posicionamiento.

Es importante mencionar que la justificación de dichas estructuras es debido a la seguridad dentro de la instalación por la exposición de fuertes vientos, tormentas y demás inclemencias atmosféricas que puedan dañar la instalación.

El tipo de estructura y accesorios necesarios para su instalación dependerán de las condiciones del lugar de la instalación; según Albo (2021), estas pueden ser instalaciones de cuatro tipos: En el suelo, en postes o torres, en paredes y en techos.

7.3.2.6.1. Instalaciones en el suelo

Este presenta ventajas de mantenimiento y los efectos de la acción del viento, puesto que, al estar a una altura cercana al suelo, estas no son afectadas en gran manera por dichas fuerzas. Aun así, se debe considerar una altura de seguridad mínima para evitar daños a los módulos fotovoltaicos por la existencia de agua acumulada (Albo, 2021).

7.3.2.6.2. Instalaciones en postes o torres

Es utilizado en aquellos lugares que se encuentran a una altura baja o terrenos escarpados, que no permitan una instalación fácil o segura en el suelo o de mucha exposición a sombras. Sin embargo, no es recomendable su utilización para instalaciones muy grandes que requieran de una gran cantidad de paneles fotovoltaicos (Albo, 2021).

7.3.2.6.3. Instalaciones en paredes

Esta es posible a través de sistemas de ganchos o garras, para este tipo de instalaciones el efecto del viento queda disminuido ya que no puede incidir por la parte posterior y por la parte frontal solo tendrá efectos directamente en los apoyos. Es importante tomar en cuenta la localización de las paredes, puesto que no todas serán elegibles; para el caso de Guatemala serán las paredes que miran hacia el sur (Albo, 2021).

7.3.2.6.4. Instalaciones en techos

Es una estructura bastante utilizada debido a que no ocupa un espacio extra en una instalación, son relativamente fáciles de orientar, sin embargo, es necesario poner bastante cuidado en la instalación para evitar filtraciones en la cubierta (Albo, 2021).

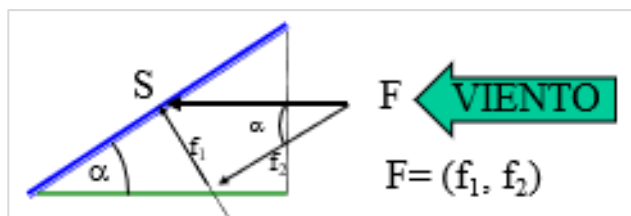
Según Alvarado (2017), las normas UNE 37-508 y UNE 37-501, establecen que las estructuras deben ser de acero galvanizado como medida de proyección contra la abrasión y golpes. Según la norma MV-106, la tornillería

debe ser de acero inoxidable, como medida de cumplimiento a las condiciones técnicas de IDEA.

7.3.2.6.5. Fuerzas que actúan sobre los paneles fotovoltaicos

Una instalación fotovoltaica está expuesta a fuerzas según la zona geográfica de la misma, dado que se encuentra a la intemperie, esta puede experimentar fuerzas por lluvias, vientos, nieve, según sea el caso. Debido a que se encuentran en una zona geográfica en la que prevalecen los efectos de los vientos. Según Albo (2021) la estructura debe garantizar la resistencia y rigidez de todo el conjunto. La fuerza del viento puede expresarse a través de dos componentes; la primera, una fuerza perpendicular a la superficie de aplicación de la fuerza; la segunda es una fuerza paralela a la superficie de aplicación de la fuerza.

Figura 13. **Fuerzas que actúan sobre los paneles fotovoltaicos debido al viento**



Fuente: Sánchez (2017). *Estructuras para módulos fotovoltaicos*. Consultado el 25 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/133140/>.

Realizando un análisis trigonométrico, dicha fuerza se puede calcular como:

$$F_1 = P * S * \sin(\alpha)$$

Dónde:

F_1 : Fuerza perpendicular a la superficie S [N].

S: Superficie del módulo [m^2].

P: Presión del viento [$\frac{N}{m^2}$].

α : Ángulo de inclinación del módulo.

La presión del viento puede determinarse, según Sánchez (2017), bajo un modelo empírico de regresión lineal en que depende de la velocidad del viento que es aplicado sobre los módulos, el cual es:

$$P = 0.005 v + 0.611 v^2 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Dónde:

P: Presión del viento [$\frac{N}{m^2}$].

v: Velocidad del viento [$\frac{m}{s}$].

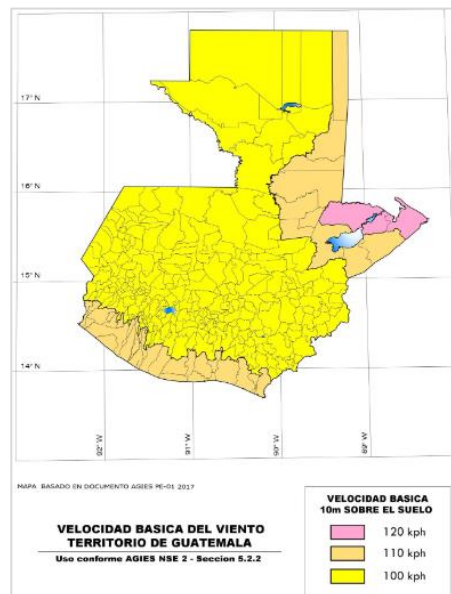
7.3.2.6.6. Velocidad del viento en Guatemala

Como bien se ha observado es necesario conocer la velocidad del viento dentro de la zona geográfica en la que estará ubicada la instalación, porque este ejercerá una fuerza a la estructura de los paneles fotovoltaicos.

Se utilizará el mapa de isotacas de Guatemala presentada por las normas AGIES (Asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica), ésta se observa en la figura 15, se presentan cuatro velocidades de viento mínimas para el análisis sobre estructuras. Según Anleú (2017), estas velocidades se basan en

el valor máximo de velocidad que se puede presentar con una probabilidad anual del 2 %, medida a diez metros sobre el suelo, según las especificaciones normadas por la AGIES como por ASCE (American Society of Civil Engineers).

Figura 14. **Velocidad del viento en territorio guatemalteco**



Fuente: AGIES (2018). *Normas de seguridad estructural para Guatemala*.

7.3.3. Dimensionamiento de cableado

Un dimensionamiento adecuado del cableado en una instalación es muy importante, principalmente porque a través de ella será transportada toda la energía eléctrica hacia el inversor y su conexión con el sistema de distribución y la instalación. Estos deberán ser dimensionados de tal forma que se cumplan las condiciones y características establecidas por las normas que rigen el diseño de instalaciones eléctricas e instalaciones con módulos fotovoltaicos; esto derivado de la necesidad de cumplir con un funcionamiento seguro tanto para los equipos

y personal reduciendo los riesgos de fallas, formación de arcos eléctricos y por consecuencia incendios.

Según NEC (National Electrical Code) no es recomendable cargar un conductor más de un 80 % de su capacidad nominal derivado de la posible existencia de desbalances y sobrecargas, por lo que se recomienda tomar un margen de seguridad en el dimensionamiento (Chis, 2021).

7.3.3.1. Requerimientos técnicos de cableado de una instalación fotovoltaica

Según Alvarado L. (2017), el cableado debe cumplir con las condiciones del artículo 690 y 705 de la norma NOM-SEDE 2012 y sus especificaciones de acuerdo con las normas IEC 60364-7-712 y 60364-4-41.

7.3.3.2. Factores de corrección

Es importante tomar en cuenta todas las condiciones a las cuales serán sometidos los circuitos dentro de una instalación y cómo estas afectan y forman parte del diseño y dimensionamiento de este para que garantizar el cumplimiento de sus funciones de forma segura y bajo lo estipulado por las normas internacionales.

Es por ello por lo que se cuenta con factores de corrección para distintos valores de temperatura ambiente; factores de corrección para distintos materiales de fabricación de tuberías; factores de corrección para la cantidad de conductores.

Tabla I. **Tabla de coeficientes de corrección de temperatura ambiente**

Temperatura ambiente (°C)	No más de tres conductores monopolares aislados		
	Rango de temperatura del conductor		
	60°C	75°C	90°C
21-25	1,08	1,05	1,04
26-30	1,0	1,0	1,0
31-35	0,91	0,94	0,96
36-40	0,82	0,88	0,91
41-45	0,71	0,82	0,87
46-50	0,58	0,75	0,82
51-55	0,41	0,67	0,76

Fuente: NEC (2005). *Conductors for General Wiring*.

Tabla II. **Factor de corrección por disipación de calor**

Tipo de tubería	Factor de corrección
PVC	0,8
Metálicas	1

Fuente: Chis (2021). *Estudio de eficiencia energética y calidad de energía del edificio, flor del café, zona 1, ciudad de Guatemala*.

Tabla III. **Coeficiente de corrección por la cantidad de conductores**

Number of Current-Carrying Conductors	Percent of Values in Tables 310.16 through 310.19 as Adjusted for Ambient Temperature if Necessary
4-6	80
7-9	70
10-20	50
21-30	45
31-40	40
41 and above	35

Fuente: NEC (2005). *Conductors for General Wiring*.

7.3.3.3. Dimensionamiento de cableado según su Ampacidad

Uno de los criterios para el dimensionamiento del cableado es la determinación de la corriente en cada parte del circuito, tomando todos los factores de corrección aplicables. Conocido el valor de corriente del sistema es posible determinar el calibre de los conductores a través del valor de ampacidad y las condiciones de trabajo a las cuales estará sometida, de temperatura y tipo de aislamiento.

Es importante reconocer que este criterio es muy útil para instalaciones en las que las longitudes de los conductores sean relativamente cortas, dado que para distancias largas la caída de voltaje a través del conductor puede sobrepasar los límites permitidos, para estos casos es recomendable utilizar el criterio de caída de tensión.

Tabla IV. **Tabla de conductores y su ampacidad**

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor (See Table 310.13)						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
		Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW- 2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, 2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2		Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	Types TW, UF			Types TW, UF			
COPPER							
18	—	—	14	—	—	—	—
16	—	—	18	—	—	—	—
14*	20	20	25	—	—	—	—
12*	25	25	30	20	20	25	12*
10*	30	35	40	25	30	35	10*
8	40	50	55	30	40	45	8
6	55	65	75	40	50	60	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	110	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	150	85	100	115	1
1/2	125	150	170	100	120	135	1/2
2/3	145	175	195	115	135	150	2/3
3/4	165	200	225	130	155	175	3/4
4/5	195	230	260	150	180	205	4/5
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	190	230	255	300
350	260	310	350	210	250	280	350
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	355	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	310	375	420	700
750	400	475	535	320	385	435	750
800	410	490	555	330	395	450	800
900	435	520	585	355	425	480	900
1000	455	545	615	375	445	500	1000
1250	495	590	665	405	485	545	1250
1500	520	625	705	435	520	585	1500
1750	545	650	735	455	545	615	1750
2000	560	665	750	470	560	630	2000

Fuente: NEC (2005). *Conductors for General Wiring*.

7.3.3.4. Dimensionamiento de cableado por caída de tensión

Como bien se ha mencionado anteriormente, es importante tomar en cuenta la caída de voltaje debido a la propia resistencia de los conductores, estos se hacen más prominentes para longitudes relativamente largas. Derivado de ello, se debe respetar a caída de tensión máxima permitida por las normas internacionales para instalaciones eléctricas.

Según Díaz (2017), la caída máxima de tensión para instalaciones de corriente directa, según IDAE, es del 1.5 %. En el caso de la instalación GDR fotovoltaica, se tiene un tramo que va desde la generación de los módulos hasta la conexión al inversor, para el cual su sección del conductor está dada por:

$$S = \frac{2 * l * I_{cc}}{u * \sigma}$$

Dónde:

S : Área transversal del conductor [mm^2].

l : Longitud total del conductor [m].

I_{cc} : Corriente de corto circuito de los módulos [A].

u : Caída de tensión máxima permisible en el conductor [V].

σ : Conductividad del material del conductor, para el caso del cobre es de $57 \left[\frac{m}{mm^2 * \Omega} \right]$.

Para corriente alterna, se tendrá un sistema trifásico, para poder conectarse a las instalaciones de distribución. Según Díaz (2017), la caída de tensión máxima para instalaciones de AC, según IDAE, es del 2 %.

$$S = \frac{\sqrt{3} * l * I}{u * \sigma} = \frac{lP}{u * \sigma * V_L}$$

Dónde:

l : Longitud total del conductor [m].

I : Corriente de línea. [A].

u : Caída de voltaje permisible en AC [V].

σ : Conductividad del material del conductor, para el caso del cobre es de $57 \left[\frac{m}{mm^2 * \Omega} \right]$.

P : Potencia máxima que es transmitido por el conductor [W].

V_L : Tensión de línea de la red [V].

7.3.3.5. Dimensionamiento de tuberías para cableado

Las tuberías eléctricas son utilizadas principalmente como protección mecánica de los conductores en una instalación, cuando el tipo de aislamiento por sí solo no es suficiente para proteger su estructura interna. Es importante reconocer que se deben cumplir con ciertas condiciones para el correcto dimensionamiento de este y que la instalación sea segura.

Derivado de ello se debe conocer la relación que existe entre el área total de los conductores (incluyendo el área de aislamiento), y el área transversal de los tubos. Para ello se deben tomar en consideración los factores de relleno y de arreglo.

Según Laj (2011), la norma NEC establecen estos factores como es mostrado en la tabla 6:

Tabla V. **Factor de relleno y arreglo para dimensionamiento de tuberías**

Número de conductores en tubería.	1	2	3 o más
Factor de relleno	0.53	0.31	0.40
Factor de arreglo		0.8	

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Laj (2011). *Análisis y diagnóstico de las instalaciones eléctricas del antiguo hospital de emergencias del IGSS zona 13.*

La ecuación que describe el cálculo del diámetro de las tuberías es:

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4 * \Sigma A_c}{\pi * Fr * Fa}}$$

Dónde:

\varnothing : Diámetro de tubería.

A_c : Área total de los conductores.

Fr : Factor de relleno.

Fa : Factor de arreglo.

7.3.4. Pararrayos

Estos elementos ofrecen un camino seguro y controlado para el paso y disipación hacia un sistema de tierra las fallas atmosféricas (Díaz, 2017).

Según Días (2017), Los pararrayos se utilizan en edificios o zonas abiertas con presencia de personas, edificaciones de grandes alturas, construcciones que

contengan materiales peligrosos y edificios que contengan equipos o documentos especiales vulnerables.

Según Tomas (2004), como se cita en Alvarado (2017), el nivel cerámico (N_k) lo establece el INSIVUMEH, que para el caso de Guatemala es de $69 \text{ impactos} / \text{km}^2 / \text{año}$. Estableciendo que la densidad de rayos hacia tierra (N_s) es $7.955 \text{ impactos} / \text{km}^2 / \text{año}$ (Alvarado, 2017).

Enríquez (2012), como se cita en Alvarado (2017), el nivel de frecuencia de impacto de rayos se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$N_d = N_s A_e C_1 * 10^{-6}$$

Dónde:

N_d : Frecuencia de impacto de rayos.

N_s : Densidad de rayos hacia tierra.

A_e : Área equivalente de la estructura a cubrir.

C_1 : Coeficiente Ambiental.

Enríquez (citado en Alvarado, 2017), el nivel de frecuencia que puede ser aceptado de impactos de rayo sobre una estructura (N_c) es:

$$N_c = \frac{1.5 * 10^{-3}}{c_2 * c_3 * c_4 * c_5}$$

Donde:

N_c : Frecuencia aceptable.

c_2 : Coeficiente estructural.

c_3 : Coeficiente de contenido por la estructura.

c_4 : Coeficiente de la ocupación.

c_5 : Coeficiente de las consecuencias de rayo.

Si se cumple con la condición de $N_d > N_c$, es necesario implementar el sistema de protección contra rayos (Alvarado, 2017).

Tabla VI. **Valores de coeficiente ambiental**

Situación relativa a la estructura	C1
Estructura ubicada dentro de un espacio que contiene estructuras o arboles de la misma altura o más altos dentro de una distancia de 3H	0,25
Estructura rodeada por estructuras más pequeñas	0,5
Estructura aislada. no hay otras estructuras ubicadas dentro de una distancia de 3H	1
Estructura aislada sobre la cima de una colina	2

Fuente: Enríquez (2011). *ABC en instalaciones eléctricas en edificios y comercios*.

Tabla VII. **Tabla de coeficientes para el sistema de protección contra rayos**

C2 Coeficiente de estructura			
Estructura	Techo de metal	Techo no metálico	Techo Inflamable
Metal	0.5	1	2
Común	1	1	2.5
Inflamable	2	25	3
Sin valor o no inflamable		0.5	
Valor común o normalmente inflamable		1	
Gran valor o particularmente inflamable		2	
Valor muy inflamable, explosivo		3	
No ocupada		0.5	
Ocupada normalmente		1	
De difícil evacuación o riesgo de pánico		3	
Sin necesidad de continuidad del servicio y alguna consecuencia sobre el ambiente		1	
Necesidad de continuidad del servicio, sin impacto ambiental.		5	
Consecuencias ambientales.		10	

Fuente: Enríquez (2011). *ABC en instalaciones eléctricas en edificios y comercios.*

7.3.5. Sistema de tierra física

Es un conjunto de componentes conductores como electrodos, cables y conectores que son utilizadas para conducir y disipar corrientes de falla o no deseadas hacia tierra (Díaz, 2017).

Es una de las partes importantes de las instalaciones, considerando que a través de él se garantiza la protección y seguridad de las personas y equipo dentro de las instalaciones (Alvarado, 2017).

Alvarado (2017), establece que un sistema fotovoltaico compuesto por dos conductores y con tensiones arriba de cincuenta voltios deben contar con un conductor de corriente continua hacia tierra; para sistemas de tres conductores, el neutro o toma intermedia, se aterriza. El sistema de tierras también reduce el ruido de radiofrecuencias debido a las láminas fluorescentes de corriente continua y los inversores. Derivado de ello, es necesario implementar el sistema de tierra física en las instalaciones, cuidando que el valor de la resistencia no exceda las recomendadas por la literatura.

Tabla VIII. **Valores de resistencia según la instalación**

Para utilizarlo en:	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra
Estructuras de líneas de transmisión	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 Ω
Subestaciones de media tensión en poste	10 Ω
Subestaciones de media tensión e uso interior	10 Ω
Protección contra rayos	10 Ω
Neutro de acometida de baja tensión	25 Ω
Descargas electrostáticas	25 Ω
Equipos electrónicos sensibles	5 Ω

Fuente: Enríquez (2011). *ABC en instalaciones eléctricas en edificios y comercios*.

7.4. Normas y reglamentos para GDR'S

Conocer el marco legal que engloba el desarrollo de cierto tipo de proyecto dentro de un país es muy importante, principalmente porque a través de ella se dictaminan los lineamientos, obligaciones y derechos de cada uno de los participantes; ya sean entidades públicas, privadas, entidades reguladoras como lo es la CNEE o el propio interesado del proyecto. Es por lo que a continuación se realiza una breve revisión de las normas y artículos de interés que son aplicables para el caso de un proyecto GDR en Guatemala. Sin embargo, al momento de llevar a cabo la implementación del proyecto es imperativo realizar una revisión exhaustiva de la misma para no dejar cabos sueltos y actuar en todo momento bajo el marco legal.

7.4.1. Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía

Esta fue creada con el objeto, definido a través de su artículo 3, que literalmente dice: “El objeto de esta Norma es establecer las disposiciones que deben cumplir los Distribuidores, los Generadores Distribuidos Renovables y los Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía, para la conexión, operación, control y comercialización de energía eléctrica producida con fuentes renovables” (CNEE, 2014, p.7).

7.4.1.1. Disposiciones generales

Se establecen las disposiciones por parte de la comisión de la norma para su entendimiento y las áreas aplicables.

7.4.1.1.1. Acrónimos, siglas y definiciones

A través de sus artículos 1 y 2 se definen varios conceptos, acrónimos y siglas que se utilizarán en la norma.

7.4.1.1.2. Ámbito de aplicación

A través de los artículos 3 al 8, se establecen a todos aquellos a quienes es aplicable la norma, así como las obligaciones de los distribuidores y los interesados en participar como GDR, algunas normas supletorias y términos de confidencialidad. Algunos de ellos son:

- Artículo 4. Aplicación. Este artículo define que la norma es aplicable, obligatoriamente, para los distribuidores, los GDR'S y los UAEE, según corresponda (CNEE,2014).
- Artículo 5. Obligaciones del Distribuidor.
- Artículo 6. Obligaciones del interesado en participar como GDR.
- Artículo 7. Normas supletorias.
- Artículo 8. Confidencialidad de la Información.

7.4.1.2. Autorización y conexión

Se establecen los puntos para cumplir con los requerimientos de conexión y autorización de la puesta en marcha del sistema.

7.4.1.2.1. Del dictamen de capacidad y conexión

Este capítulo detalla el protocolo de solicitud y conexión de la instalación GDR hacia las instalaciones de distribución, obligaciones de los distribuidores para el manejo de la solicitud del interesado, así como los estudios técnicos y el protocolo de manejo ante pérdidas técnicas y su posterior autorización de conexión y operación del GDR por parte de la CNEE.

- Artículo 9. Del procedimiento para el dictamen de capacidad y conexión. Este artículo detalla el procedimiento que el interesado debe seguir para la obtención del dictamen de conexión de parte del distribuidor (CNEE, 2014).
- Artículo 10. De la solicitud del dictamen de capacidad y conexión. Este artículo especifica toda la información y formato de entrega de la documentación necesaria para el formulario de solicitud del dictamen de capacidad y conexión y su posterior entrega al distribuidor (CNEE, 2014).
- Artículo 11. Del dictamen de capacidad y conexión y de los estudios eléctricos. Este artículo especifica los estudios eléctricos necesarios para un funcionamiento óptimo de la red y su utilización para el análisis pertinente (CNEE, 2014).
- Artículo 12. Responsabilidad del Distribuidor.
- Artículo 13. Autorización.

- Artículo 14. Pérdidas técnicas. Dentro de este artículo se establecen las opciones que el sistema GDR debe optar en caso de presentar un aumento de las pérdidas de distribución, previo a su conexión (CNEE, 2014).

7.4.1.2.2. Equipo eléctrico necesario para la conexión

Dentro de este capítulo de la norma NTGDR, se especifican los equipos necesarios para realizar la conexión entre la instalación GDR y el sistema de distribución.

- Artículo 15. Requerimientos de conexión. Se establecen las condiciones generales que se deben cumplir para los proyectos GDR para su conexión al sistema de distribución, como es mostrado en la tabla 9 (CNEE,2014).

Tabla IX. **Tabla de especificación de los requerimientos de conexión**

Tipo de conexión	Capacidad			
	Monofásico (S)	Trifásico		
Características	Menor o igual a 50 kW	Menor o igual a 500 kW	Mayor de 500 hasta 2000 kW	Mayor de 2000 kW hasta 5000 kW
Dispositivos de interrupción (capacidad de interrumpir la máxima corriente de falla)	X	X	X	X(4)
Dispositivo de desconexión de la interconexión (manual, con bloqueo, visible, accesible)	X	X	X	X
Dispositivo de desconexión del generador	X	X	X	X
Disparo por sobretensión	X	X	X	X
Disparo por baja tensión	X	X	X	X
Disparo por sobre/baja frecuencia	X	X	X	X
Chequeo de sincronismo (A: Automático, M: Manual)	X-A/M (1)	X-A/M (1)	X-A (1)	X-A (1)
Disparo por sobre corriente a tierra		X- (2)	X- (2)	X- (2)
Disparo de potencia inversa		X- (3)	X- (3)	X- (3)
Si exporta, la función de la dirección de potencia puede ser usada para bloquear o retrasar el disparo por baja frecuencia			X	X
Disparo por telemetría/transferido				X
Regulador automático de tensión				X- (1)
Disparo por falta de tensión en la red (Relé anti-Isig)	X	X	X	X

Fuente: CNEE (2014). *Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoproduktores con excedentes de energía.*

- Artículo 16. Generadores asíncronos.
- Artículo 17. Fuentes que no generan Energía Eléctrica en Corriente Alterna. Este artículo establece que para aquellos proyectos GDR que presenten una generación de corriente que no sea de naturaleza alterna a la frecuencia del sistema de distribución, será necesario implementar inversores DC/AC, filtrando las perturbaciones generadas por los equipos electrónicos para su conexión (CNEE, 2014).

7.4.1.2.3. Conexión

Se define el formulario de solicitud oficial, así como que tanto los equipos, los materiales y la construcción de instalaciones requeridas para la llegada al punto de Conexión serán obligación del GDR, garantizando el cumplimiento de las normas NTSD y NTDOID. Las pruebas necesarias en la instalación serán obligación del GDR y las acciones a tomar por parte del distribuidor de no ejecutar lo normado. También se especifica el protocolo para definir la fecha de conexión y que las maniobras deben de realizarse únicamente bajo la coordinación y supervisión del distribuidor.

- Artículo 18. Formulario de conexión
- Artículo 19. Construcción de línea y Equipos de Conexión
- Artículo 20. Pruebas de la puesta en Servicio y Evaluación
- Artículo 21. Fecha de conexión
- Artículo 22. Maniobras de conexión

7.4.1.3. Operación y control

Dentro de este capítulo se determinan los puntos de interés para la operación segura y control del sistema durante su funcionamiento.

7.4.1.3.1. Generalidades

A través de los Artículos 23 y 24, se establecen los responsables de operar el sistema con normalidad y en aquellos casos de excepción (emergencia), así como las condiciones que se deben de cumplir para la inyectar energía hacia el punto de conexión y la calidad de energía que esta debe cumplir según las NTSD.

- Artículo 23. Operación
- Artículo 24. Control de la Calidad de energía

7.4.1.3.2. Desconexiones

A través de los artículos 25 y 26, la CNEE estipula las restricciones para la desconexión de las instalaciones GDR, así como la necesidad de que los equipos de desconexión cuenten con un mecanismo visual para las posiciones de cierre y apertura y demás condiciones.

- Artículo 25. Desconexión de las Instalaciones del GDR
- Artículo 26. Dispositivos de desconexión

7.4.1.3.3. Mantenimiento e inspecciones

La comisión nacional de energía eléctrica, dentro de sus artículos 27 al 29, las condiciones y responsabilidades, así como el protocolo a seguir para la realización de mantenimiento de las instalaciones GDR y sistema de distribución. Las inspecciones técnicas hacia el GDR para una operación correcta y el registro de mantenimientos realizados.

- Artículo 27. Mantenimiento
- Artículo 28. Registros de mantenimiento
- Artículo 29. Inspecciones

7.4.1.4. Comercialización

Dentro de este capítulo se establecen los detalles y responsabilidades de los sistemas para poder comercializar energía eléctrica.

7.4.1.4.1. Generalidades

La norma, en sus artículos 30 al 32; establece los requerimientos de medición, para el cumplimiento de la norma de coordinación comercial número catorce del AMM; las opciones de comercializar del GDR, así como la libertad de comercialización con entidades que se consideren convenientes. También se especifica que, de participar en el mercado mayorista o procesos de licitación, el AMM será el ente encargado de calcular su oferta firme y su oferta firme eficiente.

- Artículo 30. Requerimientos de medición de Energía eléctrica
- Artículo 31. Opciones de comercialización
- Artículo 32. Oferta firme y Oferta firme eficiente

7.4.1.4.2. Contratos

La norma establece en sus artículos 33 y 34 los protocolos de contrato de suministro al distribuidor para el GDR en cumplimiento con las bases de licitación dictaminadas por la CNEE y las normas aplicables del AMM; así como el protocolo referente a los contratos de venta de energía dentro del mercado mayorista.

- Artículo 33. Contrato de suministro al distribuidor
- Artículo 34. Contratos de venta de energía eléctrica en el mercado mayorista.

7.4.1.4.3. Peajes

Artículo 35. Peajes. La norma establece las condiciones de tarifas de peaje aplicables para los GDR, bajo los artículos 70 y 65 de la Ley general de electricidad y la Norma de Coordinación Comercial No. 9 (CNEE, 2014).

7.4.2. Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable

El congreso de la república, a través del decreto 52-2003 declara como urgencia e interés nacional desarrollar los recursos renovables y proyectos de esta naturaleza, por lo que establece incentivos fiscales, económicos y administrativos.

Dentro de su artículo 5, Incentivos, el congreso de la república, 2003, establece la exención de derechos arancelarios en lo que se refiere a importaciones, incluyendo el IVA, cargas y derechos consulares de importación

de maquinaria y equipo utilizado para la generación renovable durante un periodo que no excederá diez años; la exención del pago del ISR, por un periodo de diez años desde la fecha inicial de operación comercial; y la exención de impuestos a empresas mercantiles y agropecuarias por un periodo de diez años desde la fecha inicial de operación comercial (Congreso de la república, 2003).

7.5. Análisis económico

Para el análisis económico del sistema se deben calcular indicadores que sean un sustento para la toma de decisiones, estas se detallan a continuación.

7.5.1. Valor presente neto

El valor presente neto (VAN), es la sumatoria de los valores presentes de salidas y entradas de efectivo relacionadas con la inversión en un periodo de tiempo (Ahshan, Al-Abri, Al-Zakwan, Ambu-saidi y Hossain, 2020).

El VAN se calcula usando la ecuación:

$$VPN = \sum_{n=1}^t \frac{FNE_n}{(1+i)^n} - FEO$$

Dónde:

VPN: Es el Valor Actual Neto.

FNE: Flujo neto.

i: Tasa de descuento o costo de capital (TMAR).

t: Periodo de tiempo.

FEO: Inversión inicial.

7.5.2. Tasa Interna de retorno

La TIR determina la tasa a la que la sumatoria de los flujos descontados iguala la inversión inicial de un proyecto. La TIR se calcula poniendo el VAN en cero en la ecuación (Ahshan et al., 2020).

Este valor debe ser comparado con una tasa mínima k , se la tasa que resulta es mayor a la tasa mínima se acepta la inversión (Díaz, 2017).

$$0 = \sum_{n=1}^t \frac{FNE_n}{(1 + TIR)^n} - FEO$$

Dónde:

TIR : Tasa Interna de retorno.

FNE : Flujo neto.

t : Periodo de tiempo.

FEO : Inversión inicial.

7.5.3. Costo nivelado de energía (LCOE)

Es la estimación del valor presente neto del costo unitario de la electricidad durante la vida útil de la tecnología de generación. Los gastos de capital, combustible, desmantelamiento de la planta, financiamiento forman parte de la estimación del LCOE, sin embargo, las tecnologías como la solar fotovoltaica tienen un costo de combustible de cero y muy bajo costo en cuanto a operar y los servicios de mantenimiento se refiere, derivado de ello, el valor de LCOE está determinado por los costos de capital, la vida útil de la instalación, tasa de

financiamiento, tipo de tecnología y la calidad de los recursos hábiles (Bosch, 2022).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Dónde:

$LCOE$: Costo nivelado de cada unidad de electricidad generada.

E_t : Cantidad de unidades de electricidad generadas por la planta en el año t .

C_t : Gasto de capital en el año t .

M_t : Gasto de operaciones y mantenimiento en el año t .

F_t : Gasto de combustibles en el año t .

r : Financiamiento o tasa de interés pagado sobre el capital.

n : Vida útil de la instalación generadora, en años.

7.6. Beneficios

Los beneficios que dejará la implementación de un sistema GDR dentro del estadio pueden ser ambientales y económicos.

7.6.1. Beneficios ambientales (CO₂)

El principal gas contaminante generado por los combustibles fósiles durante el proceso de obtención de energía eléctrica es el CO₂, el cual puede disminuirse con el desarrollo de tecnologías de recursos renovables. Sunearthtools 2015 como se cita en Alvarado (2017), establece que la

generación solar fotovoltaica contribuye en la disminución de gases en un 0,5 Kg de CO₂ por cada kWh generado.

7.6.2. Beneficios económicos

Los beneficios económicos de la aplicación de sistemas fotovoltaicos están relacionados con el ahorro de combustible, pues el precio del recurso solar es gratis, se puede realizar una simple conversión de la cantidad de barriles equivalentes de petróleo (BEP) necesarias para la producción de energía eléctrica. Alvarado (2017) establece que son necesarios 1.6139 BEP para producir 1 MWh de energía eléctrica.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Auditoría Energética

1.1.1 Demanda energética

1.1.2 Consumo energético

1.1.3 Calidad de la energía

1.1.4 Cómo se realiza una auditoría energética

1.2 Fuentes de energía en Guatemala

1.2.1 Fuentes de energía renovable

1.2.1.1 Energía hidráulica

1.2.1.2 Energía eólica

1.2.1.3 Energía biomásica

1.2.1.4 Energía geotérmica

1.2.1.5 Energía solar

1.2.1.5.1 Radiación solar

		1.2.1.5.2	Hora solar pico (HSP) o insolación
1.3	Sistema de generación fotovoltaica		
	1.3.1	Efecto fotoeléctrico	
	1.3.2	Sistema de generación fotovoltaico conectado a la red	
	1.3.2.1	Componentes de un generador fotovoltaico conectado a la red	
	1.3.2.2	Panel solar	
		1.3.2.2.1	Curvas V-P y V-I de los paneles fotovoltaicos
		1.3.2.2.2	Construcción física de los módulos fotovoltaicos
		1.3.2.2.3	Tipos de módulos solares
		1.3.2.2.4	Conexión de paneles solares
		1.3.2.2.5	Eficiencia del panel solar
		1.3.2.2.6	Inclinación y orientación de la instalación fotovoltaica
		1.3.2.2.7	Distancias mínimas entre módulos solares
	1.3.2.3	Inversor	
		1.3.2.3.1	Seguidor del punto de potencia máxima (MPPT)
		1.3.2.3.2	Algoritmo P&O o perturbación y observación
		1.3.2.3.3	Algoritmo de conductancia incremental

	1.3.2.3.4	Parámetros técnicos de un inversor
1.3.2.4	Medidores	
1.3.2.5	Protecciones eléctricas	
	1.3.2.5.1	Fusibles
	1.3.2.5.2	Interruptores termomagnéticos
	1.3.2.5.3	Interruptor diferencial
	1.3.2.5.4	Supresores de tensión o transitorios
	1.3.2.5.5	Caja de concentración o combinadora
1.3.2.6	Estructuras y accesorios	
	1.3.2.6.1	Instalaciones en el suelo
	1.3.2.6.2	Instalaciones en postes o torres
	1.3.2.6.3	Instalaciones en paredes
	1.3.2.6.4	Instalaciones en techos
	1.3.2.6.5	Fuerzas que actúan sobre los paneles fotovoltaicos
	1.3.2.6.6	Velocidad del viento en Guatemala
1.3.3	Dimensionamiento de cableado	
	1.3.3.1	Requerimientos técnicos de cableado de una instalación fotovoltaica
	1.3.3.2	Factores de corrección
	1.3.3.3	Dimensionamiento de cableado según su ampacidad

- 1.3.3.4 Dimensionamiento de cableado por caída de tensión
 - 1.3.3.5 Dimensionamiento de tuberías para cableado
 - 1.3.4 Pararrayos
 - 1.3.5 Sistema de tierra física
- 1.4 Normas y reglamentos para GDR'S
 - 1.4.1 Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía
 - 1.4.1.1 Disposiciones generales
 - 1.4.1.1.1 Acrónimos, siglas y definiciones
 - 1.4.1.1.2 Ámbito de aplicación
 - 1.4.1.2 Autorización y conexión
 - 1.4.1.2.1 Del Dictamen de capacidad y conexión
 - 1.4.1.2.2 Equipo eléctrico necesario para la conexión
 - 1.4.1.2.3 Conexión
 - 1.4.1.3 Operación y control
 - 1.4.1.3.1 Generalidades
 - 1.4.1.3.2 Desconexiones
 - 1.4.1.3.3 Mantenimiento e inspecciones
 - 1.4.1.4 Comercialización
 - 1.4.1.4.1 Generalidades
 - 1.4.1.4.2 Contratos
 - 1.4.1.4.3 Peajes

- 1.4.2 Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de Energía Renovable.
 - 1.5 Análisis económico
 - 1.5.1 Valor presente neto.
 - 1.5.2 Tasa Interna de retorno.
 - 1.5.3 Costo nivelado de energía (LCOE)
 - 1.6 Beneficios
 - 1.6.1 Beneficios ambientales (CO₂)
 - 1.6.2 Beneficios económicos
- 2. METODOLOGÍA
 - 2.1 Tipo de estudio
 - 2.2 Fases de estudio
 - 2.2.1 Fase de exploración bibliográfica
 - 2.2.2 Fase de recolección de datos
 - 2.2.3 Fase de análisis de datos
 - 2.2.3.1 Fase de Caracterización del consumo de energía eléctrica
 - 2.2.3.2 Fase de diseño y dimensionamiento técnico de la instalación fotovoltaica
 - 2.2.3.3 Fase de estudio de la viabilidad económica
 - 2.2.3.4 Fase de beneficios ambientales y económicos del proyecto
 - 2.3 Técnicas de análisis
 - 2.4 Instrumentos de análisis

3. MUESTRA DE CÁLCULO

- 3.1 Cálculo del consumo de energía eléctrica de las instalaciones
- 3.2 Cálculo de las variables de especificación técnica de la instalación fotovoltaica
- 3.3 Cálculo de las variables de análisis económico del proyecto
- 3.4 Cálculo de los beneficios ambientales y económicos del proyecto

4. RESULTADOS

- 4.1 Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

Tipo de estudio: el presente estudio se considera de tipo cuantitativo descriptivo ya que busca especificar las características de un sistema GDR que satisfaga la demanda del estadio Revolución, sometida a un análisis técnico y económico para determinar su viabilidad y beneficios ambientales.

- Fases del estudio
- Fase Exploratoria bibliográfica

Dentro de esta fase se revisará la bibliografía para comprender los fundamentos teóricos del tema de estudio; determinar sus componentes, características y las variables a considerar para ser capaces de realizar el diseño técnico y posterior estudio de viabilidad económica, así como conocer aquellos beneficios ambientales de la implementación de un proyecto GDR.

- Fase de recolección de datos

Ya que lo que se busca es diseñar un sistema GDR fotovoltaico que sea capaz de satisfacer la demanda del estadio Revolución y además vender toda aquella energía generada que no es utilizada a la red de distribución eléctrica, se hace necesario establecer aquellos datos necesarios para su diseño técnico.

Primero, se busca caracterizar el consumo de energía eléctrica dentro del estadio, es decir, conocer cómo ha sido el consumo de sus instalaciones durante los últimos años para poder establecer de una manera más acertada sus

necesidades, estacionalidades de consumo. Para ello se hará la recolección de facturas eléctricas mensuales y se tomarán en cuenta aspectos como facturas de periodos de actividad “normal”, es decir, periodos prepandemia. Esto con el objetivo de representar un consumo que se apegue a la realidad de una instalación utilizada por la comunidad universitaria con actividades presenciales.

Se hace necesario contar con planos para determinar las áreas potenciales para la distribución física de los módulos fotovoltaicos, red eléctrica de las instalaciones e identificar sistemas eléctricos de interés que puedan aportar información necesaria para la investigación.

Esta información será solicitada a través de una petición hacia la entidad competente de la universidad de San Carlos de Guatemala o a través del historial por el número de contador.

- Fase del Análisis de datos
- Fase de Caracterización del consumo de energía eléctrica

Derivado de que la instalación fotovoltaica sea capaz de satisfacer la demanda de energía eléctrica de las instalaciones, se evaluará el consumo en base a su historial de facturas eléctricas mensuales para determinar un consumo más representativo de sus necesidades, para ello se establece el siguiente análisis:

- Ordenamiento de los datos. Una vez obtenidas las facturas eléctricas de las instalaciones, se precederá a ordenarlas por el mes de consumo, es decir, se ordenarán todas las facturas del mes de

enero, todas las del mes de febrero, y así sucesivamente hasta las del mes de diciembre.

- Análisis estadístico. Una vez ordenados los datos, se procederá a realizar un análisis estadístico del consumo de energía eléctrica por cada mes.
 - Se promediará el consumo de energía eléctrica para cada conjunto de facturas, de esta forma se obtendrá un consumo de energía eléctrica representativa para un año promedio de las instalaciones.
 -
 - Luego se determinará la energía eléctrica demandada anualmente por las instalaciones. (sumatoria de la energía eléctrica promedio consumido en todos los meses).
- Fase de Diseño y dimensionamiento técnico de la instalación fotovoltaica

Las variables técnicas del diseño de la instalación fotovoltaica fueron definidas a través del marco teórico, estos determinarán las características eléctricas que deben cumplir y su posterior dimensionamiento y especificación.

- La potencia DC mínima necesaria de generación por los paneles solares estará en función de la carga (Consumo anual de las instalaciones), factor debido a la temperatura, la Hora solar pico y el número de días. Está definida a través de la siguiente ecuación:

$$P_{DC} = \frac{E_{load}}{D_f P_{Sh} N_{Day}}$$

- El cálculo de la temperatura de los paneles solares es necesario para determinar el porcentaje de reducción de la potencia máxima de salida en el panel solar debido a la temperatura, esta está en función de la temperatura ambiente, la intensidad solar promedio del sitio, la intensidad solar en condiciones estándar y la temperatura normal de operación. Esta está definida a través de la siguiente ecuación:

$$T_{Cell} = T_a + \left(\frac{T_{NOCT} - 20^{\circ}C}{S_{NOCT}} \right) S_{Site}$$

- El porcentaje de reducción de la potencia máxima de salida de los paneles solares debido a la temperatura del panel fotovoltaico es fundamental para establecer el factor de reducción debido a la temperatura, este está en función del coeficiente de reducción de potencia máxima por cada $^{\circ}C$ (Dato proporcionado por el fabricante) y la temperatura del panel solar. Esta está definida a través de la siguiente ecuación:

$$P_{module} = \beta(T_{Cell} - 25^{\circ}C)$$

- El factor de reducción debido a la temperatura en el panel solar es necesario para establecer el factor de reducción total del panel solar, ello está en función del porcentaje de reducción de la potencia máxima, y está definida mediante:

$$D_{f,Temp} = 1 - P_{module}$$

- El factor de reducción determinará ese porcentaje de pérdida en la potencia máxima, debido a la temperatura y los componentes.

$$D_f = D_{f, Temp} * D_{f, Comp}$$

- Para el cálculo del área total de los paneles solares se debe tomar la potencia de generación DC, la eficiencia del panel fotovoltaico y la intensidad solar en condiciones estándar. Para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$A_{PV} = \frac{P_{DC}}{\alpha S_{STC}}$$

- Una vez calculada el área de los paneles fotovoltaicos, se debe determinar la cantidad de módulos solares, para ello se tomará el área de un panel solar y se calculará a través de la siguiente ecuación:

$$N_{module} = \frac{A_{PV}}{A_{module}}$$

- Para el cálculo de la cantidad máxima de paneles fotovoltaicos por cada string y filas, se debe determinar el voltaje de salida de los módulos solares debido a la variación de temperatura, esto se realizará a través de:

$$V_{mo} = V_{mo,STC}(1 - k(T_{cell} - 25^{\circ}C))$$

- Se debe determinar la cantidad de paneles solares mínimos y máximos conectados en serie por cada fila para mantenerse dentro del límite de funcionamiento del punto de máxima potencia del inversor. Para ello se utilizarán las siguientes ecuaciones.

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{V_{maxMPP}}{V_{OC}(T_{m\acute{i}n})}$$

$$N_{m\acute{i}n} = \frac{V_{minMPP}}{V_{OC}(T_{m\acute{a}x})}$$

- Para determinar la cantidad de paneles solares por cada fila es necesario tomar en cuenta la potencia a generar por los paneles solares y la potencia que puede manipular el inversor, de esta forma se tendrá otro parámetro para una distribución homogénea de la cantidad de paneles solares que se encuentre dentro del rango calculado en el inciso anterior. Para ello se seguirán los siguientes pasos:
 - Determinar la potencia nominal del inversor
 - Determinar la cantidad de paneles solares necesarios para alcanzar la potencia nominal del inversor.
 - Se establecerá entonces una distribución homogénea con el dato del inciso anterior que cumpla con las condiciones de los límites de mínimo y máximo (N_{min} y $N_{m\acute{a}x}$).

- Una vez establecida la cantidad de paneles por fila, se puede determinar la cantidad de filas del sistema fotovoltaico y los inversores necesarios para todo el sistema.
 - Conociendo las variables técnicas del sistema fotovoltaico se puede proceder a las especificaciones de los demás elementos del sistema (Inversor, estructuras, protecciones, entre otros).
 - De la misma forma que el inciso anterior, se deben establecer las características del calibre de cables y tuberías de la instalación.
 - Por último, se debe estimar la producción mensual y anual del sistema GDR, tomando en cuenta la degradación del panel solar, cuidando el límite de área disponible para la planta dentro del estadio.
- Fase de Estudio de la viabilidad económica

Las variables económicas que se utilizarán para el estudio de viabilidad económica se establecieron dentro del marco teórico, para ello se deben primero calcular las variables necesarias, estas se presentan a continuación:

- Se deberá realizar un listado con todo el equipo necesario en la instalación. (paneles solares, inversores, cableado, tubería, entre otros).
- Una vez realizado el inciso anterior, se procederá a investigar a través de cotizaciones o internet los precios del equipo, gastos de

instalación y mano de obra, gastos de operación y mantenimiento del proyecto.

- Luego se establecerán los costos totales, y equivaldrá a la inversión del proyecto.
- Se debe determinar el costo por kWp instalado, para ello se utilizarán los datos de potencia instalada y el total de la inversión inicial.

$$Costo_{kW} = \frac{Inversión_{inicial}}{P_{Instalada}}$$

- Será necesario determinar el costo de la energía consumida por la instalación a lo largo de los años como base para determinar un valor representativo que pueda ser utilizado para determinar el costo de la energía generada por el sistema, ello se hará con ayuda de los pliegos tarifarios de la comisión nacional de energía eléctrica.
- Se calculará el costo de la energía generada por el sistema a lo largo de los años, con la ayuda de la proyección de energía generada por la instalación y el costo de la energía calculada en el inciso anterior. Esto equivaldrá al total de los ahorros monetarios por la no compra de energía y los ingresos producto de la venta hacia la red de distribución.
- Teniendo calculado los incisos anteriores se procederá a realizar el cálculo del valor presente neto con ayuda del software Excel, aplicando la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{n=1}^t \frac{FNE_n}{(1+i)^n} - FEO$$

- De la misma forma que el inciso anterior, se determinará la tasa interna de retorno del proyecto, a través de la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{n=1}^t \frac{FNE_n}{(1+TIR)^n} - FEO$$

- Una vez determinado los incisos anteriores, se puede determinar el tiempo estimado en el cual se tendría el retorno completo de la inversión, para ello se utilizarán tablas de amortización.
- Por último, se determinará el costo nivelado de energía con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

- Fase de la Estimación de los Beneficios ambientales y económicos del sistema fotovoltaico.

Como consecuencia de la implementación del proyecto, se puede realizar una estimación de los beneficios económicos por la no compra de combustibles fósiles para la planta de generación, así como la cantidad de dióxido de carbono no emitidos a la atmósfera, para ello se aplicará los siguiente:

- Se determinará la cantidad de tonelada de CO₂ no emitidas a la atmosfera con la ayuda de la cantidad de energía generada anualmente y el valor de las emisiones de dicho gas por cada kWh, el cual es de 0.5 kg/kWh, para ello se aplicará la siguiente ecuación:

$$TON_{CO_2, \text{anuales}} = \frac{E_{gen} * 0.5}{1000}$$

Como parte de que el costo del recurso solar es cero, se puede determinar cómo ahorro por combustible el costo de los barriles equivalentes de petróleo (BEP), para ello se hará uso del factor de conversión de la cantidad de BEP's necesarios para producir 1 MWh de energía y su precio en el mercado petrolero.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Las técnicas de análisis de información serán planteadas en base a las características de los datos, variables y los objetivos que se desean alcanzar.

El primer objetivo que se desea alcanzar es la caracterización del consumo energético de las instalaciones a lo largo de los años, evaluar su comportamiento mensual y anual, esto para conocer de forma más representativa y realista las necesidades a cubrir por parte del sistema. Este estudio se realizará a partir del historial de facturas eléctricas. Por ello se establece realizar un análisis estadístico descriptivo, evaluando estadísticos de interés y gráficas que muestren de forma más visual dicho comportamiento.

Para el alcance del segundo objetivo se plantea realizar un análisis teórico, descriptivo y cuantitativo para establecer el diseño técnico de la instalación GDR, evaluando ecuaciones para el dimensionamiento de todos los equipos y su descripción técnica. Para conocer la generación de energía generada se establece un análisis predictivo dentro del periodo de la vida útil de los paneles solares, utilizando un porcentaje de reducción de generación debido a su degradación física.

Para el alcance del tercer objetivo, se establece realizar un análisis teórico cuantitativo y de predicción, debido a que se desea realizar un análisis económico del proyecto, evaluando variables teóricas económicas, flujos de caja y tablas de amortización que describan a futuro los ingresos por generación y eventual retorno de la inversión realizada.

Para el alcance del último objetivo, se realizará un análisis teórico cuantitativo para determinar la cantidad de dióxido de carbono y cantidad de barriles equivalentes de petróleo a través de la aplicación de ecuaciones en función a la energía generada por la instalación.

Las herramientas de análisis de la información de los estudios serán manejadas a través de tablas, gráficas, y distintos softwares para la simplificación de su manejo y la búsqueda de su presentación de forma visual para su mejor entendimiento.

Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

- Tablas de datos de los consumos mensuales de energía
- Diagramas de barras de los consumos mensuales
- Memorias de cálculo del diseño GDR
- Tablas de detalles de energía generada por el sistema
- Planos eléctricos del sistema GDR y de visualización de disposición física del sistema en las instalaciones.
- Tablas de detalles de costos del proyecto.
- Tablas de detalles de los costos de venta de energía.
- Tablas amortización del proyecto.
- Software Microsoft office.
- Software AutoCAD.

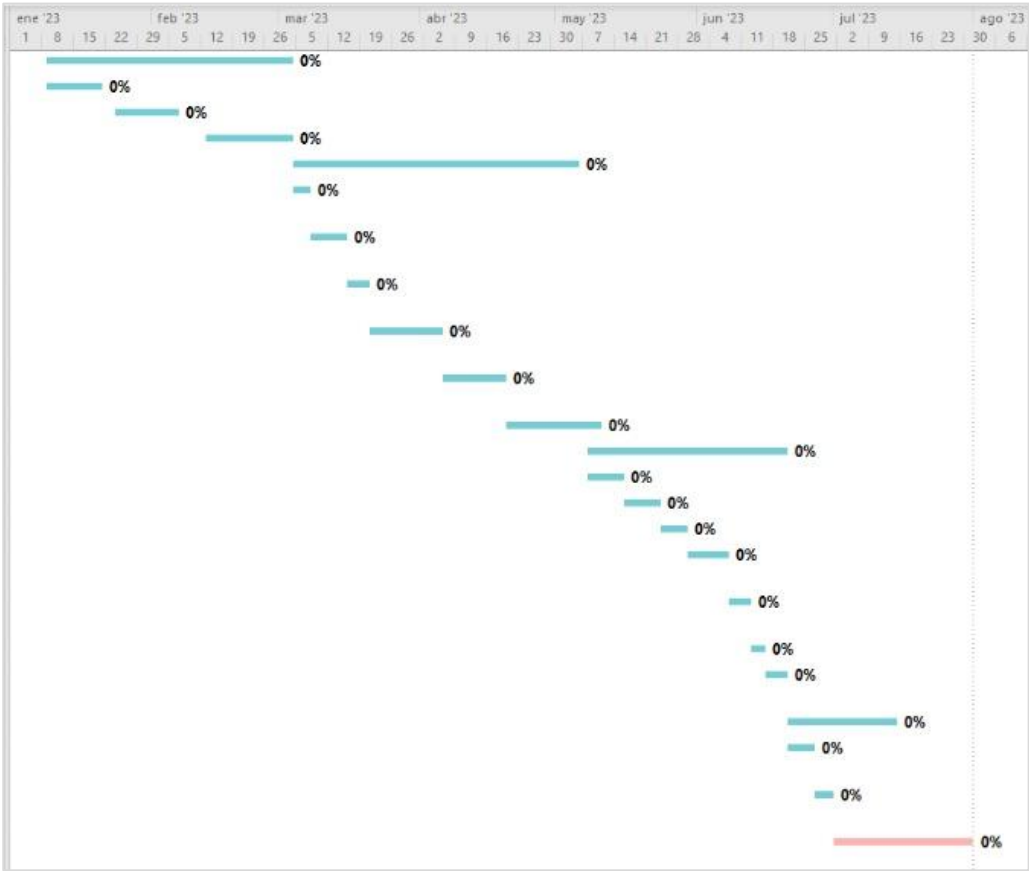
11. CRONOGRAMA

Se presenta el cronograma propuesto, el cual describe el periodo de implementación de la metodología y actividades a realizar para el alcance de cada uno de los objetivos y elaboración del informe final, se tiene estimado realizar la recolección de datos en 4 semanas, análisis y evaluación de los resultados en 14 semanas y la elaboración del informe final en un periodo de 6 semanas, para un periodo total de 6 meses.

Figura 15. Cronograma de actividades

Modo de	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Nombres de los recursos	T/R
	FASE 1	2 mss	lun 9/01/23	vie 3/03/23		
	Recolección de datos	10 días	lun 9/01/23	vie 20/01/23	Humano	
	Ordenamiento de los datos	10 días	mar 24/01/23	lun 6/02/23	Humano	
	Análisis estadístico de los datos	15 días	lun 13/02/23	vie 3/03/23	Técnicos	
	FASE 2	46 días	sáb 4/03/23	vie 5/05/23		
	Analizar el área disponible en las instalaciones	3 días	sáb 4/03/23	mar 7/03/23	Humano/Técnico	
	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	6 días	mié 8/03/23	mié 15/03/23	Humano/Técnico	
	Especificaciones de los equipos del sistema fotovoltaico	3 días	jue 16/03/23	lun 20/03/23	Humano/Técnico	
	Dimensionamiento de los equipos y sistemas de protección	12 días	mar 21/03/23	mié 5/04/23	Humano/Técnico	
	Dimensionamiento de cables y tuberías	10 días	jue 6/04/23	mié 19/04/23	Humano/Técnico	
	Elaboración de planos	15 días	jue 20/04/23	mié 10/05/23	Técnico	
	FASE 3	32 días	lun 8/05/23	mar 20/06/23		
	Elaboración del listado de equipos	6 días	lun 8/05/23	lun 15/05/23	Humano/Técnico	
	Cuantificación de los equipos	6 días	mar 16/05/23	mar 23/05/23	Humano/Técnico	
	Cotización de los equipos	4 días	mié 24/05/23	lun 29/05/23		
	Análisis del costo de energía consumida	7 días	mar 30/05/23	mié 7/06/23	Humano/Técnico	
	Análisis del costo de energía generada	3 días	jue 8/06/23	lun 12/06/23	Humano/Técnico	
	Análisis económico	3 días	mar 13/06/23	jue 15/06/23	Humano/Técnico	
	Elaboración de tablas de amortización	3 días	vie 16/06/23	mar 20/06/23	Humano/Técnico	
	FASE 5	18 días	mié 21/06/23	vie 14/07/23		
	Elaboración de la tabla de energía generada	4 días	mié 21/06/23	lun 26/06/23	Humano/Técnico	
	Determinación de las toneladas de CO2	4 días	mar 27/06/23	vie 30/06/23	Humano/Técnico	
	Elaboración de informe final	22 días	sáb 1/07/23	lun 31/07/23	Humano/Técnico	

Continuación de la figura 15.



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación, como se puede observar a través del cronograma, es posible realizarlo en seis meses, pues en su mayoría, es un estudio de análisis teórico y no se depende de una gran cantidad de variables de recolección que sean de difícil obtención, de la misma forma que no se depende de mediciones realizadas por el investigador.

Para la recolección de facturas de consumo eléctrico y planos de las instalaciones se debe realizar una petición hacia las autoridades correspondientes de la universidad de San Carlos de Guatemala, para poder utilizarlos dentro de la investigación. El cumplimiento de los objetivos y la implementación de la metodología, en su mayoría, utilizarán recursos técnicos y humanos, con los cuales ya se cuentan a excepción de una impresora, y tendrá un costo a considerarse. Para el financiamiento de la investigación, se realizará con recursos propios.

Es importante considerar la problemática que atraviesa la universidad hoy en día, debido a que al momento no es posible la recolección de datos por la falta de acceso a las instalaciones, a pesar de ya contar con el acercamiento hacia las autoridades y la aprobación (oral), para su obtención y uso para el presente estudio.

Esto podría significar un atraso en el análisis de los datos de consumo, pero, por la naturaleza teórica del análisis, se podría preparar todo el proceso de metodológico (Configuración de hojas de cálculo, estructuración de memorias de cálculo, entre otros), para cuando se tenga acceso a los datos, únicamente

ingresarlos y obtener los resultados de las variables técnicas para poder continuar con el proceso de dimensionamiento de los equipos de la instalación.

A continuación, se presenta una pequeña tabla con el objetivo de representar los gastos y recursos a utilizar.

Tabla X. **Tabla de recursos del estudio de investigación**

Recursos	¿Se cuenta con dicho recurso?	Costo
Computadora	Si	-----
2 resma de hojas	No	Q 120.00
Impresora	No	Q 1000.00
Tinta impresora	No	Q 300
Microsoft Office	Sí	-----
AutoCAD estudiantes	Sí	-----

Fuente: elaboración propia.

Considerando lo anterior, se determina que el desarrollo del estudio de investigación que se plantea es factible para su desarrollo.

13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista (2021). *Informe estadístico anual*. Guatemala: Autor.
2. Ahshan, R., Al-Abri, R., Al-Zakwani, H. y Ambu-saidi, N. (2019). Solar PV System Design for a Sports Stadium. 2019 IEEE 10th GCC Conference & Exhibition, 1–6. Kuwait: IEEE. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/GCC45510.2019.1570520864>
3. Albarracín, R. (2010). *Compensación de sobretensiones en redes eléctricas con generadores fotovoltaicos* (tesis de maestría). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/237062364>
4. Albo, P. Álvarez, A. Iturralde, L. y Monteagudo, J. (2021). *Propuesta de evaluación y montaje de un Sistema Solar Fotovoltaico para la Universidad de Cienfuegos* (tesis de licenciatura). Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/357183886>
5. Alvarado, L. (2017). *Diseño preliminar de los sistemas de generación fotovoltaica y su protección eléctrica para los edificios de la escuela de ciencias de la comunicación de la universidad de san Carlos de Guatemala* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis17/T13687.pdf>

6. Alvarado, H. (2017). *Diseño preliminar de un sistema de generación fotovoltaica y su protección eléctrica para los edificios S9, S10, S11 y S12 de la universidad de San Carlos de Guatemala* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6193/1/Hugo%20Leonel%20Alvarado%20Soto.pdf>
7. Anleú, J. (2017). *Procedimiento para análisis de presiones de viento sobre estructuras de alta, media y baja altura, basado en las normas AGIES y ASCE 7-10* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6244/1/Jeffrey%20Jos%C3%A9%20Anle%C3%BA%20Ruiz.pdf>
8. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica -AGIES-. (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Guatemala: Autor.
9. Blanco, A., y Gutiérrez, J. (2019). *Estudio de eficiencia energética en el sistema eléctrico del hospital Antonio Lenin Fonseca, ubicado en el departamento de Managua* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Managua. Recuperado de <http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/2821>
10. Bosch, J. (2022). *Levelised cost of electricity*. Recuperado de https://cdn.cleanpowerhub.net/Misconceptions/2.2_LCOE.pdf

11. Buele, C. Chazi, A. (2019). *Modelación del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica en la universidad politécnica salesiana sede cuenca* (tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18210/1/UPS-CT008653.pdf>
12. Chis, S. (2021). *Estudio de eficiencia energética y calidad de energía del edificio, Flor del café, zona 1, ciudad de Guatemala* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis21/T15832.pdf>
13. Chuquín, L. (2019). *Propuesta técnica para el mejoramiento de la eficiencia energética eléctrica en el hospital San Luis de Otavalo*. (tesis de licenciatura). Universidad Técnica del Norte, Ibarra. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9965>
14. Comisión Nacional de Energía Eléctrica – CNEE - (2014). *Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable – NTGDR – y usuarios autoprodutores con excedentes de energía*. 24-10-2008. Guatemala: Autor.
15. Corona, S. (2021). ¿Supresor de picos o regulador de voltaje? Protege tus dispositivos en todo momento [Mensaje en un blog]. Recuperado de

<https://blogespanol.se.com/residencial/2021/03/25/supresor-de-picos-o-regulador-de-voltaje-protege-tus-dispositivos-en-todo-momento/>

16. Díaz, C. (2017). *Diseño preliminar de un sistema de generación fotovoltaico y sistema de protección eléctrica, para la facultad de ciencias químicas y farmacia, universidad de San Carlos de Guatemala* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis17/T13714.pdf>
17. Dirección General de Energía (2018). *Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala*. Guatemala: Autor.
18. Echeverría, N. Judewicz, M. Murcia, G. Strack y J. González, S. (2014). *Algoritmo MPPT de Conductancia Incremental con Doble Cota*. Anales del XXIV Congreso Argentino de Control Automático AADECA. Congreso llevado a cabo en Buenos Aires, Argentina.
19. Enríquez, G. (2011). *El ABC de las instalaciones eléctricas en edificios y comercios*. Ciudad de Mexico, Mexico: Limusa.
20. Fernández, J. (2009). *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil* (tesis de licenciatura). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6037>
21. Frias, G. Asensio, M. y Catuogno, G. (2017). *Comparación de algoritmos MPPT de perturbación y observación de paso ajustable y de paso fijo aplicado a un aerogenerador aislado de la red*. XVII Reunión de

Trabajo en procesamiento de la Información y Control -RPIC-.
Congreso llevado a cabo en Mar de Plata, Argentina.

22. Gómez, C. (2021). *Análisis de la importancia de la eficiencia energética en los hospitales* (tesis de licenciatura). Universidad de Cantabria, Santander. Recuperado de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/22083/C GC.pdf?sequence=1>
23. Granda, E. Orta, O. Díaz, J. Jiménez, M. Osorio, M. y González, M. (2013). *Modelado y simulación de celdas y paneles solares*. Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica Electro2013. Congreso llevado a cabo en Chihuahua, Mexico.
24. Haverland (2022). Qué es un interruptor diferencial y cómo funciona [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://haverland.com/2020/02/21/que-es-un-interruptor-diferencial-y-como-funciona/>
25. Laj, E. (2011). *Análisis y diagnóstico de las instalaciones eléctricas del antiguo hospital de emergencias del IGSS zona 13* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0788_EA.pdf
26. Lata, J. (2015). *Estimación del potencial urbano de sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Guayaquil* (tesis de maestría). Universidad del país vasco, Leioa. Recuperado de

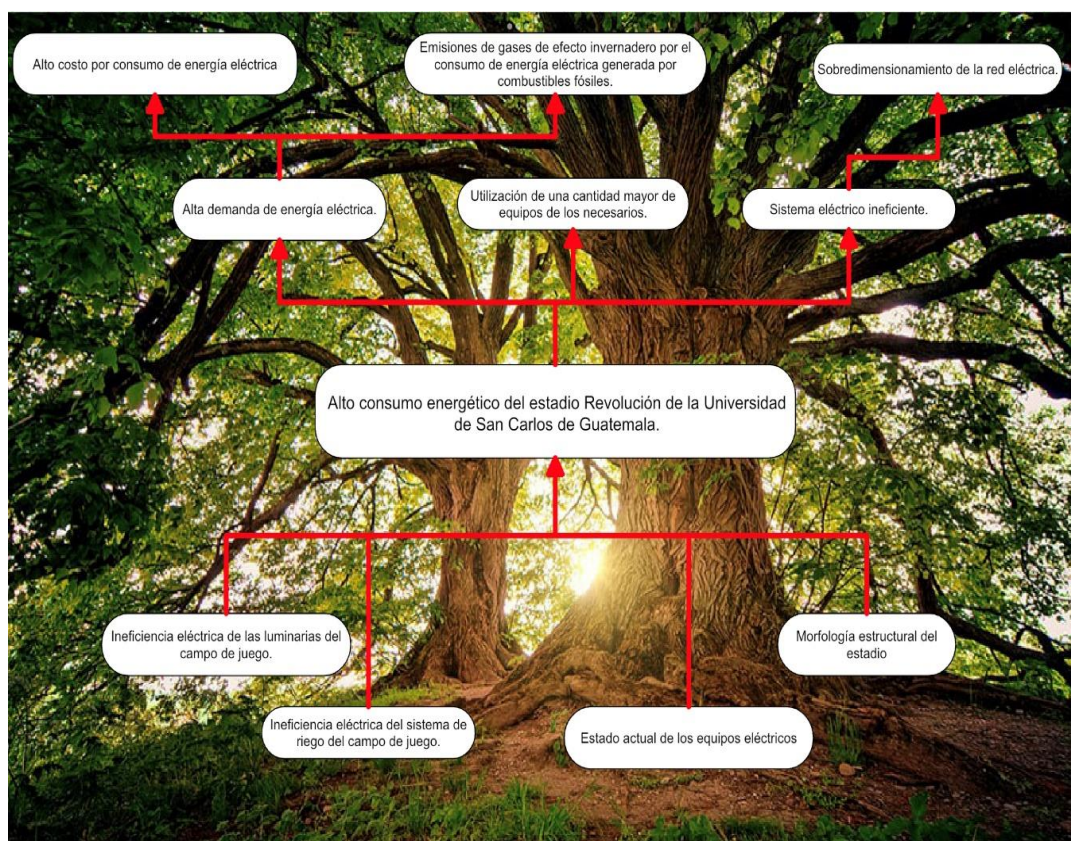
https://www.researchgate.net/figure/Sistema-fotovoltaico-conectado-a-la-red_fig27_280959999

27. Maghfuri, A. y Chiasson, A. (2020). *Design and Simulation of a Solar Photovoltaic System for a Sports Stadium*. 9th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE). Conferencia llevada a cabo en Londres, Reino Unido.
28. Miguel C. (2015). *Diseño e implementación de un sistema automático de purificación de agua por medio de energía, reflexión solar y luz ultravioleta* (tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10492/1/CD-6212.pdf>
29. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Informe General 2020*. Guatemala: Autor.
30. National Aeronautics and Space Administration (1997). *Prediction of Worldwide Energy Resources*. USA: NASA. Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov/>
31. National Fire Protection Association (2005). *National Electrical Code - NEC- Conductors for General Wiring*. Massachusetts: Autor.
32. R, José. (2022). Cómo funciona un interruptor termomagnético [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://como-funciona.co/un-interruptor-termomagnetico/>

33. Rodríguez, M. y Cervantes, J. (2006). El efecto fotoeléctrico. CIENCIA ergo-sum, *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 13(3), 303-311. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10413309>
34. Romero, I. Navntoft, C. Biurrún, N. Cristófalo, M. Cuccorese, S. Defferrari, I. y Raggio, D. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*. Argentina: Secretaría de Gobierno de Energía. Recuperado <https://www.researchgate.net/publication/350142106>
35. Saad M. Aboubakr El H. & Abdelaziz El G. (2019). *The Most Used MPPT Algorithms: Review and the Suitable Low-cost Embedded Board for Each Algorithm*, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118983>
36. Sánchez, A. (2017). *Estructuras para módulos fotovoltaicos* [Diapositiva PowerPoint]. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/133140/>
37. Tomas, G. (2004). *Actualización de mapa isoceraunico de Guatemala y su influencia en las líneas de transmisión* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0518_EA.pdf

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de EcuRed (2021). *Árbol*. Consultado el 15 de junio de 2022. Recuperado de <https://www.ecured.cu/%C3%81rbol>.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Título tentativo: diseño de investigación para el análisis de viabilidad de un sistema fotovoltaico GDR en el Estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Planteamiento del Problema.	Objetivos.	Variables e Indicadores	Diseño	Instrumento	
Pregunta General. ¿Cómo evaluar la viabilidad de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico dentro del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala?	Objetivo General. Evaluar la viabilidad de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico dentro del estadio Revolución de la Universidad de San Carlos de Guatemala.	Variable Independiente. Energía Generada(kWh/mes). Indicadores. <ul style="list-style-type: none"> Cantidad de paneles solares. Eficiencia de los paneles solares (en porcentaje). Recurso solar promedio incidente en (kWh/m²/día). Tiempo de 	Método: Descriptivo Nivel de estudio: Descriptivo. Diseño: Pronóstico.	Predicciones mundiales de fuentes de energía de la NASA https://power.larc.nasa.gov/ Historial de consumo de energía eléctrica proporcionada por la Universidad. Inventario de equipos. Planos del estadio. Cotizaciones de materiales. Pliego CNEE https://www.cnee.gob.gt/Calc	Eficiencia del panel solar: $\eta = \frac{P_{max}}{A_t \cdot E_t}$ Cantidad de paneles solares. $\# \text{ Paneles} = \frac{P_{generar}}{P_{panel}}$ HSP. $HSP = \frac{R_{incidente}}{STC}$ $STC = 1000 \text{ W/m}^2$

Continuación del apéndice 2.

		generación (HSP)(h/día).		uladora/pliegos.php	
Pregunta Específica 1.	Objetivo Específico 1.	Variable Dependiente.			
¿Cómo caracterizar el consumo energético de los sistemas del estadio revolución?	Caracterizar el consumo energético de los sistemas actuales utilizados dentro del estadio Revolución a través de sus facturas de energía eléctrica.	<p>Energía consumida (kWh/mes)</p> <p>Indicadores.</p> <ul style="list-style-type: none"> Energía consumida en las facturas eléctricas (kWh/mes) características eléctricas de los equipos. 			
Pregunta Específica 2.	Objetivo Específico 2.	Variables Independientes			
¿Qué variables técnicas se deben considerar para el diseño de un sistema generador distribuidor renovable	Analizar las variables técnicas para el diseño de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico para el	<p>Potencia del sistema (kW)</p> <p>Energía del sistema (kWh/día).</p> <p>Características eléctricas del inversor.</p>			

Continuación del apéndice 2.

fotovoltaico del estadio?	estadio Revolución.	Voltaje, potencia, entre otros.			
Pregunta Específica 3.	Objetivo Específico 3.	Variable Dependiente.			
¿Cuál es la viabilidad económica de un sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico del estadio?	Determinar la viabilidad económica de un sistema distribuidor generador renovable fotovoltaico para el estadio Revolución.	<p>Viabilidad.</p> <p>Indicadores.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valor Presente Neto (VPN) en quetzales (Q). • Tasa Interna de Retorno (TIR). • Costos del proyecto en quetzales (Q). • Energía inyectada a la red (kWh/mes). • Precio de venta de energía eléctrica inyectada a la red (Q/kWh). • LCOE 			<p>Valor Presente Neto.</p> $VAN = \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$ <p>Tasa Interna de Retorno.</p> $VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t}$

Continuación del apéndice 2.

Pregunta específica 4.	Objetivo Específico 4.	Variable Dependiente.			
¿Qué beneficios ambientales se tendrían al implementar el sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico ?	Estimar la cantidad de dióxido de carbono equivalentes evitadas a la atmósfera a partir de la implementación del sistema generador distribuidor renovable fotovoltaico.	<p>Toneladas anuales de CO₂.</p> <p>Indicadores.</p> <ul style="list-style-type: none"> Factor de emisión de CO₂ (kg/kWh). Energía generada (kWh/año) 			<p>Cálculo de dióxido de carbono.</p> $CO_2 = E_{gen} * F_{emisión} (Ton/año)$

Fuente: elaboración propia.