



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA
GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
MEDIANTE SELECCIÓN DE PROVEEDORES**

Brandon Leonel Atz Bar

Asesorado por la MSc. Inga. Ismelda Isabel López Tohom

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA
GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
MEDIANTE SELECCIÓN DE PROVEEDORES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BRANDON LEONEL ATZ BAR

ASESORADO POR LA MSC. INGA. ISMELDA ISABEL LÓPEZ TOHOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

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. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA
GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
MEDIANTE SELECCIÓN DE PROVEEDORES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 21 de noviembre de 2021.

Brandon Leonel Atz Bar



EEPFI-PP-0074-2022

Guatemala, 12 de enero 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 LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA MEDIANTE SELECCIÓN DE PROVEEDORES**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica. - Diseño, operación y regulación de proyectos energéticos con recursos renovables**, presentado por el estudiante **Brandon Leonel Atz Bar** carné número **201503745**, 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 Gestion De Mercados Electricos Regulados.

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

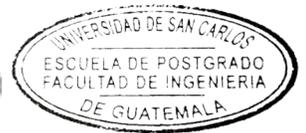
Atentamente,

"Pd. y Enseñad a Todos"

Ing. Isabel López Tohom
Cel. 5543

Mtro. Ismelda Isabel López Tohom
Asesor(a)

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



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



Firmado digitalmente por Isabel Lopez
DN: cn=Isabel Lopez, o=Universidad de San Carlos, ou=UMG, email=isabellopez@gmail.com
Motivo: Estoy aprobando este documento
Ubicación:
Fecha: 2022-01-17 12:53:06-00



EEP-EIME-0074-2022

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 LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA MEDIANTE SELECCIÓN DE PROVEEDORES**, presentado por el estudiante universitario **Brandon Leonel Atz Bar**, 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

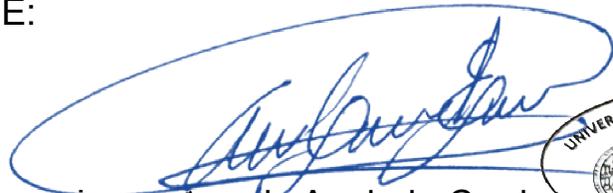
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.247.2022

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 LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA MEDIANTE SELECCIÓN DE PROVEEDORES**, presentado por: **Brandon Leonel Atz Bar**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
Mis padres	Por haberme traído al mundo y guiado a través de él, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
Mis hermanas	Mariel y Dayana Atz, por su apoyo y compañía durante mi vida.
Mis abuelos	Por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda mi vida.
Familia y amigos	

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <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.
Mis amigos de la carrera de licenciatura y maestría	Por haberme acompañado durante la carrera y compartir muchas experiencias y conocimientos.
Mi asesor	MSc. Ing. Ismelda Isabel López Tohom, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Descripción del problema	7
3.2. Formulación del problema	7
3.3. Delimitación del problema	8
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Cadenas de suministro	15
7.1.1. Definición de cadena de suministro	15

7.1.2.	Composición de la cadena de suministro	17
7.1.2.1.	Procesos de transformación en la cadena de suministro	17
7.1.2.2.	Proveedores	18
7.1.2.3.	Transporte	18
7.1.2.4.	Producción	19
7.1.2.5.	Demanda.....	19
7.1.3.	Aplicación en proyectos de generación de energía eléctrica fotovoltaica	20
7.2.	Energía solar fotovoltaica.....	22
7.2.1.	Potencial solar en Guatemala	22
7.2.2.	Componentes de una central fotovoltaica.	23
7.2.2.1.	Paneles fotovoltaicos	23
7.2.2.2.	Inversor de corriente directa a corriente alterna	25
7.2.2.3.	Cajas de conexión.....	26
7.2.2.4.	Estructura de soporte	27
7.2.2.5.	Cableado eléctrico.....	28
7.2.2.6.	Elementos de protección.....	29
7.2.2.7.	Sistema de monitoreo	29
7.2.3.	Recomendaciones técnicas para selección de componentes.....	30
7.3.	Marco regulatorio en Guatemala.....	32
7.3.1.	Ley General de Electricidad	32
7.3.2.	Reglamento de la Ley General de Electricidad	33
7.3.3.	Incentivos para proyectos con energía renovable ...	34
7.4.	Generación distribuida renovable.....	35
7.4.1.	Descripción.....	35
7.4.2.	Tipos de operación comercial.....	36

	7.4.2.1.	Comercializando con distribuidores	37
	7.4.2.2.	Participando directamente en el mercado mayorista	37
	7.4.3.	Requerimientos técnicos	39
7.5.		Metodología.....	40
	7.5.1.	Proceso analítico jerárquico.....	40
	7.5.2.	Identificación del problema y definición del objetivo	42
	7.5.3.	Identificación de criterios y alternativas	42
	7.5.4.	Elaboración de árbol de jerarquías	43
	7.5.5.	Evaluación del modelo.....	43
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	45
9.		METODOLOGÍA.....	49
	9.1.	Características del estudio	49
	9.2.	Unidades de análisis	49
	9.3.	Variables.....	50
	9.4.	Fases del estudio	52
	9.4.1.	Fase 1: Revisión bibliográfica	52
	9.4.2.	Fase 2: Acercamiento y recolección de información proveniente de la Asociación de Generadores con Energía Renovable.	52
	9.4.3.	Fase 3: Recolección de información proveniente de proveedores de paneles solares, estructuras de soporte o inversores de potencia.....	54
	9.4.4.	Fase 4: Elaboración de matrices de comparación de criterios y determinación de su importancia.....	55
	9.5.	Resultados esperados	59

10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	61
11.	CRONOGRAMA	63
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	65
13.	REFERENCIAS	67
14.	APÉNDICES	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	14
2.	Etapas de la cadena de suministro	16
3.	Cadena de suministro de la energía solar en Colombia.....	22
4.	Módulos fotovoltaicos según estructura cristalina	24
5.	Estructura de Soporte	27
6.	Cuarto de inversores	32
7.	Árbol de Jerarquía.....	43

TABLAS

I.	Clasificación de módulos fotovoltaicos y su eficiencia	25
II.	Variables	50
III.	Definición de variables	51
IV.	Base de datos de proveedores	55
V.	Matriz de comparación de criterios	56
VI.	Escala de calificación para matriz de comparación de criterios	56
VII.	Ejemplo de matriz de comparación de criterios.....	57
VIII.	Matriz de comparación de alternativas.....	57
IX.	Escala de calificación para matriz de comparación de alternativas	58
X.	Presentación del valor de las alternativas	58
XI.	Listado de proveedores.....	59
XII.	Cronograma	63
XIII.	Recursos necesarios para la investigación	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
h	Horas
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
kV	Kilovoltio
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
m	Metro
m²	Metro cuadrado
mm	Milímetro
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
W	Vatio
V	Voltio

GLOSARIO

AHP	Proceso analítico jerárquico.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Corriente alterna	Corriente eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente.
Corriente directa	Corriente eléctrica que no cambia de sentido con el tiempo.
Energía solar	Energía renovable obtenida del sol.
GDR	Generador Distribuido Renovable.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IEMA	Impuesto a las empresas mercantiles y agropecuarias.
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada.

INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
IVA	Impuesto al valor agregado.
NCC	Norma de Coordinación Comercial.
NTGDR	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores.
Precio Spot	Costo del MWh en Guatemala.
PWM	Modulación por ancho de pulsos.
Red trifásica	Red eléctrica constituida por tres corrientes alternas desfasadas.
SFCR	Sistema Fotovoltaico de Conexión a Red.
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.
Vatio	Unidad de medida de potencia.

RESUMEN

Dentro del marco legislativo guatemalteco y en la actual industria energética nacional existe la figura del generador distribuido renovable, la cual debe cumplir ciertos requisitos conforme el reglamento de la Ley General de Electricidad. Dos de los requisitos esenciales son que su potencia no sea mayor a 5 MW y que utilice las fuentes renovables definidas por el Ministerio de Energía y Minas, como la solar fotovoltaica.

Sin embargo, durante el diseño y operación de un GDR, resulta indispensable la adquisición de la tecnología necesaria para lograr la conversión de energía solar a energía eléctrica, proceso el cual, se lleva a cabo mediante los proveedores que componen las cadenas de suministro disponibles en la región y normalmente no es realizado personal especializado en ingeniería y en la normativa aplicable.

Debido a esto, se plantea el cuestionamiento sobre las acciones que se deben llevar a cabo para mejorar la cadena de suministro mediante la selección adecuada de proveedores. Es en respuesta al cuestionamiento anterior que, mediante entrevistas estructuradas, se inicia identificando a los proveedores importadores de paneles fotovoltaicos en Guatemala, junto con las características de su oferta para poder analizarla mediante técnicas adecuadas y brindar los resultados para que el lector tenga una visibilidad del mercado.

Adicionalmente, se proponen los procedimientos para la selección de los proveedores de paneles solares, estructuras de soporte e inversores de potencia que tomen en cuenta los criterios desarrollados por las personas que forman

parte de la industria y que han adquirido importancia a través de la experiencia. Estos objetivos se alcanzan mediante entrevistas estructuradas, cuestionarios estandarizados y la aplicación de técnicas de decisión multicriterio tales como el proceso analítico jerárquico. Consecuentemente, se presentarán los árboles de jerarquía y su utilización en la evaluación de las alternativas disponibles.

1. INTRODUCCIÓN

El tema de la investigación es la mejora de la cadena de suministro para generación distribuida renovable con energía solar fotovoltaica mediante la selección de proveedores, lo cual adquiere gran importancia en el interior de una empresa del sector y en la línea de investigación de diseño, operación y regulación de proyectos energéticos con recursos renovables. La importancia del tema a investigar radica en la necesidad de llevar a cabo un reconocimiento de la oferta disponible del equipamiento necesario para el aprovechamiento del recurso solar y en la elaboración de estrategias para conformar una cadena de suministro sólida y orientada a la calidad de los productos.

Sin embargo, debido a que durante el proceso de adquisición tradicional se pueden obtener resultados no deseados, se pretende abordar la problemática relacionada desde un enfoque mixto, que buscará describir el mercado y su oferta, con relación a paneles solares, para que los estrategas comerciales puedan utilizar estos resultados para elaborar su política de abastecimiento y planificar los proyectos energéticos que puedan estar en su portafolio.

Además, se considera que la elección de las mejores alternativas de equipos de entre toda la oferta de mercado juega un papel muy importante en la operación de una central de generación, solar fotovoltaica en este caso, que debe ser un proceso guiado por una técnica de decisión multicriterio para que las expectativas generadas durante la etapa de diseño de la central pasen al plano de la realidad sin inconvenientes y, sobre todo, se mantengan en ese estado durante su vida útil o más. Es por esta razón, que se recopilan los criterios de las personas especialistas cuya experiencia los consolida para lograr el buen

funcionamiento de la central y una operación con pocos eventos de interrupción en la generación de energía eléctrica.

La característica novedosa de este trabajo es el análisis de la cadena de suministro de los componentes esenciales en una instalación solar fotovoltaica y la aplicación de técnicas de análisis de multicriterio a la elección de las alternativas ofrecidas por las diversas cadenas de suministro disponibles. Puesto que, durante toda la vida operativa de la central, cada uno de los equipos tendrá impacto en la producción e inyección de energía al sistema de distribución y, por consiguiente, en la venta de energía en el mercado mayorista o en la venta a un distribuidor; ambos caminos orientados a cumplir con los requerimientos de gestión de un mercado regulado.

Se producirá un capítulo correspondiente al marco referencial en el cual se abordarán los antecedentes de la investigación que tengan relevancia con respecto al tema investigado. De igual manera, el informe tendrá un capítulo correspondiente al marco teórico de la investigación con la información necesaria para entender la teoría detrás de las cadenas de suministro, la energía solar fotovoltaica, el marco regulatorio en Guatemala, la generación distribuida renovable y los conceptos sobre el proceso analítico jerárquico.

2. ANTECEDENTES

En la literatura consultada, se han encontrado aportaciones a la cadena de suministro en Colombia y México, con especial énfasis en las componentes de infraestructura de transporte y proveedores necesarios para la realización de proyectos de aprovechamiento energético con recurso solar fotovoltaico. En cuanto a Guatemala, no se han encontrado aportaciones similares. Sin embargo, sí se han encontrado investigaciones cuyo enfoque es de carácter técnico y de normativa económica.

En la investigación titulada Cadena de suministro de la energía solar, de López, Alcalá y Moreno (2012) se realiza el análisis del mercado mexicano en cuanto a empresas ubicadas en el territorio nacional, cuya razón de ser es el negocio que gira en torno a los proyectos de generación solar fotovoltaica. Como resultado, se identificó una cadena de suministro desintegrada y dispersa debido a la falta de motivación por parte de la legislación vigente y de políticas públicas que promuevan el desarrollo de la cadena de suministro desde un punto de vista económico y fiscal.

En cuanto a Colombia, Mendoza, Ocampo, Gracia, y Rodríguez (2018), han analizado la cadena de suministro de la energía solar debido a su potencial utilidad en las regiones que no se encuentran interconectadas. Durante este análisis se han visualizado las complejidades logísticas y de transporte para llevar a cabo la construcción de centrales de generación, sin embargo, al crear estrategias que permitan los enlaces entre etapas de los procesos logísticos se podría llegar a generar la expansión de la cadena de suministro y fortalecer la energía solar como una alternativa de la energía convencional en Colombia.

En cuanto a investigaciones locales, estas normalmente se centran en cuestiones técnicas. De León (2008), en su estudio realizado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala sobre generación de energía solar fotovoltaica se han abordado conceptos básicos de la energía solar y el equipamiento técnico necesario para la instalación. Además, se ha realizado el estudio de balance energético entre el consumo del edificio T-6 y la energía eléctrica que se podría generar mediante el uso de los paneles fotovoltaicos. Esto ha dado como resultado las conclusiones necesarias para decidir sobre la factibilidad de implementar proyectos de aprovechamiento solar y también han surgido recomendaciones sobre el proceso.

Debido a la necesidad de acción frente al cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, la generación distribuida renovable se ha convertido en un actor clave para lograr los objetivos ambientales. Dentro de las centrales generadoras incluidas en el esquema de generador distribuido se han destacado las de aprovechamiento solar fotovoltaico en el territorio norte de Chile. Es por esta razón, que se han realizado estudios económicos con el objetivo de evaluar la rentabilidad económica de estos proyectos. Estos estudios han dado como resultado, indicadores desfavorables que pintan un panorama sombrío para la generación distribuida renovable chilena y que perdurará mientras no exista legislación que apoye a las inversiones dedicadas a este tipo de proyectos, iniciando con una política fiscal favorable (Cisterna, Améstica y Piderit, 2020).

En Perú, Palacios, Rojas y Ramírez (2019), han realizado propuestas de aspecto regulatorio, en cuanto a micro generación distribuida se refiere, para promover la inversión en proyectos de generación distribuida con recurso solar fotovoltaico. Dentro del estudio se han revisado algunos criterios regulatorios de otros países de la región para promover la aprobación del Reglamento de

Generación Distribuida del Perú. Así mismo, se ha buscado determinar el mejor mecanismo comercial que genere el mayor interés de los inversionistas y así promover la utilización de estas fuentes renovables de energía que no producen mayores impactos en las instalaciones de las empresas distribuidoras de energía.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, el proceso básico de compras de equipamiento eléctrico está orientado a seleccionar el proveedor con el menor costo sin tomar en cuenta otros factores importantes que afectan la construcción y operación de una generadora distribuida renovable con energía solar fotovoltaica. Se ha intentado mitigar las consecuencias del problema escalando las opciones de proveedores a personal superior para su valoración, sin embargo, este procedimiento es ineficiente por el tiempo que lleva tomar una decisión y porque no corresponden a las funciones principales del personal superior.

3.1. Descripción del problema

El problema corresponde al poco conocimiento sobre el proceso de compra de los materiales y equipos necesarios para generación distribuida renovable con recurso solar fotovoltaico, debido a la inexistencia de un proceso orientado a la selección del proveedor que cumpla con las características técnicas requeridas por la naturaleza de la aplicación y la normativa aplicable.

3.2. Formulación del problema

- Pregunta central

¿Cuáles son las acciones necesarias para mejorar la cadena de suministro de centrales GDR con energía solar fotovoltaica mediante la selección adecuada de proveedores?

- Preguntas auxiliares

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

- ¿Qué proveedores importadores de paneles solares se encuentran operando en Guatemala?
- ¿Cuáles son las variables a tomar en cuenta para la selección de proveedor de paneles solares fotovoltaicos utilizados en generación distribuida renovable con energía solar fotovoltaica?
- ¿Cuál es el procedimiento más adecuado para la selección de proveedor de paneles solares, estructuras de soporte e inversores de potencia para su utilización en generación distribuida renovable con energía solar fotovoltaica?

3.3. Delimitación del problema

El problema planteado se abordará desde el punto de vista técnico, estará limitado al mercado que opera en territorio guatemalteco y, de manera transeccional, en el tiempo que corresponderá al período de recopilación de información de los requerimientos expresados por las regulaciones nacionales para generación distribuida renovable y los casos de éxito de plantas de generación con recurso solar fotovoltaico.

4. JUSTIFICACIÓN

Este estudio se presenta en la línea de investigación que corresponde al diseño, operación y regulación de proyectos energéticos con recursos renovables de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados; debido a que la cadena de suministro posee un papel importante para ejecutar la transición de la etapa de diseño a la etapa de operación de cualquier proyecto energético. En este estudio, la cadena de suministro tiene como objetivo entregar energía eléctrica, como producto final, utilizando la energía solar como materia prima.

La importancia de este estudio está fundamentada en la necesidad de mejorar la cadena de suministro con énfasis en la selección de proveedores de los diversos materiales y equipos necesarios para la construcción y operación de una generadora distribuida renovable con recurso solar fotovoltaico. Al realizar este estudio, se esperan obtener hojas de cálculo que representen un procedimiento cuantificable para la selección de proveedor de materiales y equipamiento necesario, utilizando una metodología que permite asignar criterios y prioridades a las características técnicas, y así generar una selección objetiva. Al obtener los resultados planteados, estos tendrán un impacto significativo para el departamento de operaciones de cualquier empresa generadora distribuida renovable con recurso solar.

Sin embargo, los resultados serán flexibles para ser utilizados en una empresa de telecomunicaciones con especial interés en generación renovable para sus centros de datos en 2030. Adicionalmente, los beneficios indirectos se extienden a las comunidades en las que se desarrollan los proyectos, debido a que la selección objetiva de proveedores de equipamiento y materiales generan

un aumento en la confiabilidad de la red eléctrica de distribución, permitiendo un desarrollo económico y social.

Además, uno de los objetivos específicos corresponde a identificación de proveedores importadores de paneles solares en Guatemala, cuyos resultados permitirán un conocimiento de la oferta de paneles solares en el territorio guatemalteco e impactará de manera positiva a la estrategia de abastecimiento de las generadoras distribuidas renovables.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Mejorar la cadena de suministro de centrales solares fotovoltaicas GDR mediante la selección adecuada de proveedores con base en características técnica y normativa aplicable.

5.2. Específicos

- Identificar los proveedores importadores locales de paneles solares fotovoltaicos en Guatemala.
- Identificar las variables a tomar en cuenta para la selección de proveedores de paneles solares utilizados en centrales solares fotovoltaicas basado en el proceso analítico jerárquico.
- Diseñar un procedimiento de selección de proveedores para la adquisición de paneles solares, estructuras de soporte e inversores de potencia utilizadas en centrales solares fotovoltaicas basado en el proceso analítico jerárquico.

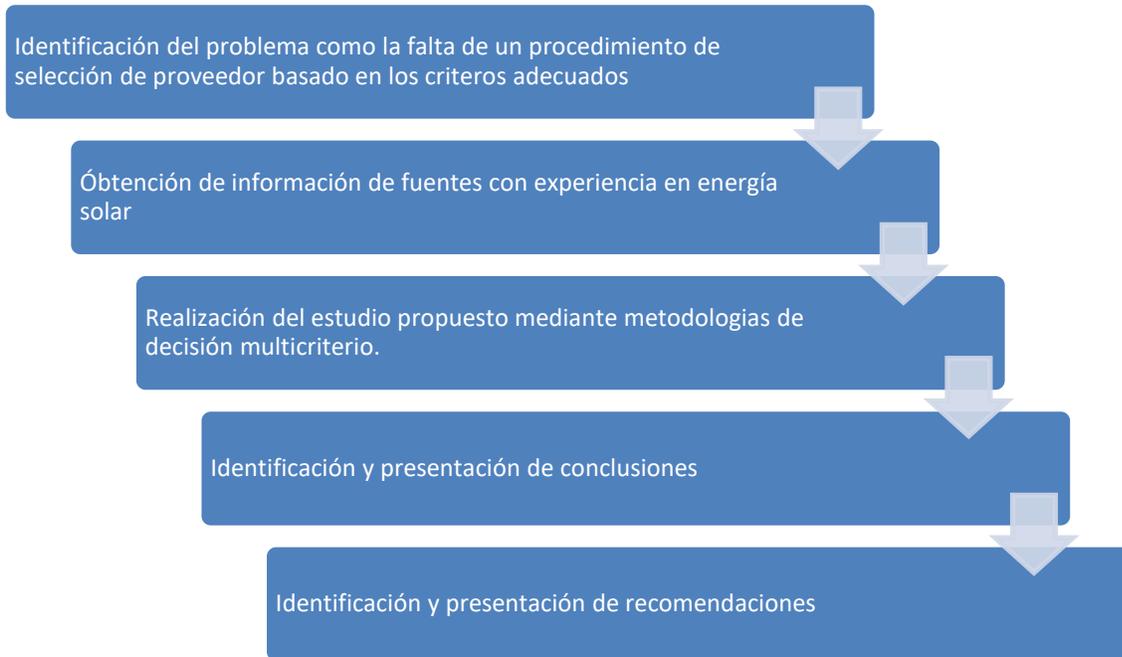
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Actualmente, el desarrollo de proyectos de energía renovable y la transformación de la matriz energética con base en recursos renovables son temas muy debatidos en el ámbito técnico y de coordinación en el mercado eléctrico nacional. Sin embargo, la utilización de los recursos renovables y la generación distribuida son el camino trazado más prometedor en la lucha por el desarrollo sostenible y en contra del cambio climático.

Es por la anterior razón, que el presente trabajo busca cubrir algunas de las necesidades que surgen en el proceso de diseño, construcción y operación de una central generadora de energía con recurso solar, dentro del esquema de generación distribuida renovable. Específicamente, las necesidades de mejora en la cadena de suministro del equipamiento necesario para lograr el aprovechamiento de la radiación solar y su posterior transformación en energía eléctrica libre de emisiones de carbono. Estas necesidades surgen del desconocimiento de los departamentos o áreas destinadas a la compra de los recursos utilizados por las empresas. Este desconocimiento o carencia de criterios, en el contexto de la generación solar, posee una alta probabilidad de generar pérdidas económicas a corto y largo plazo debido a la compra de un dispositivo incorrecto con base en criterios que pertenecen más a las políticas financieras destinadas a cumplir objetivos a corto plazo con mínimos costos.

El esquema de solución se representa en forma gráfica a continuación.

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Cadenas de suministro

Se presentan los aspectos importantes que conforman la cadena de suministro en el contexto de la generación de energía solar fotovoltaica.

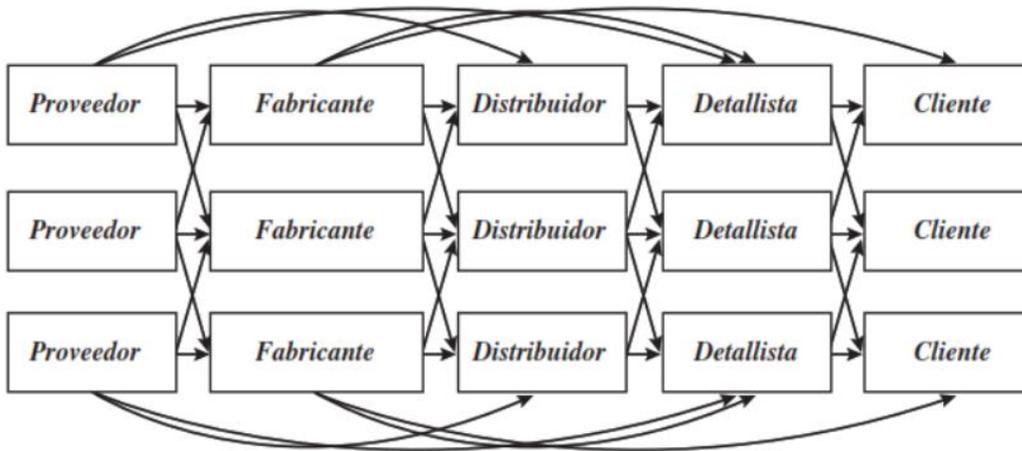
7.1.1. Definición de cadena de suministro

Podemos definir una cadena de suministro como un sistema formado por eslabones, los cuales representan a los fabricantes, vendedores de distinto nivel, proveedores, almacenadoras, transportistas y clientes (Chopra y Meindl, 2008).

Además, el objetivo de todos los componentes o involucrados en la cadena de suministro es el de cumplir con la demanda de los clientes.

Analizando una empresa proveedora de materiales eléctricos como CELASA. Esta empresa mantiene un inventario dedicado a satisfacer a un cliente cuando éste llega con una demanda de cables eléctricos. Estos cables fueron suministrados por un distribuidor, el cual recibió los cables de la fábrica correspondiente al modelo y aplicación del cable. Sin embargo, la cadena de suministro es más amplia de lo que aparenta, ya que el fabricante debe recibir toda una lista de materias primas para llevar a cabo su producción de cables eléctricos; la cual puede consistir, mas no limitarse, a cobre, aluminio, aislamientos termoplásticos o termoestables.

Figura 2. **Etapas de la cadena de suministro**



Fuente: Chopra y Meindl (2008). *Administración de la cadena de suministro*.

Young y Esqueda (2005) plantea los inicios de la cadena de suministro en la década de los sesenta con la definición de gerencia de distribución física y gerencia materiales. Estos conceptos evolucionaron debido a que, paulatinamente, se produjo la noción de la necesidad de un acompañamiento de información en conjunto con la producción. El desarrollo y las investigaciones produjeron el concepto moderno de la gerencia de la cadena de suministro durante la década de los noventa, el cual fue nombrado gerencia de la cadena de suministros.

Debido a la natural importancia de su definición y a la cantidad de actores en una cadena de suministro, esta posee vulnerabilidades. Young y Esqueda (2005) advierte que las cadenas de suministros son estructuras frágiles y que tal calificación radica en las posibilidades de la presencia de fallos en los componentes físicos o informativos de la cadena, en distintos niveles de proveedores. Esta advertencia se vuelve más preocupante a medida que la cadena de suministro se transforma en una red compleja, en los cuales se

pueden desarrollar casos tan diversos que obstaculicen la misma, pudiendo consistir desde un proceso de importación errado hasta desastres naturales.

7.1.2. Composición de la cadena de suministro

La cadena de suministro se compone de partes fundamentales. Estas partes son imprescindibles para su correcto funcionamiento y resulta necesario conocer sus definiciones.

7.1.2.1. Procesos de transformación en la cadena de suministro

De acuerdo con Chase, Jacobs y Aquilano (2009):

Un proceso de transformación utiliza recursos para convertir los insumos en un producto deseado. Los cuales pueden ser:

- Físicos
- De ubicación
- De intercambio
- De almacenaje
- Informativos

Con esta premisa, es posible identificar estas transformaciones en distintas cadenas de suministro, las cuales experimentan estas transformaciones para satisfacer las necesidades del cliente o usuario final.

(p. 8)

7.1.2.2. Proveedores

De acuerdo con Farfán (2014) “se necesita saber de dónde proceden sus productos y servicios y debe estar seguro de que los terceros que participan en este suministro comprendan y cumplan con sus principios” (p. 119). Es necesario que la relación con los proveedores sea sana, ya que una cadena de suministro depende en gran medida de estos y es casi seguro que los proveedores de primera línea tengan otra red más extensa y compleja de proveedores. Por lo tanto, la relación debe cuidarse en cada etapa para asegurar que el ingreso de materias primas de alta calidad genere una salida de una calidad igual o superior.

“Los proveedores en una cadena de suministro representan una parte fundamental de la misma. Siendo socios de valor” (González Serrano, 2014, p. 2). Porque el desarrollo de las relaciones se ha convertido en un método efectivo para aumentar los beneficios bilaterales en distintos campos.

7.1.2.3. Transporte

El transporte de materiales y componentes necesarios para llevar a cabo una producción ha sufrido cambios debido a la expansión de las empresas y organizaciones. Las distancias físicas entre sedes de una empresa se han incrementado de la mano con los efectos de la globalización. Las razones para que este fenómeno se haya presentado en el mercado mundial son varias, desde razones estratégicas con beneficios fiscales hasta ubicaciones con mano de obra de bajo costo. Sin embargo, las complejidades del transporte no se limitan a una sola empresa, ya que es muy común que las materias primas se importan desde otras partes del mundo hasta su destino en el que serán transformados, respondiendo a razones económicas o alianzas con proveedores específicos.

Algunos autores resaltan la importancia del transporte dentro de una cadena de suministro. Jiménez y Hernández (2002) define al transporte como “el elemento integrador del proceso de aprovisionamiento y distribución” (p. 169). Debido a su importancia en la cadena y al nivel de globalización que se vive actualmente, el costo del transporte ha aumentado debido a los complicados sistemas que se utilizan para esta actividad.

7.1.2.4. Producción

En esta parte de la cadena de suministro se llevan a cabo procesos de transformación que permiten generar bienes y servicios solicitados por los clientes, según sus necesidades o requerimientos. Sin embargo, el hecho de que bienes y servicios puedan tener relación con una cadena de suministro, los conceptos son totalmente diferentes. Chase, Jacobs y Aquilano (2009) dicen que un servicio es un proceso intangible, mientras que un bien es el producto de un proceso. De la anterior definición, podemos pensar que los bienes se pueden medir haciendo uso de magnitudes físicas pertenecientes a los distintos sistemas de medida, mientras que un servicio carece de esta posibilidad.

7.1.2.5. Demanda

El fin de una de la cadena de suministro puede reducirse a satisfacer una demanda específica y generar beneficios económicos en el proceso. Además, existen empresas que han logrado diversificar su producción para ampliar su cobertura de demanda, mejorando el rendimiento económico de sus operaciones. Es por esto, que la planeación de la demanda posee un papel protagónico en la eficiencia de las distintas etapas de la cadena de suministro (Chopra y Meindl, 2008).

Jiménez y Hernández (2002) resaltan la importancia de la gestión de la demanda, ya que se trata del origen de variaciones importantes y que su composición puede carecer de regularidad. La manera óptima de gestionar la demanda es buscando el equilibrio entre los requerimientos del cliente y la capacidad que tiene la empresa para suministrar. Esto se logra mediante la realización de pronósticos con base en una cantidad determinada de datos, cuyo fin es intentar reducir el nivel de incertidumbre. En niveles de aplicación más desarrollados, la demanda y la capacidad de producción son gestionados en tiempo real para emplear inventarios integrados.

7.1.3. Aplicación en proyectos de generación de energía eléctrica fotovoltaica

Algunos autores que han realizado investigaciones sobre la cadena de suministro de la energía solar fotovoltaica en su localidad han abordado diferentes enfoques en función del país en el que se encuentran y en las debilidades que han experimentado cadenas de suministro destinadas a otro tipo de producción.

Los autores López, Alcalá y Moreno (2012), cuya investigación se centra en México, identifican la necesidad creciente de explotar el potencial solar en la región norte del país, debido a los niveles altos de radiación solar directa. Sin embargo, definen con alta importancia, que uno de los primeros pasos para lograr el aprovechamiento es conocer la cadena de suministro; incluyendo la cantidad de actores pensantes, fabricantes, proveedores y distribuidores que puedan apoyar al aprovechamiento del recurso.

Con base en el análisis de la cadena de suministro de la energía solar en México; López, Alcalá y Moreno (2012) logran definir la cadena de suministro de la energía solar en cinco eslabones o categorías, las cuales son:

- Distribuidores de paneles solares, plantas de energía, sistemas de calentamiento de agua y otros equipos.
- Instalación y mantenimiento.
- Diseño, construcción y operación de plantas de generación. Soluciones para energía eléctrica y soluciones integrales.
- Asesoría jurídica.
- Insumos para la industria solar fotovoltaica. (p. 20)

En Colombia, los autores Mendoza, Ocampo, Gracia, y Rodríguez (2018) dieron alta importancia a la infraestructura de transporte debido a que, en el contexto del país, los proyectos de aprovechamiento del recurso solar se enfocan en zonas de difícil acceso. Esto permitió que se identificara el beneficio que el plan maestro de transporte intermodal de Colombia atraería, en términos de transporte y logística, a la cadena de suministro de la energía solar.

Además, a raíz de las investigaciones realizadas en Colombia, los autores Mendoza, Ocampo, Gracia y Rodríguez (2018) han podido generar una red de Petri que permite identificar las fases de la cadena de suministro y su interacción.

radiación solar en todo el país, el cual tuvo un valor de 5.3 kWh/m²/día (Dirección General de Energía, 2018).

La mayoría del territorio nacional recibe una cantidad considerable de radiación solar, y se pueden identificar que las zonas que más radiación solar reciben se encuentran en el denominado Corredor Seco de Centroamérica y en la costa sur de la república.

7.2.2. Componentes de una central fotovoltaica

La selección de los componentes de una planta de generación solar fotovoltaica es el paso posterior a la definición del potencial solar en la ubicación del proyecto. Es necesario conocer la definición de los componentes fundamentales para una instalación óptima.

7.2.2.1. Paneles fotovoltaicos

Estos dispositivos utilizan la energía irradiada por el sol para generar una fuerza electromotriz. La utilización de esta tecnología se debe a los materiales que lo componen, los materiales semiconductores, y a la similitud de la energía de sus electrones de valencia con la energía de los fotones de un haz de luz solar.

El fenómeno completo que se produce en el interior de un panel fotovoltaico se puede explicar como la incidencia de la luz solar sobre el silicio, proporcionando energía a los electrones de valencia para romper los enlaces y liberarse para circular por el silicio, lo cual, genera una recombinación de electrones con huecos producidos por otros electrones. Mientras que la unión de

los cristales de silicio dopadas con silicio y fósforo genera un campo eléctrico dando origen a una corriente eléctrica (Sanz Moya, 2010).

En la construcción de los paneles fotovoltaicos existen otras alternativas al silicio, como el arseniuro de galio y el sulfuro de cobre. Además, entre los que son construidos a base de silicio se pueden clasificar en amorfos, monocristalinos y policristalinos.

Figura 4. **Módulos fotovoltaicos según estructura cristalina**



Fuente: Iza (2020). *Diseño de una central fotovoltaica para abastecimiento de energía eléctrica del campus de la Escuela Politécnica Nacional.*

De acuerdo con la estructura cristalina que se utilice en la construcción de módulos fotovoltaicos se pueden esperar valores de eficiencia distintos debido a la diferencia de cristalización.

Tabla I. **Clasificación de módulos fotovoltaicos y su eficiencia**

Tipo de estructura cristalina	Eficiencia
Celdas de silicio monocristalino	18-20 %
Celdas de silicio policristalino	14-16 %
Celdas de silicio amorfo	10 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word y con datos obtenidos de Iza (2020).
Diseño de una central fotovoltaica para abastecimiento de energía eléctrica del campus de la Escuela Politécnica Nacional.

7.2.2.2. Inversor de corriente directa a corriente alterna

Según Sanz (2010), este dispositivo es el encargado de transformar la corriente directa, proveniente del arreglo de paneles fotovoltaicos, a corriente alterna siguiendo los parámetros de frecuencia, fase y forma de onda tradicionales de una red monofásica o trifásica. Dependiendo de la potencia que puede proporcionar el inversor, se utilizan tecnologías IGBT para inversores de alta potencia y transistores para inversores de baja potencia.

Debido a la importancia de la sincronización con la red eléctrica, el control de los parámetros de la onda senoidal generada se delega a un sistema de control electrónico de modulación por ancho de pulsos (PWM) y en algunas opciones disponibles en el mercado, la electrónica de control también se encarga del monitoreo de la temperatura ambiente, radiación solar y otras variables de interés. En cuanto a la electrónica de potencia necesaria para la conversión de corriente directa a corriente alterna, es común que se utilicen etapas modulares en un inversor para obtener la consigna de potencia y poder seguir funcionando en el caso de que un módulo presente una falla. También es importante que, en la salida de cada módulo exista una etapa de filtrado.

Adicionalmente, por motivo de seguridad y prevención de daños, Sanz (2010) menciona que:

Los inversores deben tener las protecciones necesarias para garantizar la protección de las personas como las que se listan a continuación:

- Tensión de red fuera de umbral
- Frecuencia fuera de umbral
- Alta temperatura
- Tensión de entrada baja
- Corriente de entrada baja
- Fallo de red
- Utilización de transformador de aislamiento. (p. 28)

7.2.2.3. Cajas de conexión

Debido al esquema de conexión que resulta del diseño realizado para una central fotovoltaica, es necesario que existan cajas de conexión por cada ramal o bahía de módulos fotovoltaicos conectados, con el objetivo de concentrar el cableado proveniente de las cadenas de módulos y optimizar el cableado saliente desplegado en el área de la central fotovoltaica.

Además, en las cajas de conexión normalmente se colocan los dispositivos eléctricos necesarios para la protección de cada uno de los tramos del arreglo fotovoltaico, así como la protección contra cortocircuitos, protección contra sobrentensidad y sobretensiones, conexión de puesta a tierra y seccionador correspondiente.

Las cajas de conexión se ubican inmediatas a la sección de módulos fotovoltaicos correspondiente, es decir, a la intemperie. Es por la anterior razón, que se debe de dotar de características especiales a estas cajas de conexión, para poder tener un tiempo de vida útil amplio y poder proteger lo que contenga en su interior.

7.2.2.4. Estructura de soporte

Para Sanz (2010), debido a que, en una central de aprovechamiento del recurso solar, los módulos fotovoltaicos se deben ubicar a la intemperie, estos están sujetos a las condiciones atmosféricas que se presenten en la región en la que se encuentre la central generadora. Por lo general, las ubicaciones ideales se caracterizan por no tener obstáculos para que la radiación solar incida de manera efectiva en los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, el hecho que no existan obstáculos para la radiación solar también permite que se generen vientos con una velocidad considerable, los cuales, pueden generar situaciones peligrosas y daños en la central con repercusiones económicas.

Figura 5. **Estructura de Soporte**



Fuente: Perpiñán (2008). *Grandes centrales fotovoltaicas: producción, seguimiento y ciclo de vida.*

La estructura de soporte de los módulos fotovoltaicos es una parte importante de una central fotovoltaica y, además, se encuentra variedad de soluciones en el mercado, pudiendo ser de aluminio o acero galvanizado. También es importante que las estructuras destinadas al soporte de los módulos fotovoltaicos no se muevan de su ubicación definida, para lograrlo, estas pueden ser hincadas mediante postes o fijadas con hormigón; dependiendo de las condiciones que el terreno facilite.

Otro papel importante de la estructura de soporte de módulos fotovoltaicos consiste en lograr que la radiación solar se aproveche al máximo posible. Esto es función del diseño y/o mecanismo de orientación de los módulos fotovoltaicos con respecto a la posición del sol durante el día.

7.2.2.5. Cableado eléctrico

Para Martínez (2011) se trata de una parte imprescindible para el funcionamiento de cualquier instalación eléctrica y están hechos de cobre, debido a sus características eléctricas. Normalmente están expuestos al calor que se genera por las pérdidas de efecto Joule, sin embargo, en una instalación fotovoltaica también experimentan las temperaturas que se desarrollan en las secciones que se encuentran en la intemperie. La determinación del cableado eléctrico se realiza con base en minimizar las pérdidas por efecto Joule y la caída de tensión consecuente.

El cableado debe poseer un calibre que le permita realizar la conducción de corriente y no superar el límite térmico definido por su aislamiento. Para esto, los fabricantes generan tablas predeterminadas para indicar la corriente aceptable para cada calibre en función de la temperatura juntamente con el dato de resistencia por metro lineal para que el diseñador de la central pueda cumplir con

los límites establecidos. Para el caso de cables que conduzcan corriente continua, el límite de caída de voltaje no debe ser mayor que el 3 % del voltaje nominal de la instalación fotovoltaica; y para el tramo posterior al inversor, que trabaja en corriente alterna, la caída de voltaje máxima es de 1.5 %.

7.2.2.6. Elementos de protección

De acuerdo con Portabella (2010), los elementos de protección eléctrica de una central generadora permiten mantener la continuidad del negocio de generación, proteger a los operadores de la central y aumentar la vida útil de los demás componentes instalados y que conforman el sistema de generación. Por ejemplo:

- Interruptores termomagnéticos
- Interruptores automáticos diferenciales
- Interruptores automáticos motorizados
- Dispositivos contra sobretensiones
- Fusibles, para la parte en corriente continua
- Puestas a tierra
- Monitores de sincronización de fase y frecuencia

7.2.2.7. Sistema de monitoreo

Para Portabella (2010), el sistema de monitoreo consiste en una red de comunicación con los componentes capaces de comunicarse bajo un protocolo establecido y limitado por la marca, modelo o versión de cada equipo. Esto permite gestionar en tiempo real la operación de la central generadora desde un centro de operación que puede estar ubicado en las cercanías de la central en un punto estratégico.

Este sistema es de gran utilidad para conocer, en tiempo real, los parámetros esenciales de la central generadora desde una perspectiva que integre los niveles de voltaje desarrollados en la intermediación de los módulos fotovoltaicos, voltaje de corriente alterna, radiación solar por zonas, potencia, temperatura, entre otros. Lo cual, no sería posible realizar en centrales con grandes extensiones de ocupación debido a la limitante del recurso humano.

7.2.3. Recomendaciones técnicas para selección de componentes

La composición de los módulos fotovoltaicos debe facilitar un aislamiento eléctrico con el exterior, resistencia mecánica y protección física a las células solares. Principalmente por las condiciones atmosféricas que se presentan en la ubicación de la central fotovoltaica. Los módulos fotovoltaicos también deben de aprovechar la mayor cantidad de energía solar teniendo una alta transmisividad en la capa frontal evitando reflejar la luz solar que se debería aprovechar en la producción de energía eléctrica.

Durante la operación de la central fotovoltaica, también se desea que el viento y la lluvia ayuden a que los módulos fotovoltaicos se limpien en alguna medida, por lo que se recomienda que la superficie de los módulos no posea bordes o protuberancias que permitan que la suciedad se aglomere. Al presentarse lluvia y grandes vientos, estos pueden llevar sólidos como piedras o granizo, por lo que en la fabricación de los módulos fotovoltaicos se emplea el vidrio templado frecuentemente, el mismo material que se utiliza en los vehículos y posee las características deseadas de resistencia al impacto y alta transmisividad.

Es recomendable que el diseño de los módulos fotovoltaicos cumpla con la norma IEC61215 para garantizar el cumplimiento de su vida útil, para el caso en el que se deseen utilizar módulos compuestos de células de silicio cristalino. Debe poseer opciones para reducir el efecto de punto caliente, como la utilización de diodos de paso. El contenido de hierro del vidrio templado de alta transmisividad debe ser bajo, sin olvidar que en la parte posterior del módulo debe tener una estructura que permita su montaje, así como las cargas que el viento y lluvia puedan generar. También es importante que los módulos cuenten con un sistema que provea una solución rápida y firme en cuanto a conexión eléctrica se refiere (Sanz, 2010).

En cuanto a la selección de inversores se refiere, existen categorías de selección orientadas a la topología que se requiera utilizar. Para el caso de instalaciones de medio o gran tamaño, como puede ser el caso de un generador distribuido renovable, se recomienda utilizar inversores de categoría central que concentraría la energía en corriente continua de toda una rama. La cantidad de inversores debe tener coherencia con la potencia de la central, para obtener eficiencia, fiabilidad y reducir costos.

En España, la realización del proyecto *SFCR Forum*, evidenció las ventajas de la utilización de inversores de categoría central, que cuenten con una tecnología de comunicación y control maestro-esclavo, permitiendo la sincronización de todos los inversores y la utilización de un inversor adicional de redundancia.

Figura 6. **Cuarto de inversores**



Fuente: Perpiñán (2008). *Grandes Centrales Fotovoltaicas: Producción, Seguimiento y Ciclo de Vida*.

7.3. Marco regulatorio en Guatemala

Se deben conocer las leyes que componen el marco regulatorio en Guatemala para entender los beneficios aplicables a las tecnologías de aprovechamiento de energía renovable.

7.3.1. Ley General de Electricidad

En 1996 el Congreso de la República de Guatemala decretó la Ley General de Electricidad con el objetivo de “normar el desarrollo del conjunto de actividades

de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad” (Decreto No. 93-96, 1996, p. 21). Esto permitió desconcentrar el sistema de abastecimiento de energía eléctrica, liberando el mercado de los sistemas de generación, transmisión y distribución.

En cuanto a generación se refiere, la Ley General de Electricidad expresa que “es libre la generación de electricidad y no se requiere para ello autorización o condición previa por parte del Estado” (Decreto No. 93-96, 1996, p. 3). De igual manera, crea la Comisión Nacional de Energía Eléctrica para generar la normativa técnica aplicable al subsector eléctrico y resolver las discusiones que se generen entre las partes que conforman el subsector.

Es importante recalcar que en la creación de esta ley no se estableció la definición de Generación Distribuida Renovable, si no hasta el año 2007 la definición fue agregada al Reglamento de la Ley General de Electricidad mediante el Acuerdo Gubernativo No. 68-2007

7.3.2. Reglamento de la Ley General de Electricidad

La creación de la Ley General de la Electricidad en 1996 incluyó algunas disposiciones como la mencionada en su Artículo 4 que dice: “en el plazo de noventa días, contados a partir de la fecha de publicación de esta ley, el Organismo Ejecutivo deberá emitir el reglamento de la misma” (Decreto No. 93-96, 1996, p. 19). Esto dio como resultado la emisión del Reglamento de la Ley General de Electricidad en el Acuerdo Gubernativo 256-97 publicado el 2 de abril de 1997.

Dentro de las disposiciones generales del Reglamento de la Ley General de Electricidad se encuentra la definición de generación distribuida renovable: “es la

modalidad de generación de electricidad, producida por unidades de tecnologías de generación con recursos renovables, que se conectan a instalaciones de distribución cuyo aporte de potencia neto es inferior o igual a cinco megavatios” (Acuerdo Gubernativo No. 256-97, 1997, p. 22). El cual fue añadido en 2007 mediante el acuerdo gubernativo No.68-2007.

Este reglamento establece una serie de lineamientos para la gestión del mercado eléctrico en Guatemala. Se establecen los mecanismos de comercialización de la energía producida por generación distribuida renovable y las obligaciones correspondientes para el agente distribuidor correspondiente al territorio en el que se encuentra el punto de conexión.

7.3.3. Incentivos para proyectos con energía renovable

En el año 2003, el Congreso de la República de Guatemala decretó la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, cuyo Artículo No.1 “declara de urgencia e interés nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables” (Decreto No. 52-2003, 2003, p. 95).

La creación de esta ley de incentivos fue realizada con el objetivo de la promoción de proyectos de generación de energía eléctrica con recursos renovables mediante estímulos para lograr interés en inversionistas nacionales e internacionales y la diversificación de la matriz energética a largo plazo. Estos estímulos son de naturaleza fiscal, económica y administrativa.

Los incentivos gozables son los descritos en el Artículo 5 según Decreto No. 52-2003 (2003):

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

Los incentivos descritos únicamente serán aprovechables si el órgano competente extiende la certificación que dictamine que el proyecto a desarrollar utilizara recursos de fuente renovable con base en lo descrito en el Reglamento de la Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable.

7.4. Generación distribuida renovable

La regulación guatemalteca contempla la definición de generación distribuida renovable. Por esta razón, se deben conocer los conceptos asociados a su funcionamiento y requisitos de operación.

7.4.1. Descripción

La generación distribuida ha sido una alternativa a los sistemas de generación centralizada que se utilizan en la mayoría de los sistemas de electrificación actualmente, a pesar de que el concepto de generación distribuida no es un tema nuevo. Esto se ha debido a que la industria eléctrica se desarrolló

bajo el esquema de generación alejada, físicamente, de los puntos de consumo debido al crecimiento demográfico y a lo disperso que se encuentran los recursos aprovechables para generación de energía eléctrica (España, 2008).

De acuerdo con España (2008) una definición de generación distribuida ampliamente aceptada a nivel mundial es, “unidades generadoras de pequeño tamaño ubicadas cerca de los puntos de consumo” (p. 44). Esta definición complementa a la expuesta en el Reglamento de la Ley General de Electricidad que establece que “un GDR se conecta al sistema de distribución siempre y cuando su potencia neta sea menor a lo establecido por el reglamento” (Morales, 2018, p. 52).

España (2008) recalca que hasta 2008 la presencia del esquema de generación distribuida renovable no ha sido relevante debido a la desinformación que existe sobre el tema en cuestión, a pesar de que Guatemala es un país con amplia variedad de recursos naturales renovables y existe legislación que promueve incentivos a proyectos que utilicen los recursos renovables. Sin embargo, el aumento del precio de los combustibles fósiles y las políticas medioambientales harán que, probablemente, el futuro sea dirigido hacia el aprovechamiento del potencial de generación distribuida.

7.4.2. Tipos de operación comercial

Los generadores distribuidos renovables generarán energía y potencia eléctrica que podrá ser comercializada de acuerdo con las siguientes opciones.

7.4.2.1. Comercializando con distribuidores

De acuerdo con lo expuesto en el artículo 31 por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014), “el GDR podrá comercializar la potencia y energía eléctrica que genera a Distribuidores, de conformidad con lo que establece la Ley General de Electricidad y sus reglamentos” (p. 18).

Bajo este esquema de comercialización, el generador distribuido renovable puede vender bloques de energía y potencia. Siempre y cuando, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica haya participado en la elaboración de los términos de referencia y que exista una aprobación de las bases de licitación por parte de esta. Esta licitación deberá ser de carácter público y podrá ser adjudicada parcial o totalmente al generador distribuido renovable. Además, aun cuando no participe en el mercado mayorista, el contrato de suministro deberá apegarse a lo establecido en las normas del AMM (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014).

El Reglamento de la Ley General de Electricidad limita el valor máximo de la remuneración de la energía, en el caso de que el distribuidor compre la energía, al valor del precio de oportunidad de la energía. Siempre y cuando, se cumplan los requisitos necesarios que dictamina la Ley.

7.4.2.2. Participando directamente en el mercado mayorista

Acorde a lo expresado en la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable, un GDR podrá comercializar “en el Mercado Mayorista, en calidad de Participante Productor cumpliendo con el marco legal vigente y lo que establecen

las Normas de Coordinación Comercial y Operativa que correspondan” (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014, p. 276).

Parte de los requisitos necesarios para ser habilitado en el mercado mayorista son copias de la documentación legal de la empresa GDR, todos los estudios eléctricos que se ejecutaron, la documentación esquemática unifilar y trifilar, resistencia burden, sistema de medición y conexión a la red de internet para transmisión de los datos. Además, el Administrador del Mercado Mayorista debe recibir el dictamen de capacidad y conexión que elabora el participante distribuidor, con respecto al punto de conexión y viabilidad de este. Al completar los requisitos, el GDR puede vender su energía según lo que establece la norma de coordinación comercial correspondiente (Morales, 2018).

La especificación de los contratos que un Generador Distribuido Renovable puede celebrar en el mercado a término del mercado mayorista son los descritos en la NCC-13 numeral 13.4.1 e inciso f, en el cual se describe los contratos de energía generada.

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No.13 y por lo mencionado por la Guía indicativa del Administrador del Mercado Mayorista, la definición del tipo de contrato a celebrar es la siguiente:

Contratos de energía generada. En este tipo de contrato un participante productor, vende a un participante consumidor un porcentaje horario o un valor máximo de la energía que sea generada con la unidad o central de generación comprometida; por lo tanto, no existe compromiso de potencia para el cubrimiento de demanda firme. Cada unidad o central generadora deberá, de manera excluyente, optar por el uso del porcentaje o del valor

máximo para los contratos de este tipo que presente su titular al AMM. (Administrador del Mercado Mayorista, 2000, p. 6)

La NCC-13 en el mismo numeral 13.4.1 menciona que la energía generada bajo el contrato correspondiente será administrada en conjunto con los contratos de respaldo de energía generada. Además, la norma habilita la posibilidad de poseer oferta firme eficiente equivalente a la energía contratada y que esta pueda ser vendida en contratos de potencia sin energía asociada y en contratos de respaldo de potencia.

7.4.3. Requerimientos técnicos

La Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable menciona en su artículo No.7 que ningún participante distribuidor podrá imponer lineamientos técnicos, en cuanto a operación y conexión se refiere, al GDR que se conecte a sus instalaciones. Salvo los lineamientos o condiciones que establecen la Ley General de Electricidad, el Reglamento de la Ley General de Electricidad y las normas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Además, el mismo artículo proporciona los nombres de las organizaciones de normalización que pueden ser utilizadas como guía para las especificaciones técnicas que no se definan en la norma, siempre y cuando estas no contradigan a la NTGDR (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014).

Estas organizaciones de normalización referidas son las siguientes:

- El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares ANSI
- El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE
- La Comisión Electrotécnica Internacional IEC

Para los casos particulares en los que la generación de energía eléctrica se lleva a cabo en corriente continua o en otra frecuencia diferente al valor nominal, será imprescindible que el generador distribuido renovable haga uso del equipamiento necesario para realizar la conversión de la energía a los valores nominales de generación en corriente alterna y que cumplan con normas nacionales e internacionales, con especial énfasis en las protecciones que aislen efectivamente a los dispositivos con falla y en el filtrado eficiente de las alteraciones eléctricas que se generan en los dispositivos de conversión, ya que estos pueden provocar inconvenientes en la conexión de la central de generación hacia las instalaciones del distribuidor.

7.5. Metodología

La metodología empleada para alcanzar los objetivos planteados será presentada en esta sección. Resulta importante conocer las definiciones para lograr su correcta aplicación y utilización.

7.5.1. Proceso analítico jerárquico

Para Toskano (2005) debido a la necesidad e importancia de la toma de decisiones, como un comportamiento humano y una demostración de la inteligencia de este, fue desarrollado el proceso analítico jerárquico. Este permite resolver problemas con un alto grado de complejidad haciendo uso de distintos criterios y el valor relativo que le proporcione la persona que tomará la decisión para producir una jerarquía con las prioridades de cada decisión alternativa. Esta herramienta es especialmente útil ya que permite incluir una evaluación cuantitativa a las decisiones y aspectos cualitativos que se plantean, los cuales, muchas veces quedan fuera de los análisis a pesar de tener relevancia significativa.

Algunas de las características que menciona Font (2000) sobre el proceso analítico jerárquico son:

- Detecta y acepta la incoherencia de los decisores humanos, dentro de ciertos límites definidos.
- Permite emplear de forma natural una jerarquización de los criterios.
- No se necesita información cuantitativa acerca del resultado que alcanza cada alternativa en cada uno de los criterios considerados, sino sólo los juicios de valor del centro decisor. (p. 62)

De acuerdo con lo mencionado por Moreno (2002), se trata de una de las técnicas de toma de decisiones multicriterio con mayores aplicaciones en distintos campos en los que la toma de decisiones representa una acción cotidiana. Esto se debe principalmente por:

La flexibilidad de la técnica, la adecuación a numerosas situaciones reales diferidas, fundamentalmente, a la selección multicriterio entre alternativas; su factibilidad de uso; la posibilidad de aplicarla en decisión individual y en grupo, y, por último, la existencia de software amigable para su aplicación. (Moreno, 2002, p. 50)

Los fundamentos necesarios para la utilización de esta herramienta para la toma de decisiones son los que describe Toskano (2005):

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de metas, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos

- Evaluación de los elementos mediante asignación de pesos
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados
- Síntesis
- Análisis de sensibilidad. (p. 24)

7.5.2. Identificación del problema y definición del objetivo

Para Toskano (2005) es necesario realizar la identificación del problema que se desea resolver por medio de toma de decisión entre varias opciones o alternativas que se plantean. Al ser una actividad que conlleva gran importancia y da inicio al análisis de toma de decisiones, representa un desafío y un consumo de recurso humano para deliberar acerca del problema real dentro de una cantidad considerable de problemas listados del caso en específico.

Al realizar la identificación del problema, se establecerá el objetivo a alcanzar para mejorar la condición existente. Este servirá como la dirección en la que otros ítems de la jerarquía deberán desarrollarse para lograr su realización.

7.5.3. Identificación de criterios y alternativas

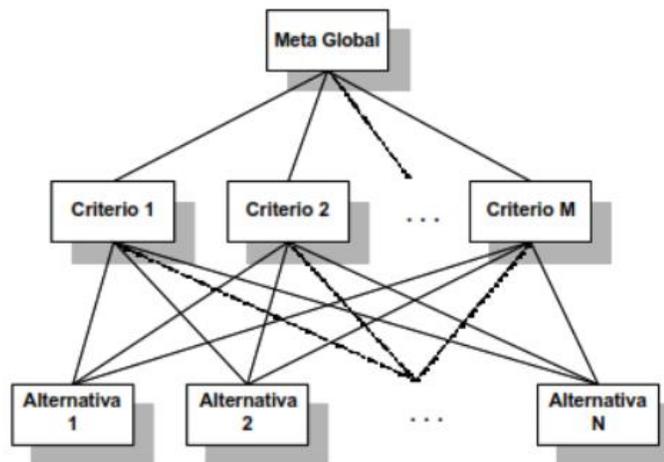
De acuerdo con Toskano (2005), los criterios “corresponden a propuestas factibles mediante las cuales se puede alcanzar el objetivo general y las alternativas corresponden a propuestas factibles mediante las cuales se podrá alcanzar el objetivo general” (p. 38).

Dentro de los criterios, se pueden tomar en cuenta criterios cuantitativos y cualitativos. Ya que, en algunos casos, los criterios cualitativos poseen una gran influencia para lograr alcanzar los objetivos planteados y, además, la integración de estos criterios es una de las facilidades que otorga el método jerárquico.

7.5.4. Elaboración de árbol de jerarquías

En esta parte del proceso de decisión, se debe elaborar el diagrama del problema, que incluyan las definiciones anteriores. Este diagrama recibe el nombre de árbol de jerarquía y se ilustra en la figura 6.

Figura 7. **Árbol de jerarquía**



Fuente: Toskano (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores.*

7.5.5. Evaluación del modelo

En esta etapa del análisis, es de suma importancia incluir a las personas interesadas y a las que afectará significativamente la decisión final. Iniciando con la realización de comparaciones pareadas entre los criterios y alternativas de la decisión.

Además, las personas expresarán sus preferencias para generar juicios y evaluaciones en base a la experiencia y los conocimientos que estos posean. Al

finalizar las comparaciones, se obtendrá un resultado fundamentado en los pesos que generan las percepciones sobre el problema, cuya combinación permitirá la creación de una síntesis y un orden de las alternativas.

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 REFERENCIAL

1.1. Estudios previos

1.2. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cadenas de suministro

2.1.1. Definición de cadena de suministro

2.1.2. Composición de la cadena de suministro

2.1.2.1. Procesos de transformación en la cadena
de suministro

2.1.2.2. Proveedores

2.1.2.3. Transporte

2.1.2.4. Producción

2.1.2.5. Demanda

- 2.1.3. Aplicación en proyectos de generación de energía eléctrica fotovoltaica
- 2.2. Energía solar fotovoltaica
 - 2.2.1. Potencial solar en Guatemala
 - 2.2.2. Componentes de una central fotovoltaica
 - 2.2.2.1. Paneles fotovoltaicos
 - 2.2.2.2. Inversor de corriente directa a corriente alterna
 - 2.2.2.3. Cajas de conexión
 - 2.2.2.4. Estructura de soporte
 - 2.2.2.5. Cableado eléctrico
 - 2.2.2.6. Elementos de protección
 - 2.2.2.7. Sistema de monitoreo
 - 2.2.3. Recomendaciones técnicas para selección de componentes
- 2.3. Marco Regulatorio en Guatemala
 - 2.3.1. Ley General de Electricidad
 - 2.3.2. Reglamento de la Ley General de Electricidad
 - 2.3.3. Incentivos para proyectos con energía renovable
- 2.4. Generación Distribuida Renovable
 - 2.4.1. Descripción
 - 2.4.2. Tipos de operación comercial
 - 2.4.2.1. Comercializando con distribuidores
 - 2.4.2.2. Participando directamente en el mercado mayorista
 - 2.4.3. Requerimientos técnicos
- 2.5. Metodología
 - 2.5.1. Proceso analítico jerárquico

- 2.5.2. Identificación del problema y definición del objetivo
- 2.5.3. Identificación de criterios y alternativas
- 2.5.4. Elaboración de árbol de jerarquías
- 2.5.5. Evaluación del modelo

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidad de análisis
- 3.2. Variables
- 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.3.1. Fase 1
 - 3.3.2. Fase 2
 - 3.3.3. Fase 3
 - 3.3.4. Fase 4

4. RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es mixto, ya que se realizará presentaciones estadísticas de los proveedores presentes en el mercado guatemalteco y se recopilará información de expertos en el tema mediante entrevistas estructuradas y estandarizadas.

El alcance es descriptivo dado que el estudio describirá las opciones disponibles en el mercado guatemalteco de materiales, equipos y servicios para proyectos de generación distribuida renovable basado en el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

El diseño adoptado será no experimental, ya que la información acerca de la mejora de la cadena de suministro para generación distribuida renovable con energía solar fotovoltaica mediante selección de proveedores se analizará en su estado original sin ninguna manipulación; además será transeccional pues se estudiará la información obtenida del mercado y su estado al momento de la recopilación de los datos.

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio serán los proveedores con presencia en el mercado guatemalteco, la cual se encuentra dividida en subpoblaciones dadas por los importadores de materiales eléctricos e importadores de equipamiento eléctrico, de la cual se obtendrán las muestras mediante el procedimiento de muestreo bola

de nieve provenientes de personas pertenecientes a grupos u organizaciones con información sobre generación solar fotovoltaica.

9.3. Variables

Se presenta la clasificación de las variables contempladas en la investigación, las cuales serán de utilidad en la elaboración de los resultados.

Tabla II. **Variables**

Variable	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
Cantidad de empresas			x			x	Razón
Localización	x					x	Nominal
Tiempo de entrega				x		x	Intervalo
Días de crédito				x		x	Razón
Soporte técnico			x			x	Razón
Experiencia en el sector			x			x	Razón
Calificación técnica				x	x		Razón
Marca	x					x	Nominal
País de fabricación	x					x	Nominal
Tiempo de vida			x			x	Ordinal

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Tabla III. **Definición de variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Cantidad de empresas	Empresas proveedoras de paneles solares en Guatemala	Se obtendrán de las bases de datos de asociaciones generadores renovable
Localización	Ubicación geográfica de sucursales o bodegas	Se obtendrá información de las empresas y se agruparan por departamentos
Tiempo de entrega	Tiempo proyectado entre la emisión de orden de compra y entrega a cliente	Se medirá en semanas y se obtendrá la información de las empresas
Días de crédito	Tiempo autorizado entre la facturación del proveedor y la cancelación de la factura	Se medirá en días de crédito y se obtendrá la información de las empresas
Soporte técnico	Tiempo entre solicitud de cliente y atención por parte del proveedor	Se medirá en horas, y se obtendrán los datos de las empresas identificadas
Experiencia en el sector	Tiempo de vida de la empresa en el sector definido	Se medirá en años y se obtendrá los datos de las empresas identificadas
Calificación técnica	Puntuación asignada en función de características técnicas	Se utilizará una escala de 0-100 en función de la ponderación de características técnicas
Marca	Nombre de la empresa fabricante	Se obtendrá de la información proporcionado por la empresa
País de fabricación	Nombre del país en el que se lleva a cabo la fabricación un producto	Se obtendrá de la información proporcionado por la empresa
Tiempo de vida	Tiempo durante el cual un producto mantiene su calidad	Se obtendrá de la información proporcionada por la empresa

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

9.4. Fases del estudio

Se describirán a continuación las fases del estudio.

9.4.1. Fase 1: Revisión bibliográfica

En la primera fase se realizará una revisión de la bibliografía compuesta por libros, artículos y tesis relacionadas con la cadena de suministro y con equipos utilizados en la generación de energía mediante recurso solar fotovoltaico. La información será de utilidad en caso de que existan preguntas adicionales que surjan durante las entrevistas y, de igual manera, durante el desarrollo de esta investigación en la elaboración del marco teórico.

9.4.2. Fase 2: Acercamiento y recolección de información proveniente de la Asociación de Generadores con Energía Renovable

En la segunda fase se realizará un acercamiento con la Asociación de Generadores con Energía Renovable mediante la sección de contacto en la página web oficial y mediante la red de contactos propia en la red social LinkedIn. Al lograr el acercamiento, se solicitará una entrevista con la o las personas indicadas, la cual será realizada de acuerdo con las características de una entrevista estructurada cuyas preguntas a responder serán las siguientes:

- En referencia a las centrales solares fotovoltaicas instaladas en el territorio nacional ¿Dónde se compran, comúnmente, los paneles fotovoltaicos utilizados?

- ¿Qué tipo de paneles solares son los más utilizados en centrales solares fotovoltaicas dentro del territorio nacional y por qué?
- ¿Qué tipo de estructuras de soporte son los más utilizados en centrales solares fotovoltaicas dentro del territorio nacional y por qué?
- ¿Qué tipo de inversores de potencia son los más utilizados en centrales solares fotovoltaicas dentro del territorio nacional y por qué?
- Por parte de la Asociación de Generadores con Energía Renovable u otra organización ¿Existe un catálogo de proveedores para equipamiento de centrales solares fotovoltaicas?
- ¿Qué proveedores nacionales de paneles solares, estructuras de soporte e inversores son recomendados por la asociación y por qué?
- ¿Qué generadores solares fotovoltaicos y proveedores de servicio se encuentran asociados?
- ¿Es posible que se proporcione una lista de contactos de personas en campo para profundizar más sobre las preguntas realizadas?

La información recopilada será analizada en comparación con la investigación realizada en la sección de marco teórico.

9.4.3. Fase 3: Recolección de información proveniente de proveedores de paneles solares, estructuras de soporte o inversores de potencia

En la tercera fase se realizarán entrevistas estructuradas a personas pertenecientes al área comercial de empresas proveedoras de paneles solares, estructuras de soporte o inversores de potencia para visualizar la oferta disponible en el mercado guatemalteco. Las preguntas serán:

- ¿Quiénes son sus proveedores de paneles solares, estructuras de soporte o inversores de potencia?
- ¿Cuánto tiempo de experiencia tienen en el mercado de equipos para generación solar?
- ¿Cuántos puntos de distribución poseen y cuáles son sus locaciones?
- ¿Qué marcas son las que comercializan?
- ¿Qué normas internacionales cumplen los productos ofrecidos?
- ¿Poseen soporte técnico a los productos de generación solar y en qué consiste?
- ¿Cuál es el tiempo promedio de vida de los productos, para generación solar, que ofrecen?
- ¿Cuáles son los requisitos para solicitar crédito y hasta cuantos días ofrecen?

- ¿Cuáles son los casos de éxito en proyectos de generación solar fotovoltaica?
- ¿Es posible suministrar los contactos de los casos de éxito experimentados para poder escuchar su experiencia?

Se solicitará un catálogo de productos y una cotización unitaria o lista de precios referencial a todas las empresas proveedoras entrevistadas. Toda la información recopilada será depurada y almacenada digitalmente en una base de datos en Microsoft Excel que tendrá la siguiente estructura:

Tabla IV. Base de datos de proveedores

Empresa	Producto 1, 2 y 3.	Experiencia	País de fabricación de Producto 1, 2 y 3.	Tiempo de Vida 1, 2 y 3.	Días de crédito	Marca de producto 1,2 y 3.	Soporte	Tiempo de entrega
Empresa No.1								

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

9.4.4. Fase 4: Elaboración de matrices de comparación de criterios y determinación de su importancia

En la cuarta fase se realizarán entrevistas estandarizadas al personal en campo referido por la Asociación de Generadores con Energía Renovable, proveedores y los contactos obtenidos mediante la red social LinkedIn con experiencia en el diseño, construcción y operación de centrales generadoras con recurso solar. Los cuestionamientos consistirán en una comparación pareada entre las características de los productos del mercado guatemalteco obtenidas de las empresas proveedoras. Se hará uso de la metodología de análisis

jerárquico expuesta en la sección de marco teórico, por lo que las respuestas obtenidas se organizarán mediante el uso de una matriz de comparación de criterios como la siguiente:

Tabla V. **Matriz de comparación de criterios**

Criterios	Marca	País de fabricación	Tiempo de vida	Experiencia del proveedor	Días de crédito	Soporte Técnico	Tiempo de entrega
Marca							
País de fabricación							
Tiempo de vida							
Experiencia del proveedor							
Días de crédito							
Soporte técnico							
Tiempo de entrega							

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La manera de responder será mediante una escala predeterminada para generar una razón entre la importancia del criterio de fila con respecto al criterio de columna. Esta escala será la siguiente:

Tabla VI. **Escala de calificación para matriz de comparación de criterios**

Igual	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
1	3	5	7	9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Por ejemplo:

País de fabricación es moderadamente más importante que la marca

Tabla VII. **Ejemplo de matriz de comparación de criterios**

Criterios	Marca	País de fabricación
Marca	1	1/3
País de fabricación	3/1	1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al finalizar la elaboración de la matriz de criterios, se calculará la matriz promedio de criterios de la totalidad de cuestionarios y se calculará su vector propio que representará su importancia global.

- Subfase 1: elaboración de matrices de comparación de alternativas.

En esta subfase se seguirá con la determinación del valor de cada alternativa según cada criterio. Por lo que se elaborarán las matrices de comparación de las alternativas, presentes en el mercado guatemalteco, en función de cada criterio. Estas matrices tendrán la estructura siguiente:

Tabla VIII. **Matriz de comparación de alternativas**

Alternativas	Alternativa No.1	Alternativa No.2
Alternativa No.1		
Alternativa No.2		

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La manera de llenar esta matriz será mediante una escala predeterminada para generar una razón entre la importancia del criterio de fila con respecto al criterio de columna. Esta escala será la siguiente.

Tabla IX. **Escala de calificación para matriz de comparación de alternativas**

Igual	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
1	3	5	7	9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al tener completadas las matrices, se calcularán los vectores propios de cada una de las matrices para determinar el orden de las alternativas en función de cada criterio.

- Subfase 2: cálculo de la mejor alternativa

En esta subfase se elaborarán las representaciones gráficas de los criterios en forma de árboles de jerarquía. Además, se multiplicarán las matrices de alternativas, en función de los vectores propios de cada alternativa en forma de columnas de matriz, con las matrices de criterio de una columna. El resultado de la operación ofrecerá el valor global de cada alternativa y se presentarán con la siguiente estructura.

Tabla X. **Presentación del valor de las alternativas**

Alternativa	Valor
Alternativa 1	
Alternativa 2	

Continuación tabla X.

Alternativa 3
Alternativa 4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

9.5. Resultados esperados

En función de alcanzar el objetivo de identificar a los proveedores importadores locales de paneles solares, se presentará una tabla con la información de los proveedores importadores de paneles solares cuya estructura será la siguiente.

Tabla XI. **Listado de proveedores**

Proveedor	Experiencia en el sector	Modelo de paneles	País de fabricación

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Además, se presentará una gráfica circular de la oferta de paneles solares en función de los países de fabricación, una gráfica de columnas agrupadas cuyo valor vertical será el conteo de modelo de paneles, un histograma que represente los años de experiencia de los proveedores para identificar la longevidad del mercado y tablas de contingencia para la representación de las variables categóricas.

Para alcanzar los demás objetivos del estudio, los cuales implican la producción de un procedimiento de selección de proveedores mediante el

proceso analítico jerárquico, se presentarán los árboles de jerarquía para cada uno de los equipos analizados cuya estructura será la descrita en la Figura 6 y tendrán los valores de los vectores propios de la matriz de comparación de criterios.

Para finalizar el estudio y presentar un ejemplo del procedimiento propuesto, se utilizarán los vectores propios de cada una de las matrices de comparación de alternativas y el vector propio de la matriz de comparación de criterios para obtener un listado de clasificación de proveedores de cada uno de los equipos mencionados en los objetivos.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para la información obtenida de la Asociación de Generadores Renovables se aplicarán técnicas de análisis de contenido a las respuestas obtenidas de las entrevistas estructuradas. El tema de análisis y sistema de categorías será en función de cada pregunta, el sistema de codificación utilizará índices de orden donde aplique y se extraerán las inferencias de la entrevista.

De igual manera, para la información recolectada de los proveedores de paneles solares, estructuras de soporte o inversores de potencia se aplicarán técnicas de análisis de contenido a las respuestas obtenidas de las entrevistas estructuradas. El tema de análisis y sistema de categorías será en función de cada pregunta, el sistema de codificación utilizará índices de orden donde aplique y se extraerán las inferencias de la entrevista.

Para la variable país de fabricación de producto, se realizará un análisis univariado, utilizando herramientas aritméticas para determinar la proporción que un país fabricante ocupa en la oferta disponible en el territorio nacional y para determinar la cantidad de empresas proveedoras importadoras presentes en el mercado guatemalteco. La utilización de estas herramientas permitirá la representación de la información en forma de tablas y gráficas circulares.

En cuanto a la variable años de experiencia, tiempo de entrega, tiempo de vida y días de crédito, se realizará un análisis univariado utilizando herramientas estadísticas como el histograma, definiendo rangos y frecuencias de entre los datos numéricos de la variable, con el fin de generar una representación gráfica en forma de barras.

Para las variables categóricas, las cuales se obtendrán en la fase 3, se realizará un análisis bivariado, utilizando herramientas como las tablas de contingencia construidas mediante la herramienta tablas dinámicas del software de hoja de cálculo Microsoft Excel, utilizando dos variables para conocer la relación entre las categorías de las variables de manera tabular y gráfica .

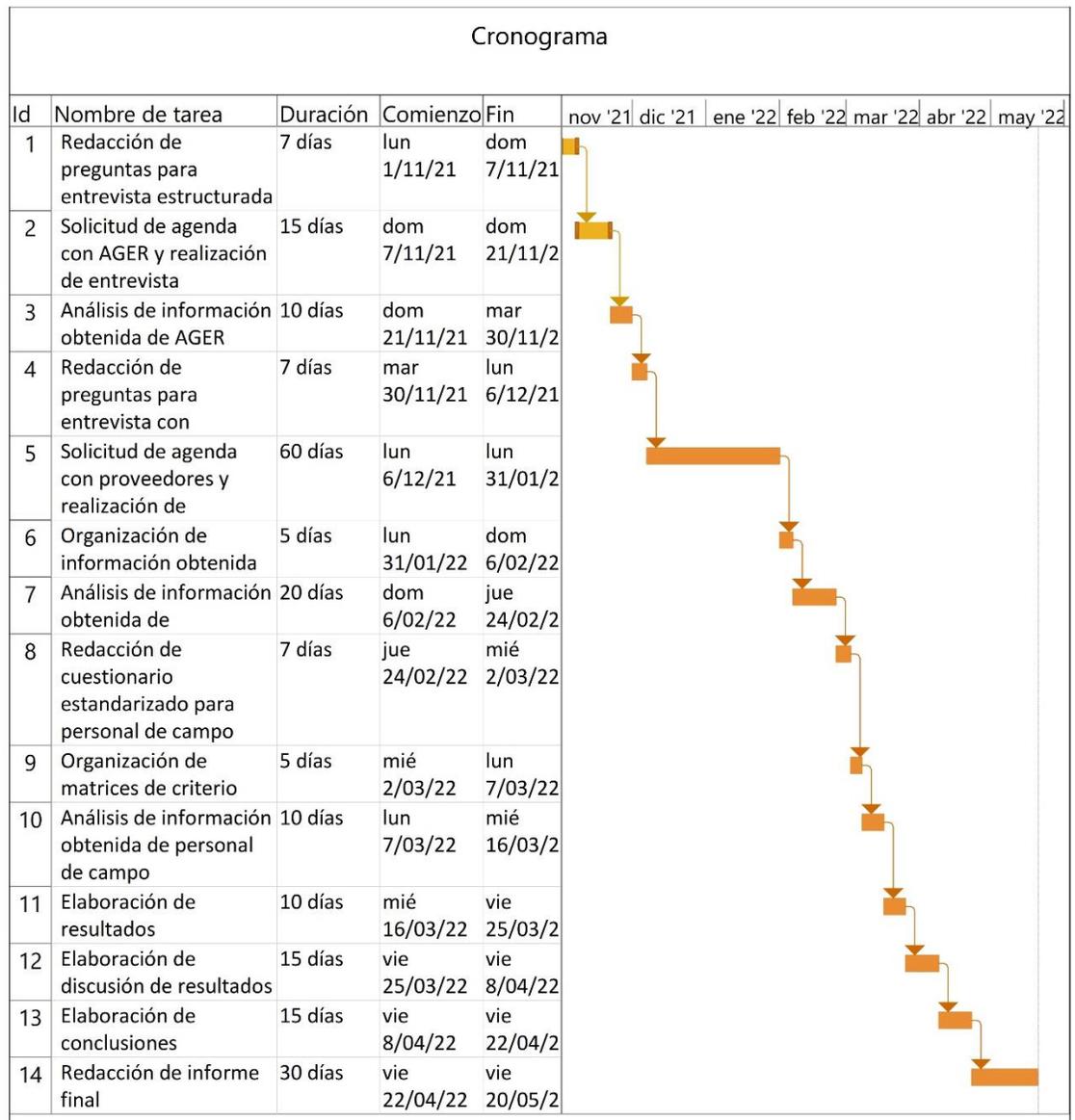
Además, se hará uso de gráficas de columnas agrupadas para poder representar el tiempo de vida de los equipos o productos en función del país de fabricación.

De igual manera, se realizará un análisis trivariado, utilizando herramientas como las tablas de contingencia construidas mediante la herramienta tablas dinámicas del software hoja de cálculo Microsoft Excel, utilizando tres variables para conocer la relación entre las categorías de las variables de manera tabular y gráfica, utilizando una tercera variable como pivote.

Se realizará un análisis de decisión multicriterio, utilizando la técnica de elaboración de matrices de comparación de criterios, propia de la metodología del proceso analítico jerárquico, con el fin de obtener los vectores propios que permitirán definir la importancia de cada criterio. Además, se utilizará la técnica de elaboración de matrices de comparación de alternativas con el fin de obtener los vectores propios de cada una de las matrices para determinar el orden de las alternativas en función de cada criterio.

11. CRONOGRAMA

Tabla XII. Cronograma



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría. Siendo la investigación descriptiva, se tendrán en cuenta los siguientes recursos:

Tabla XIII. Recursos necesarios para la investigación

Recurso	Costo	Factible
Recurso humano	Q 8,000.00	Si
Computadora (uso no exclusivo)	Q 800.00	Si
Licencia de Microsoft Office (uso no exclusivo)	Q 300.00	Si
Dos resmas de hojas	Q 100.00	Si
Viáticos (combustible y alimentación)	Q 500.00	Si
Tóner de impresora	Q 500.00	Si
Asesor	Q 2,500.00	Si
TOTAL	Q 12,700.00	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo No. 256-97. Reglamento de la Ley General de Electricidad. Diario de Centroamérica. Guatemala. 21 de marzo de 1997.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Norma de Coordinación Comercial No.13*. Guatemala: Autor.
3. Chase, R. B., Jacobs, F. R., y Aquilano, N. J. (2009). *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros*. México: Mc. Graw Hill.
4. Chopra, S., y Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro*. México: Pearson Educación.
5. Cisterna, L., Améstica, L., y Piderit, M. B. (julio, 2020). Proyectos Fotovoltaicos en Generación Distribuida ¿Rentabilidad Privada o Sustentabilidad Ambiental? *Revista Politécnica*, 45(2), 31-40.
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2014). *Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía*. Guatemala: Autor.
7. De León, V. H. (2008). *Generación eléctrica fotovoltaica en la Facultad de Ingeniería USAC y estudio del aprovechamiento* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

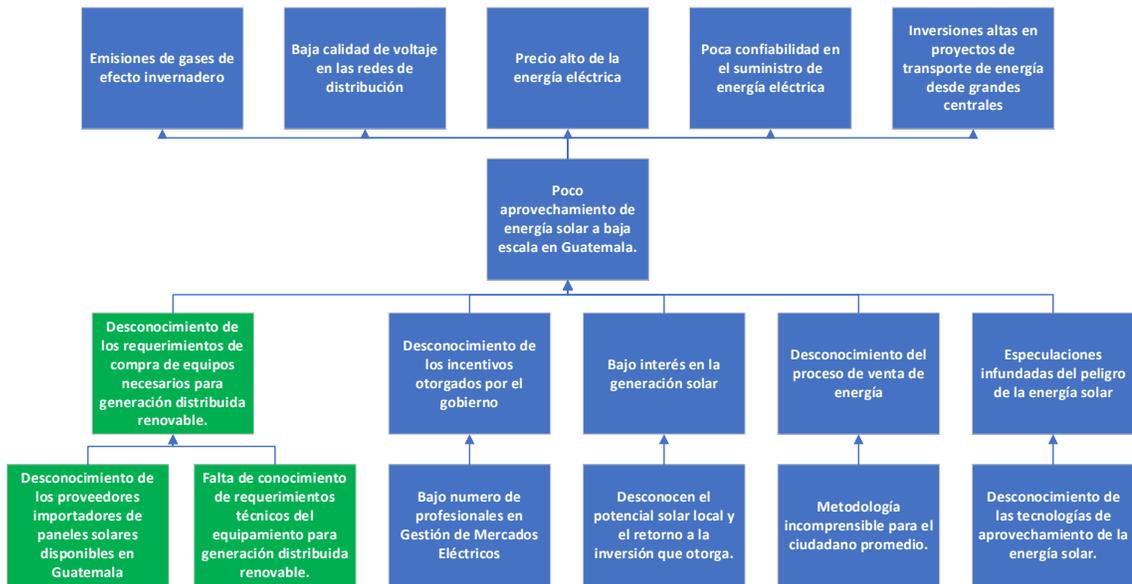
8. Decreto No. 93-96. Ley General de Electricidad. Diario de Centroamérica. Guatemala. 15 de noviembre de 1996.
9. Decreto No. 52-2003. Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. Guatemala. 10 de noviembre de 2003.
10. Dirección General de Energía. (2018). *Energía solar en Guatemala*. Guatemala: Autor.
11. España, H. V. (2008). *Generación Distribuida por Medio de Energías Alternas Renovables y su Influencia en la Evolución del Sistema Eléctrico Secundario de Distribución Tradicional* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
12. Farfán, R. (febrero, 2014). La Gestión de Relación con los Proveedores en la Cadena de Abastecimiento. *Sinergia e Innovación*, 2(2), 118-122.
13. Font, E. (junio, 2000). Gestión de la información en la utilización del proceso analítico jerárquico para la toma de decisiones de nuevos productos. *Anales de Documentación*, 2(2), 55-66.
14. González, L. F. (2014). *El Impacto del Desarrollo de Proveedores en la Cadena de Suministros* (Tesis de licenciatura). Universidad Militar de Nueva Granada, Bogotá.
15. Iza, J. X. (2020). *Diseño de una Central Fotovoltaica para Abastecimiento de Energía Eléctrica del Campus de la Escuela Politécnica Nacional* (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito.

16. Jiménez, J. E., y Hernández, S. (2002). *Marco Conceptual de la cadena de suministro un nuevo enfoque logístico*. Ciudad de México, México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.
17. López, V. G., Alcalá, C., y Moreno, L. R. (mayo, 2012). La cadena de suministro de la energía solar. *Conciencia Tecnológica*, 43, 18-23.
18. Martínez, B. (2011). *Instalación solar fotovoltaica aislada*. Madrid: España: Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Villanueva y Geltrú.
19. Mendoza, M. V., Ocampo, P. C., Gracia, H., y Rodríguez, L. (agosto, 2018). La gestión para cadena de suministro de sistemas de energía solar fotovoltaica en Colombia y su situación actual. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 15(1), 112-130.
20. Morales, F. R. (2018). *Aplicación de Centrales, Microeólicas en Guatemala, como una Forma de Generación Distribuida* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
21. Moreno, J. M. (agosto, 2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1(1), 28-77.
22. Palacios, D. Y., Rojas, R., y Ramírez, E. (2019). *Aspectos regulatorios a considerar en la implementación de la micro generación distribuida residencial fotovoltaica en el mercado eléctrico peruano* (Tesis de licenciatura). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

23. Perpiñán, O. (2008). *Grandes Centrales Fotovoltaicas: Producción, Seguimiento y Ciclo de Vida* (Tesis de licenciatura). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
24. Perpiñán, O. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica*. España: Creative Commons ebook.
25. Portabella, I. (2010). *Proceso de Creación de una Planta Solar Fotovoltaica Conectada a Red* (Tesis de licenciatura). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones, Barcelona.
26. Sanz, R. (2010). *Diseño de una Central Fotovoltaica de 100 kWp de Potencia Nominal* (Tesis de licenciatura). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
27. Toskano, G. B. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Marcos, Lima.
28. Young, R. R., y Esqueda, P. (septiembre, 2005). Vulnerabilidades de la cadena de suministros: consideraciones para el caso de América Latina. Academia. *Revista Latinoamericana de Administración*, 1(34), 63-78.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 2. Matriz de Coherencia

Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de Investigación	Objetivos	Metodología	Resultados esperados
El problema corresponde al poco conocimiento sobre el proceso de compra de los materiales y equipos necesarios para generación distribuida renovable con recurso solar fotovoltaico, debido a la inexistencia de un proceso orientado a la selección del proveedor que cumpla con las características técnicas requeridas por la naturaleza de la aplicación y la normativa aplicable	Principal ¿Cuáles son las acciones necesarias para mejorar la cadena de suministro de centrales GDR con energía solar fotovoltaica mediante la selección adecuada de proveedores?	General Mejorar la cadena de suministro de centrales solares fotovoltaicas GDR mediante la selección adecuada de proveedores con base en características técnica y normativa aplicable	Entrevistas estructuradas, cuestionarios estandarizados, técnicas de análisis de contenido, análisis univariado, análisis bivariado, análisis trivariado y proceso analítico jerárquico.	La mejora de la cadena de suministro gracias al establecimiento de los árboles de jerárquica con sus matrices de criterio y la información de proveedores de paneles solares
	Específicos ¿Qué proveedores importadores de paneles solares se encuentran operando en Guatemala?	Específicos Identificar los proveedores importadores locales de paneles solares fotovoltaicos en Guatemala	Entrevistas estructuradas, técnicas de análisis de contenido, análisis univariado, análisis bivariado y análisis trivariado.	Información en gráficas y tablas de los proveedores junto con las características de su oferta
	Específicos ¿Cuáles son las variables a tomar en cuenta para la selección de proveedor de paneles solares fotovoltaicos utilizados en generación distribuida renovable con energía solar fotovoltaica?	Específicos Identificar las variables a tomar en cuenta para la selección de proveedores de paneles solares utilizados en centrales solares fotovoltaicas basado en el proceso analítico jerárquico	Entrevistas estructuradas y cuestionarios estandarizados	Tablas con información de las variables a tomar en cuenta para la selección de proveedor
	Específicos ¿Cuál es el procedimiento más adecuado para la selección de proveedor de paneles solares, estructuras de soporte e inversores de potencia para su utilización en generación distribuida renovable con energía solar fotovoltaica?	Específicos Diseñar un procedimiento de selección de proveedores para la adquisición de paneles solares, estructuras de soporte e inversores de potencia utilizadas en centrales solares fotovoltaicas basado en el proceso analítico jerárquico	Entrevistas estructuradas, cuestionarios estandarizados y proceso analítico jerárquico	Arboles de jerarquía y matrices de criterio para evaluación de alternativas obtenidos del proceso analítico jerárquico

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.