

DISEÑO DE SISTEMA PARA LA RECONVERSIÓN A ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA EL SUPERMERCADO “SIGA Y MERQUE”

LAURA SOFÍA BADILLO ACOSTA (000218123)
JUAN FELIPE MORENO CABALLERO (000220261)

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2021

DISEÑO DE SISTEMA PARA LA RECONVERSIÓN A ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA EL SUPERMERCADO “SIGA Y MERQUE”

LAURA SOFÍA BADILLO ACOSTA (000218123)
JUAN FELIPE MORENO CABALLERO (000220261)

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO E
INGENIERO ELECTRÓNICO

DR. AGR. SANDRA PATRICIA CUERVO ANDRADE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2021

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga y 18 de Agosto de 2021

DEDICATORIA

Al Señor Jesús mi Justicia, a mi papá por motivarme y ayudarme a hacer este proyecto, a mi mamá por apoyarme en el cumplimiento de esta meta, a Mamá Luz por su compañía. A Pipe por acompañarme en este proceso intelectual y tener

paciencia conmigo.

Laura Sofía.

A mis padres los pilares de mi vida, por su esfuerzo y dedicación. A mis amigos por su constante paciencia y entrega.

Juan Felipe.

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, por ser una institución que enfoca la educación hacia el progreso y emprendimiento de los estudiantes, por los conocimientos y valores aportados durante la formación y presentación de éste proyecto.

A SANDRA PATRICIA CUERVO ANDRADE, por sus importantes aportes y el gran apoyo en el trayecto de éste proyecto.

A VICTOR DELGADO CRIADO, por permitirnos llevar a cabo este estudio en su supermercado.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	14
2.	OBJETIVOS.....	15
1.1	Objetivo general	15
1.2	Objetivos específicos	15
2.	ANTECEDENTES	16
2.1	Acuerdos ambientales en el mundo	16
2.1.1	El Acuerdo de París.....	16
2.1.2	El convenio de Viena	17
2.1.3	El protocolo de Kioto.....	17
2.1.4	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	17
2.2	Energía Fotovoltaica en el mundo.....	18
2.2.1	Energía Fotovoltaica en Estados Unidos.....	18
2.2.2	Energía Fotovoltaica en México.....	19
2.2.3	Plan Nacional de desarrollo de Colombia.....	19
2.2.4	Energía Fotovoltaica en Colombia.....	19
3.	DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	22
3.1	Generalidades de la empresa	22
3.2	Árbol del problema	22
3.3	Árbol de objetivos.....	23
4.	JUSTIFICACIÓN.....	25
5.	ALCANCE	26
6.	MARCO TEÓRICO	27
6.1	La energía solar fotovoltaica	27
6.2	La célula solar	27
6.3	El panel solar	28
6.3.1	Panel Monocristalino	29
6.3.2	Panel Policristalino	30
6.3.3	Amorfo	30

6.3.4	Número de células.....	30
6.4	El generador solar fotovoltaico.....	30
6.5	La hora solar pico.....	31
6.6	Carta solar.....	32
6.7	Tipos de generación fotovoltaica.....	32
6.7.1	Sistema Off-Grid.....	33
6.7.2	Sistema On-Grid.....	34
6.7.3	Sistema mixto.....	35
6.8	Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos On-Grid.....	35
6.8.1	Inversores fotovoltaicos.....	35
6.8.2	Cables eléctricos para los sistemas fotovoltaicos.....	38
6.8.3	Protecciones.....	40
6.8.4	Puesta a tierra.....	43
6.8.5	Canalización eléctrica.....	45
6.9	Estructura de soporte de los paneles solares.....	46
6.10	Aspecto Financiero.....	49
6.10.1	Criterios evaluación de proyectos de inversión.....	49
6.11	Aspecto normativo y legal.....	51
6.12	Aspecto Ambiental.....	52
7.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	53
8.	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	55
8.1	Estimación del Generador fotovoltaico.....	55
8.1.1	Estimación del consumo de la carga.....	55
8.1.2	Obtención hora solar pico.....	56
8.1.3	Dimensionamiento del generador solar.....	57
8.2	Dimensionamiento del inversor.....	61
8.3	Dimensionamiento del cableado.....	62
8.4	Puesta a tierra.....	69
8.5	Canalización eléctrica.....	69
8.6	Protecciones.....	70
8.7	Selección de tableros o cajas de paso.....	72

8.8	Selección del contador bidireccional	73
8.9	Diseño de la estructura de soporte	73
8.10	Análisis financiero	75
8.10.1	Cálculo del presupuesto	75
8.10.2	Valor Presente Neto (VPN)	77
8.10.3	Tasa Interna de Retorno TIR	78
8.10.4	Retorno de la Inversión ROI	78
8.11	Análisis ambiental	78
8.12	Alternativas de instalación	79
9.	CONCLUSIONES	82
10.	RECOMENDACIONES	83
11.	BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Hora solar pico Bucaramanga	32
Tabla 2. Tipos de aislamiento.....	38
Tabla 3. Intensidad admisible para conductores de cobre según la RA8-003.....	39
Tabla 4. Tipos de falla encontradas en un S.F.	41
Tabla 5. Principio de protección escalonada	42
Tabla 6. Relación entre las secciones de los conductores de protección y los de fase .	44
Tabla 7. Recomendaciones para la realización de puesta a tierra	44
Tabla 8. Diámetro de espárragos espaciadores de acuerdo al diámetro de tubería	46
Tabla 9. Tipos de estructura de paneles solares.....	46
Tabla 10. Cuadro de objetivos vs actividades	53
Tabla 11. Registro de consumos y pagos supermercado Siga y Merque	56
Tabla 12. Ángulo de inclinación respecto a latitud del lugar.....	58
Tabla 13. Comparación de paneles solares	61
Tabla 14. Parámetros del inversor	61
Tabla 15. Parámetros nominales de temperatura e Irradiancia y variaciones eléctricas	63
Tabla 16. Valores corregidos por temperatura	64
Tabla 17. Factores de temperatura del conductor permisible en el aislamiento.....	66
Tabla 18. Comparación de propiedades del aluminio y el acero	73
Tabla 19. Presupuesto Mano de Obra	76
Tabla 20. Presupuesto Materiales y Equipos	76
Tabla 21. Cálculos previos al VPN	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Árbol del problema de investigación.....	23
Figura 2.Árbol de objetivos del problema de investigación	24
Figura 3.Representación del panel solar	29
Figura 4. Componentes off-Grid.....	33
Figura 5. Características de inversores.....	36
Figura 6. Mapa de Santander, atlas interactivo IDEAM.....	57
Figura 7. Ángulo de elevación solar	58
Figura 8. Carta solar supermercado Siga y Merque.....	59
Figura 9. Toneladas de CO ₂ Ahorrados por mes	79
Figura 10. Alternativas de Instalación 50%	80
Figura 11. VPN vs Porcentaje de Inversión año 2.....	80
Figura 12. VPN vs Porcentaje de Transición.....	81

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Soporte de cálculos del sistema solar fotovoltaico

Anexo B. Ficha técnica refrigerador Imbera VRD37

Anexo C. Ficha técnica panel solar JAM 72S20 440-465/MR

Anexo D. Ficha técnica inversor IGECON SUN 3 play serie TL M

Anexo E. Planta general estructura

Anexo F. Diagrama eléctrico de conexión

Anexo G. Renderización paneles solares y estructura

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO DE SISTEMA PARA LA RECONVERSIÓN A ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EL SUPERMERCADO “SIGA Y MERQUE”

AUTOR(ES): Laura Sofía Badillo Acosta
Juan Felipe Moreno Caballero

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Sandra Patricia Cuervo Andrade

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo diseñar el sistema de suministro de energía eléctrica para el supermercado “Siga y Merque”, con base en la energía solar fotovoltaica con el fin de lograr el abastecimiento energético de este negocio, minimizando los costos operativos que representan el pago de la energía eléctrica ante la ESSA, para ello se inició con la estimación del consumo como requerimiento principal del dimensionamiento del generador fotovoltaico, obteniendo un diseño de 16 paneles en serie por 6 string en paralelo de 450 W de potencia, representando una potencia real de 43,2 kW, a trabajar durante un promedio de 4 horas solar pico y cumpliendo con un abastecimiento mínimo del 90,87% de la capacidad requerida; al realizar el análisis financiero, se determinó viabilidad, factibilidad y sostenibilidad del proyecto para una inversión total en el primer año y una alternativa de transición del 50% en el segundo periodo anual.

PALABRAS CLAVE:

Energía solar fotovoltaica, demanda energética, transición energética, viabilidad

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: SYSTEM DESIGN FOR RECONVERSION TO SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY FOR THE SUPERMARKET "SIGA Y MERQUE"

AUTHOR(S): Laura Sofia Badillo Acosta
Juan Felipe Moreno Caballero

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Sandra Patricia Cuervo Andrade

ABSTRACT

This project aims to design the electrical energy supply system for the "Siga y Merque" supermarket, based on photovoltaic solar energy in order to achieve the energy supply of this business, minimizing the operating costs that represent the payment of electricity before the ESSA, for this it began with the estimation of consumption as the main requirement of the sizing of the photovoltaic generator, obtaining a design of 16 panels in series by 6 strings in parallel of 450 W of power, representing a real power of 43 , 2 kW, to work during an average of 4 peak solar hours and complying with a minimum supply of 90.87% of the required capacity; When carrying out the financial analysis, the viability, feasibility and sustainability of the project were determined for a total investment in the first year and a transition alternative of 50% in the second period.

KEYWORDS:

Photovoltaic solar energy, energy demand, energy transition, viability

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

La energía es un recurso indispensable en cualquier sociedad para su desarrollo sociopolítico y económico, no obstante, en los últimos años se ha producido una aceleración del crecimiento demográfico, industrial, tecnológico, que ha incrementado la demanda energética, trayendo como consecuencia la incapacidad del sistema de suministro energético principal, de cumplir con el abastecimiento de las necesidades de la población [1].

La generación hidráulica es la principal fuente de energía renovable en Colombia, aportando alrededor del 70% de la generación eléctrica, sin embargo, la ejecución de nuevos proyectos de hidroeléctricas acarrea consigo consecuencias negativas, producto de la deforestación ambiental y las dificultades fiscales; esta problemática no solo es visible en Colombia sino a nivel mundial, por ello, se han establecido diferentes acuerdos internacionales, que buscan incentivar a los diferentes países a establecer en su Planes Nacionales de Desarrollo el uso de fuentes de energías renovables que garanticen la sostenibilidad del planeta [2].

En 2017 Colombia presentaba un déficit energético del 32% del territorio nacional, debido a que esta parte no tenía acceso al Sistema Interconectado Nacional, sin embargo, el país cuenta con un abundante recurso solar para todo el territorio del orden de 4,5 kWh/m² que puede ser utilizado eficientemente para compensar la falta a través de sistemas solares fotovoltaicos. La posición geográfica y astronómica de Colombia hacen que la energía solar fotovoltaica sea una adecuada solución a esta problemática energética, ya que su fuente de generación es inagotable, tiene una larga vida útil, disminuye el impacto ambiental y sus costos de instalación, operación y mantenimiento son bajos en comparación al sistema tradicional. Producto a lo anterior, nace el interés de realizar un estudio para determinar el impacto económico y ambiental al realizar una reconversión energética a una fuente renovable como lo es la solar fotovoltaica [3].

A través de este proyecto, se busca diseñar un sistema de suministro de energía eléctrica, basado en la energía solar fotovoltaica, con miras a lograr el abastecimiento de un negocio de supermercado, incentivar a la comunidad al uso de las energías renovables y aportar a los acuerdos internacionales establecidos; para ello se estima la demanda energética como requerimiento principal del diseño, seguidamente, se hace un dimensionamiento de la instalación fotovoltaica, teniendo presente, los paneles solares, inversores, cableados, canalizaciones, tableros de paso y protecciones eléctricas; y finalmente, se analiza el proyecto desde una perspectiva financiera y ambiental que permita exponer la viabilidad y sostenibilidad del mismo.

2. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Diseñar el sistema de suministro de energía eléctrica para el supermercado “Siga y Merque”, con base en la energía solar fotovoltaica con el fin de lograr el abastecimiento energético de este negocio, minimizando los costos operativos que representan el pago de la energía eléctrica ante la ESSA.

1.2 Objetivos específicos

- Estimar la demanda energética a partir de los históricos de consumo de energía registrados en las facturas de la ESSA con el fin de obtener los requerimientos de diseño que permitan cumplir con la totalidad de la reconversión. **Resultado:** consumo actual energético total del supermercado “Siga y Merque”. **Indicador:** Se debe obtener la tabulación del consumo de los últimos 12 meses para establecer el requerimiento energético promedio anual del supermercado.
- Diseñar la central fotovoltaica para suministrar de 90% a 100% de la demanda energética. **Resultado:** diseño de la central fotovoltaica del Supermercado. **Indicador:** el diseño debe mostrar de forma clara y detallada que el sistema solar fotovoltaico efectivamente abastece los requerimientos energéticos, cumpliendo con la normativa colombiana RETIE, UPME y la resolución CREG.
- Calcular el presupuesto para la solución técnica definida. **Resultado:** Informe con el valor del Presupuesto de Ejecución del Proyecto. **Indicador:** Desglose de: Mano de Obra, Materiales y Equipos, Herramientas y Transporte, Costos Administrativos.
- Evaluar la solución fotovoltaica propuesta, mediante análisis económicos y de impacto ambiental con el fin de mostrar la viabilidad del mismo. **Resultado:** Matriz de costos, cálculo del retorno de la inversión y cálculo del impacto ambiental. **Indicador:** el análisis debe mostrar el tiempo de recuperación de la inversión, así como una disminución del impacto ambiental en términos de la huella de carbono.

2. ANTECEDENTES

2.1 Acuerdos ambientales en el mundo

El uso del petróleo, el uranio, el gas natural, el carbón, entre otros combustibles obtenidos de fuentes no renovables han movido el mundo por muchas décadas, sin embargo, su uso se quiere reducir rápidamente debido a la degeneración que ha ocasionado al planeta. Por tal motivo las autoridades internacionales en su afán de mitigar el impacto medioambiental han realizado acuerdos que proponen el uso de fuentes de energía renovables implementando diversas tecnologías, para que los diferentes países adapten sus planes de desarrollo en función de la sostenibilidad [4]. A continuación, se exponen las diferentes iniciativas partiendo de lo general hacia lo particular.

2.1.1 *El Acuerdo de París*

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) de París, en cuya Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se alcanzó un acuerdo histórico que busca combatir el cambio climático y agilizar las medidas e inversiones necesarias para alcanzar un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. El acuerdo de París se realizó con base en la Convención y por primera vez en la historia, hace que todos los países tengan un objetivo común para emprender grandes esfuerzos con el fin de combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos, con un mayor apoyo para ayudar a los países en desarrollo a hacerlo. Como tal, traza un nuevo rumbo en el esfuerzo climático mundial [5].

El Acuerdo de París busca como objetivo principal reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, manteniendo el aumento de la temperatura mundial de este siglo muy por debajo de los 2 grados Celsius, con miras a un límite máximo a 1,5 grados Celsius. Además, el acuerdo tiene por objeto aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que las corrientes de financiación sean coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero y una trayectoria resistente al clima [5].

Para alcanzar los objetivos mencionados anteriormente, es preciso establecer un marco tecnológico nuevo y mejorar el fomento de la capacidad, con el fin de apoyar las medidas que adopten los países en desarrollo y los países más vulnerables, en consonancia con sus propios objetivos nacionales, y movilizar y proporcionar los recursos financieros necesarios. El Acuerdo también prevé un marco mejorado de transparencia para la acción y el apoyo, a su vez, busca la educación, la formación, la sensibilización y participación del público y el acceso a la información sobre el cambio climático [5].

2.1.2 El convenio de Viena

Es un instrumento internacional cuyo objetivo es generar las medidas para proteger la capa de ozono de las modificaciones causadas por las actividades humanas; siendo conscientes de la necesidad de acción y cooperación internacional por medio de la investigación y observación sistemáticas, consideraciones y técnicas pertinentes, con el fin de aumentar el nivel de conocimiento científicos sobre la capa de ozono y los posibles efectos adversos de su modificación [6].

El convenio consiste en que las partes se comprometan según sus recursos y posibilidades a cooperar con investigaciones e intercambio de información, con el fin de entender mejor los efectos de la actividad humana sobre la capa de ozono y que causa esta modificación sobre la salud humana y el medio ambiente. Por otro lado, es indispensable, formular soluciones para tales efectos y deben ser adoptadas y puestas en marcha para controlar, limitar, reducir o prevenir tales causas [7].

2.1.3 El protocolo de Kioto

El Protocolo compromete a los países desarrollados a controlar las emisiones de gases de efecto invernadero mientras que la convención sólo concientiza de la problemática para que los países empiecen a generar soluciones [8].

El Protocolo de Kioto establece metas que permitan reducir las emisiones para 37 países desarrollados y la Unión Europea, dando la razón de que son principales responsables de los niveles elevados de Gases de Efecto Invernadero encontrados actualmente en la atmósfera cuya procedencia es en mayor parte producto de quemar combustibles fósiles por más de 150 años [8].

El Protocolo ha presionado a los gobiernos a establecer leyes y políticas para cumplir sus compromisos, a las empresas a tener el medio ambiente en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre sus inversiones, y además ha propiciado la creación del mercado del carbono [8].

2.1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

De acuerdo a la página oficial de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [9], en el 2015 los miembros de las naciones unidas propusieron para la agenda de 2030 17 objetivos con miras en el desarrollo sostenible a nivel mundial. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) pretenden erradicar la pobreza, mejorar la calidad de vida y dignidad humana, además de asegurar protección al planeta y sus ecosistemas.

El objetivo 7 de los ODS es garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Dentro de sus metas se encuentra el aumento de la proporción de energías renovables en el conjunto de fuentes energéticas, la ampliación de la infraestructura y el mejoramiento de la tecnología para prestar servicios energéticos, modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, sin descuidar el entorno global.

El objetivo 9 busca intensificar el uso de tecnologías para la infraestructura con el fin de encontrar soluciones permanentes a desafíos económicos y ambientales, así como un incremento en la eficiencia energética. Algunas de las principales metas de este objetivo consisten en desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas; a su vez, aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo.

El objetivo 12 busca un cambio radical en los métodos de producción y consumo de bienes y recursos. Por lo anterior, algunos de las principales metas de este objetivo consisten en promover prácticas de adquisición pública que sean sostenibles, de conformidad con las políticas y prioridades nacionales. Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.

Las energías renovables son un pilar en los planes de los ODS, siendo estas el enfoque principal para lograr los objetivos climáticos a largo plazo. En el 2017 las energías renovables alcanzaron un porcentaje de 17,3% del consumo total de energía final, representado por un aumento del 1,9% desde el 2010 en la implementación de esta alternativa energética.

2.2 Energía Fotovoltaica en el mundo

2.2.1 *Energía Fotovoltaica en Estados Unidos*

En Estados Unidos la Agencia Internacional de las Energías Renovables previó que para el año 2020 habría 335 mil megavatios de Capacidad fotovoltaica que iluminaría a unos aproximados 64 millones de hogares, lo que equivale a un incremento del 737% con respecto al 2010. Sin embargo, para el cierre del año 2018, la cifra real oficial fue de 486 mil megavatios en todo el mundo, suficiente para generar energía eléctrica para más de 91 millones de hogares estadounidenses en todo el mundo, lo más demandante del planeta [10].

2.2.2 Energía Fotovoltaica en México

México es uno de los 5 países en el mundo con mayor atractivo para invertir en energía solar por su potencial ya que prácticamente todo el país cuenta con una excelente radiación. México cuenta con el privilegio de tener un promedio de irradiación solar de 5.3 kWh/m² por día por lo que tiene un gran recurso solar que permitirá una mayor eficiencia en la obtención de energía [11].

2.2.3 Plan Nacional de desarrollo de Colombia

En el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia [12] se indica un consumo del 30% más de la energía necesaria, debido al uso de equipos ineficientes y malas prácticas, además, el 73% de la energía consumida en Colombia proviene de fuentes fósiles, altamente contaminantes, y sólo el restante 27% del uso de energías limpias, por lo que se establecen los objetivos, para el período 2018-2022, de Implementar soluciones alternativas para el acceso a los servicios públicos en las zonas más apartadas y mejorar la calidad y eficiencia de la prestación de los mismos.

Con base en lo anterior, el país busca aprovechar otros recursos para generar energía, disminuyendo el impacto al calentamiento global, de tal manera que se aseguren los recursos energéticos necesarios para el desarrollo de sus actividades; lo anterior apoyando el desarrollo de proyectos de eficiencia energética que beneficien principalmente a usuarios de bajos recursos. La regulación técnica, energética y ambiental es encabezada por los Ministerios de Agricultura y Minas-Energía, en sus diferentes Comisiones mediante la implementación de iniciativas.

2.2.4 Energía Fotovoltaica en Colombia

Colombia cuenta con un potencial positivo de energía solar fotovoltaica frente al resto del mundo, se puede observar que la mayor parte del territorio nacional cuenta con un buen recurso de brillo solar (horas de sol), alrededor de 4, 8 y 12 horas de Sol al día en promedio diario anual, valores significativos en comparación de países como Alemania el cual cuenta con 3 horas de brillo solar [13]. Por lo anterior, es viable invertir en sistemas fotovoltaicos para aprovechar tan abundante recurso, a mayor tiempo de la radiación solar en los paneles fotovoltaicos, mayor capacidad de generación de los mismos. Es importante tener en cuenta que Colombia está dentro de la zona ecuatorial, aquello no permite que se presenten los fenómenos de estaciones, garantizando un recurso promedio de radiación solar bueno a lo largo del año [14].

Luis Palacios [15] determinó la factibilidad para a implementación de energía fotovoltaica en la vereda Dindal, donde observó un alto interés por la instalación del kit fotovoltaico proveniente de las personas de la zona de estudio, en la cual no es posible hacer llegar

la red energética convencional cuya oferta está monopolizada por la electrificadora regional. Con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes, buscaron alternativas viables económicamente y convenios directamente con el Estado.

De igual manera, Camila Artunduaga [16], determinó un interés del 93% por parte de la población en la implementación de un sistema de energía solar fotovoltaica en la vereda Charguayaco, teniendo en cuenta la recuperación de la inversión inicial y el conocimiento de la energía solar. Con base a la reducción de la tarifa energética convencional, la durabilidad del sistema fotovoltaico y la conservación del medio ambiente, se percibe el proyecto como una alternativa viable para el suministro energético en la comunidad, reforzando la importancia de los sistemas fotovoltaicos en espacios rurales.

Al proponer un sistema de energía solar fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en la sede S de la Universidad Piloto de Colombia, proyectando la edificación como sustentable, Santiago Caicedo [17] determinó la importancia de la ubicación, el clima y el entorno en la generación de energía, haciendo énfasis en el espacio disponible para la instalación como principal limitante de la capacidad potencial instalada; obteniendo un respaldo energético autónomo del 7,31% de la demanda del edificio, producto del inconveniente dimensional. Debido a lo anterior, descartó el uso de baterías, optando por un sistema conectado a la red mediante un medidor bidireccional de corriente, el cual mide la electricidad que se consume de la red convencional y le descuenta la que le puede llegar a entregar en un momento dado el sistema fotovoltaico.

En el diseño de un sistema de generación eléctrica a partir de energía solar fotovoltaica para el municipio de Quebradanegra, William Barrera [18] mostró la importancia de la distancia mínima entre paneles, que permite la movilidad entre ellos, facilita la limpieza y mantenimiento de los mismos, así mismo, previene inconvenientes por la generación de sombra, identificando dicha distancia mínima teórica de 2,04 m. El sistema obtenido posee 5 inversores y 38 paneles con una distribución 3 filas x 8 y 2 filas x 7 y un sistema de almacenamiento de 16 baterías tipo gel de 12 V; sin suplir el 100% de la demanda energética debido a que se implementó un sistema híbrido que trae un mayor beneficio a la comunidad.

Joseph Acero [19] desarrolló una guía metodológica enfocada en la comparación de paneles solares fotovoltaicos para orientar su selección y definir los requerimientos de instalación. Definió una inclinación de panel solar fotovoltaico entre 0° a 50° para la mayor captación solar con dirección de oriente a oeste. Recomienda el uso de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos en edificios ya que es más alto el consumo de energía y el sistema mantiene un mayor rendimiento energético (18%); por otro lado, los paneles policristalinos son adecuados para las viviendas ya que su consumo y rendimiento energético es menor en comparación (14%).

Jeisson Rodriguez [20] comparó los beneficios en tiempo, costo, implementación y puesta en operación de un sistema fotovoltaico contra el sistema convencional de red eléctrica, para un pabellón carcelario modular; concluyendo que un sistema de energía mixto (sistema fotovoltaico y red eléctrica) puede ser fácilmente justificable a partir del valor desde el ahorro en el valor del consumo que se genera a partir de su implementación, de igual forma, los tiempo de implementación, así como su modelo constructivo, pueden ser fácilmente instalados si se cuenta con el área adecuada para ello, ya que no requiere de cortes de energía durante el proceso.

Claudia Espitia [21] realizó una guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia, identificando los cálculos que debe realizar adecuadamente para dimensionar el sistema y conocer la viabilidad técnica y económica de su implementación. Planteó la inclinación de los paneles sobre el eje horizontal, dependiendo de la región de Colombia en la cual se encuentran ubicados, definiendo una inclinación no mayor de 15° en el hemisferio norte, orientados hacia el sur y no mayor de 12° en el hemisferio sur, orientados hacia el norte, recomendando que la inclinación no sea menor de 10° .

Para el desarrollo de lo propuesto anteriormente, la autora dimensionó el proyecto bajo el peor escenario de irradiación solar, lo que permite que la instalación funcione correctamente todos los meses del año. Mediante el análisis financiero concluyó la viabilidad del proyecto mediante la amortización de la inversión inicial con un retorno de la inversión a mediano plazo de 7 años, mediante la disminución de pagos de facturas de energía. Finalmente, sugiere la instalación de un sistema fotovoltaico para autoconsumo con conexión a red, que permita en los momentos de poca radiación solar satisfacer la demanda por medio de la red eléctrica convencional.

3. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

3.1 Generalidades de la empresa

El Supermercado “Siga y Merque” de propiedad del Señor Víctor Delgado Criado, ubicado en el Barrio Portal de la Hacienda del Municipio de Piedecuesta-Santander, es un Centro de Abastos para los hogares ubicados en los barrios: Portal de la Hacienda, Rosal de la Loma, Paseo del Puente 1, Paseo del Puente 2, Tejaditos, Hoyo Grande, Bosques, Piedemonte, Conjunto Benevento, Conjunto Portanova y Conjunto Senapro.

El Supermercado se caracteriza por un Servicio Integral para el sector al cual sirve, dado que cuenta con un completo surtido de Abarrotes, Cárnicos, Aseo, Frutas y Verduras, entre otros. Para la adecuada prestación de este Servicio, específicamente en lo que tiene que ver con la conservación en frío, es lo que representa el mayor consumo de energía eléctrica. El Supermercado cuenta con neveras tanto de exhibición como de conservación de producto. Otro aspecto de consumo de energía eléctrica es el sistema de alumbrado interior del Local. En resumen, el consumo promedio mensual del supermercado es de 3,669 kWh/mes que corresponden a un pago mensual de \$2,867,873 siendo el costo promedio del kW-h de \$779.

3.2 Árbol del problema

Como se puede observar en la figura 1, el alto consumo de energía que representan principalmente los equipos de refrigeración y de conservación de cárnicos son los que impactan en los altos costos de energía del Supermercado con el consecuente impacto en la utilidad neta del ejercicio mensual del negocio, tanto así que puede llegar a representar hasta un 25% de tal utilidad. Lo anterior, hace que, no sea llamativo hacer inversiones en tecnificación o ampliaciones al Supermercado, o dar uso a tales utilidades en nuevos Proyectos que impacten positivamente a la economía de la región.

Figura 1.Árbol del problema de investigación



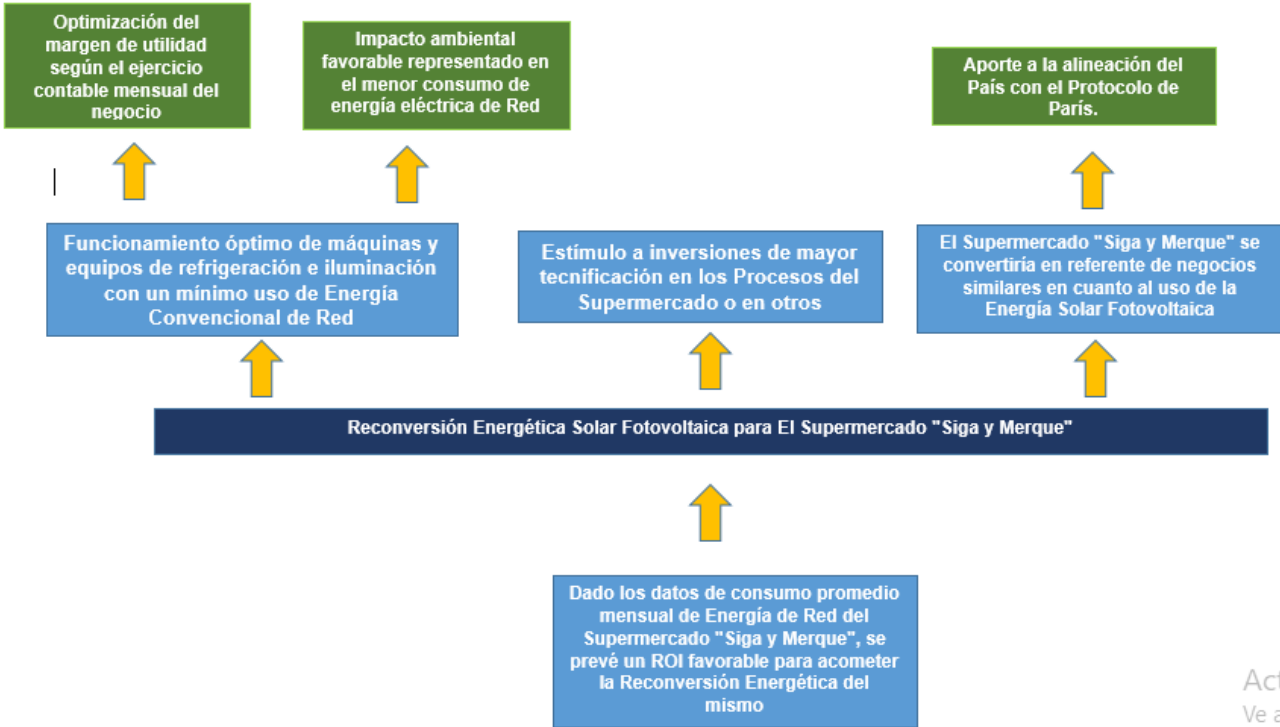
Fuente: autores

3.3 Árbol de objetivos

Al observar la figura 2 del Árbol de objetivos, la reconversión energética del Supermercado "Siga y Merque" siendo la fuente principal de energía la solar fotovoltaica en modo On- Grid, con suministro de red de la ESSA como fuente secundaria, permite el adecuado funcionamiento de las diferentes áreas de conservación y comercialización que se llevan a cabo en el Supermercado. Igualmente, sería óptimo el uso de la energía eléctrica obtenida del sistema fotovoltaico, con los ahorros que se reflejarán en el ejercicio contable del año para el Supermercado, además de impactar positivamente en lo ambiental, al minimizar el uso de la energía eléctrica convencional de red. Adicional a lo expuesto, ya se contaría con estímulo para hacer nuevas inversiones bien sea en el mismo Supermercado o en otros Proyectos que tenga en mente el Propietario y que beneficien a la economía del sector. Finalmente, El Supermercado "Siga y Merque" sería

referente con esta implementación para otros negocios de similares características, con lo cual se aportaría a la masificación de esta clase de Proyectos, los que estarían alineados con la Política Macro del Gobierno Nacional, expresados en el Plan Nacional de Desarrollo.

Figura 2.Árbol de objetivos del problema de investigación



Activa
Ve a Co

Fuente: autores

4. JUSTIFICACIÓN

La razón principal del Proyecto de Grado propuesto es resolver la problemática energética y económica del Supermercado “Siga y Merque”, mediante el diseño de una alternativa técnica y económica viable, fundamentada en el uso de la energía solar fotovoltaica como fuente principal del suministro de energía eléctrica, sin obviar el uso de la energía de red de la Electrificadora de Santander (ESSA), esquema conocido como Sistema Solar On- Grid.

Por otro lado, se busca que el presente proyecto en el Supermercado “Siga y Merque”, por sus resultados pueda ser replicado en otros negocios de similares características en función de un resultado masivo con los beneficios técnicos y económicos que este sector puede aportar a la economía del País.

Igualmente, se espera que con este Proyecto se pueda difundir el conocimiento práctico en energía solar fotovoltaica, creando consciencia del uso de las energías limpias dentro del gremio de los Supermercados y la población asociada a este sector de la economía.

Finalmente se desea aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las metas del Acuerdo de París integrados en el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia.

5. ALCANCE

Con este proyecto de investigación se pretende presentar el diseño Eléctrico, Electrónico y Mecánico del Generador Fotovoltaico para el Supermercado "Siga y Merque". Se incluye el presupuesto para la ejecución de las obras de construcción con el fin de que, si el propietario desea ejecutarlo, pueda saber exactamente los costos de esta inversión. Por otra parte, se incluye el cálculo del retorno de la inversión junto con un estudio del impacto ambiental en función de la huella de carbono para así demostrar la viabilidad de la ejecución.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 La energía solar fotovoltaica

La Energía Renovable es aquella que se restaura mediante procesos naturales a un ritmo semejante o superior a su utilización. Se adquiere de los flujos de energía constante que están presentes en el medio ambiente natural, manteniendo como recurso la biomasa, la energía solar, el calor térmico, la energía hidroeléctrica, la energía mareomotriz, y del oleaje, la energía térmica oceánica, y la energía eólica [22].

La radiación solar interceptada por la tierra constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance, llegando a ser 4500 veces la energía consumida anualmente, representada en una captación de $5,4 \times 10^{24}$ J. La captación de la energía solar se obtiene a través de la radiación directa, incidencia en los objetos iluminados por el sol, o la radiación difusa, radiación absorbida por el aire y el polvo atmosférico. La primera es aprovechable de forma directa, mientras que las células fotovoltaicas aprovechan la segunda [11].

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de equipos eléctricos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar; está constituido por paneles solares o fotovoltaicos, que conforman un generador fotovoltaico, con celdas capaces de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua; Inversor, Regulador de carga y Cableado [21], [22].

La transformación de energía solar, en energía eléctrica, se debe al efecto fotovoltaico. Este efecto convierte la luz en electricidad, a través de un material que absorbe los fotones de la luz, y posteriormente emite electrones; los electrones se desplazan intercambiando posiciones, y produciendo una corriente eléctrica [11].

6.2 La célula solar

Las células fotovoltaicas son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, en un proceso en el que la luz que se incide sobre un dispositivo semiconductor, de dos capas, produce una diferencia del voltaje o del potencial entre las mismas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo que se pueda producir trabajo útil. Las células solares están hechas de materiales semiconductores tales como el silicio, que se usan en la industria microelectrónica [22], [23].

El efecto fotovoltaico se produce cuando el material de la celda solar, silicio u otro material semiconductor, absorbe parte de los fotones del sol. Al momento de introducir impurezas

controladas en un cristal, se puede considerar el uso de átomos con mayor o menor cantidad de electrones de valencia al silicio (cuatro). Al impurificar un cristal de silicio con un átomo de cinco electrones de valencia, el quinto electrón no queda bien integrado en la red; quedando libre en la banda de conducción, luego de la ruptura del enlace, pero generando un ion positivo, ligado a la red cristalina sin poder contribuir a la conducción eléctrica; bajo estas condiciones, la cantidad de electrones es superior a los huecos para los mismos, lo que se clasifica como un semiconductor tipo N. En el dopaje con átomos de menor cantidad de electrones de valencia, se obtiene mayor cantidad de huecos a electrones, luego de la ruptura, obteniendo un semiconductor tipo P [24].

La unión de un semiconductor tipo N con un tipo P produce un flujo de electrones en dirección N-P. Este intercambio de portadores origina una polarización positiva en el semiconductor tipo N y negativa en el semiconductor tipo P, que genera un campo eléctrico [25].

Una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para formar un campo eléctrico en las celdas solares; cuando la radiación solar llega hasta la celda, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Los electrones pueden ser captados en forma de corriente eléctrica al momento de definir un circuito eléctrico, contemplando su utilización, aprovechando la electricidad para generar una potencia útil [23].

6.3 El panel solar

Un módulo fotovoltaico es un conjunto de células o celdas, protegidas físicamente de las condiciones externas y aisladas eléctricamente del exterior, dando rigidez mecánica al conjunto. Las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales, mediante la realización de agrupaciones en serie y paralelo, es posible entregar la tensión y corriente adecuada [24].

Una agrupación en paralelo, es aquella en que los polos positivos están conectados entre sí, y por separado los negativos, consiguiendo aumentar la corriente generada y manteniendo un mismo valor de tensión. En una conexión en serie, el polo positivo de un panel, está conectado con el polo negativo del siguiente, logrando aumentar la tensión y manteniendo un mismo valor diferente. Finalmente, el conjunto de uniones en serie y paralelo se les conoce como agrupación mixta [26].

En los sistemas solares fotovoltaicos existe la posibilidad de emplear elementos seguidores del movimiento del Sol que favorezcan y aumenten la captación de la radiación solar. El sistema más habitual es un soporte sencillo sin movimiento con el

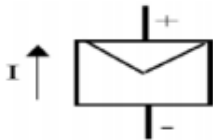
inconveniente de no aprovechar toda la radiación solar posible, debido a que su orientación e inclinación es fijada al momento de la instalación [27].

Los sistemas de seguimiento solar pueden ser de un eje o dos ejes, los primeros, realizan cierto seguimiento solar por medio de un solo eje horizontal, vertical u oblicuo, pero logrando seguir únicamente la inclinación o el azimut (ángulo de la orientación sobre la superficie de la tierra) del sol. El sistema de seguimiento de dos ejes, puede realizar una captación total del sol, mediante la incidencia perpendicular al panel [27].

Para elegir el tipo de instalación adecuado, es necesario conocer el consumo a suplir por la misma. Para consumos muy pequeños se utiliza una instalación de 12 V, representado por 36 celdas solares conectadas en serie; para consumos medianos, una tensión de 24 V con 72 celdas; finalmente, para consumos elevados, se recomienda una instalación a 48 V [26].

En símbolo de un panel solar es necesario indicar el sentido de la corriente eléctrica generada, así como la polaridad de las conexiones [26].

Figura 3. Representación del panel solar



Fuente: IMPLEMENTACIÓN DE PANELES SOLARES EN CASA HABITACIÓN

Las tecnologías basadas en el silicio representan el 90% de la producción mundial fotovoltaica, existen principalmente en el mercado tres tipos de celdas según la tecnología del tipo de cristal, todas ellas de silicio [26].

6.3.1 Panel Monocristalino

Esta constituido de un solo cristal de silicio de muy alta pureza, es reconocido por tener un color azul homogéneo, tiene un rendimiento de hasta 16% en su eficiencia energética y su vida útil es aproximadamente de 25 años. Constituyen el precio más elevado del mercado [26]. Su uso es más frecuente en climas fríos con tendencia de tormenta o niebla, ya que este tipo de placas solares tienden a absorber mejor la radiación, y tolera menos el sobrecalentamiento [22].

6.3.2 Panel Policristalino

Es fabricado de silicio mezclado con arsenio y galio, su proceso de producción es más económico, debido a que se reducen las faces de cristalización. Su rendimiento es algo menor al los 20 años y se identifica mediante las diferentes tonalidades de azul. La eficiencia energética de este tipo de panel puede llegar hasta el 12% [26].

6.3.3 Amorfo

Se obtiene al depositar una lámina delgada de materiales fotovoltaicos sobre una base de vidrio o plástico. Y como principal ventaja de este panel es que se puede adaptar fácilmente a cualquier superficie [19]. Su eficiencia energética es de aproximadamente el 8%, es posible reconocer este tipo de paneles gracias a su color marrón homogéneo [26].

6.3.4 Número de células

El número de células en un panel, su voltaje y corriente de salida, depende del material y la estructura cristalina del semiconductor usado [11]. Las células fotovoltaicas cristalinas proporcionan un voltaje en circuito abierto de 0,5 voltios aproximadamente, independientemente del tamaño que tengan. La corriente eléctrica que producen es de unos 0,25 amperios (250 miliamperios) por cada pulgada cuadrada de célula. Las células solares pierden eficacia de voltaje cuando su temperatura aumenta. Por cada aumento de 6°C, el rendimiento disminuye aproximadamente un 3% [28].

Los paneles comerciales de 12 V normalmente contienen 36 células, mientras que los 24 V mantienen 72 células, de igual forma existen paneles de 30, 32,33, 44 y 60 células; los paneles con una cantidad superior a las 36 células, necesitan sistemas de regulación debido a su alcance excesivo de voltaje. Aquellos paneles que tienen menos de 30 o 33 células, producen un voltaje que se puede aplicar directamente a la carga [28].

6.4 El generador solar fotovoltaico

El Generador Solar Fotovoltaico es el encargado de transformar la energía solar en energía eléctrica, conformado por varios paneles fotovoltaicos, a su vez compuestos por células fotovoltaicas. La unión de paneles fotovoltaicos, en serie y/o paralelo, proporcionará la cantidad de energía necesaria para el consumo [21].

Un generador fotovoltaico se compone de un total de módulos y ramas; el número de módulos por serie (N_s) define la tensión del generador ($V_g = N_s \cdot V_m$), mientras el número de ramas (N_p) define la corriente total del generador ($I_g = N_p \cdot I_m$) [24].

6.5 La hora solar pico

Los paneles solares fotovoltaicos, no son capaces de producir su potencia máxima en cualquier condición. Los factores climatológicos, inclinación y de orientación alteran la potencia obtenida por los paneles, dependiendo directamente de las horas de radiación solar disponibles según su lugar de instalación. La energía por unidad de tiempo y área que alcanza la tierra, se define como Irradiancia o recurso solar cuya unidad de medida es W/m^2 [29].

El recurso solar se obtiene a partir de un promedio diario, semanal, mensual o anual de la energía captada en un lugar específico. La cantidad de irradiación recibida en un captador durante una hora se denomina Hora Pico equivalente a $1000 Wh/m^2$. Para expresar al recurso solar en unidades de horas-pico, debe recordarse que el área bajo la curva de Irradiancia contra tiempo representa la irradiación del día [29].

Al convertir el área bajo la curva en un rectángulo cuya altura corresponda a una hora Pico, entonces la base de este rectángulo es el número de horas en que supuestamente el Sol debería haber brillado con esta intensidad. Para obtener el valor de hora solar pico, se debe dividir el valor de horas correspondientes a la base del rectángulo entre el valor de potencia de una hora pico [11].

La cantidad de días con bajo o nulo recurso solar, durante los cuales funcionará la instalación, se conocer como días de autonomía [26]. La Irradiancia no será la misma en ningún mes del año, por ello, es importante calcular las HSP para obtener un resultado satisfactorio, donde los meses de alta Irradiancia sean prioritarios, debido a que, los meses de más baja Irradiancia, no cubrirán las necesidades reales [29].

Colombia está caracterizada por las regiones Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia. En la región Andina la intensidad de la radiación posee mayor potencial en las zonas del Valle del Cauca y del Magdalena, disminuyendo gradualmente en la subida de las cordilleras, con excepción de los altiplanos.

En Bucaramanga, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) cuenta con varias estaciones meteorológicas repartidas a lo largo de la ciudad con datos históricos desde el 2001 hasta el 2011. En la Tabla 1 se muestran las horas solar pico en Bucaramanga para los años comprendidos entre el 2001 y 2011 en KW/m^2 [30].

Tabla 1. Hora solar pico Bucaramanga

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2.001,00	5,30	5,30	5,20	5,90	5,30	5,60	5,80	5,00	5,50	5,20	4,90	4,10	5,26
2.002,00	5,50	5,30	5,50	5,20	5,40	4,80	5,00	5,40	5,70	5,50	5,30	4,80	5,28
2.003,00	5,20	5,60	5,80	6,60	6,30	5,60	4,80	5,20	5,20	4,80	4,80	4,90	5,40
2.004,00	4,90	5,70	5,50	4,60	5,10	5,10	4,70	5,30	5,30	5,20	4,90	4,90	5,10
2.005,00	4,50	4,80	6,30	5,20	5,60	4,70	4,90	4,90	4,90	5,30	4,60	4,50	5,02
2.006,00	4,90	5,50	5,10	4,90	5,20	4,70	4,40	5,00	5,10	4,90	4,80	4,40	4,91
2.007,00	5,50	6,10	5,30	5,50	4,90	4,30	4,80	4,70	5,20	5,20	4,80	4,90	5,10
2.008,00	5,20	5,80	5,80	5,40	5,60	4,80	5,00	5,30	5,20	5,10	5,00	4,70	5,24
2.009,00	5,40	5,90	5,60	6,10	5,50	4,80	5,00	5,20	5,40	4,90	5,00	4,70	5,29
2.010,00	5,40	5,80	5,70	5,30	5,30	4,90	5,00	5,20	5,20	5,10	5,10	4,90	5,24
2.011,00	5,10	6,00	5,40	5,90	5,20	4,10	5,00	5,00	5,30	5,30	5,10	4,70	5,18
Promedio	5,17	5,62	5,56	5,51	5,40	4,85	4,95	5,11	5,27	5,14	4,94	4,68	

Fuente: ENERGÍA SOLAR: ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA PARA EL EDIFICIO YARIGUIES DE LA UNIVERSIDAD DE SANTANDER UDES

6.6 Carta solar

La carta solar es una representación gráfica de los valores angulares que permiten definir la dirección de los rayos solares en un momento concreto; sus tipos difieren principalmente según el tipo de superficie por la que se proyecta la trayectoria solar y el dato que se necesite conocer, pero, parten de simplificaciones de la mecánica del movimiento solar que permiten adoptar un modelo abordable desde el punto de vista gráfico [31].

Las cartas solares, como representación gráfica de la trayectoria del Sol sobre la esfera celeste, se generan por proyección de dichas trayectorias sobre una superficie. Los valores extremos de interés en las cartas solares son las efemérides astronómicas de solsticios y equinoccios, que coinciden aproximadamente con los días 22 de los meses de diciembre, de marzo, de junio y de septiembre [31].

Para identificar una hora solar sobre una trayectoria en específico, es necesario tomar el valor de las 12:00h solar en el punto de la trayectoria que se encuentra sobre el meridiano del lugar y medir desde dicho punto distancias angulares de 15° sexagesimales. Para definir una hora en concreto, el vector solar se establece por la dirección de la recta que une el punto considerado, u origen, con el centro de la esfera celeste o extremo [31].

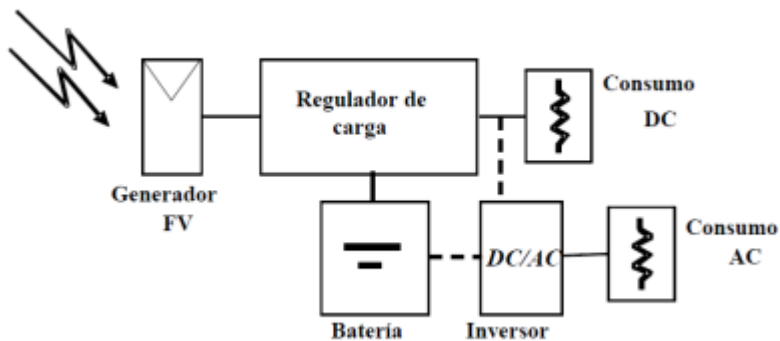
6.7 Tipos de generación fotovoltaica

Un Sistema Fotovoltaico está conformado por varios componentes capaces de suplir la demanda energética impuesta por la carga, usando como combustible la energía solar. Con base en lo anterior, es la carga eléctrica la que determina el tipo de componentes que deberán utilizarse en el sistema. Un sistema fotovoltaico dispone de los siguientes componentes: Modulo o generador fotovoltaico, regulador de carga, batería, inversor y cables. Existen tres tipos de sistemas de acuerdo a su interacción con la red eléctrica [21].

6.7.1 Sistema Off-Grid

Son sistemas fotovoltaicos no conectados a la red eléctrica que se encarga del suministro eléctrico de instalaciones aisladas. Este tipo de generación debe ser autosuficiente con el consumo requerido. Los componentes de un sistema Off-Grid y su configuración se presentan a continuación [32].

Figura 4. Componentes off-Grid



Fuente: *Curso Técnico Energía Fotovoltaica*

- *Generador fotovoltaico*

Como se mencionó anteriormente, el generador es el encargado de transformar la energía del Sol en energía eléctrica. Está formado por varios paneles fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo [21].

- *Inversor*

El generador fotovoltaico suministra corriente directa (D.C.) al sistema, a través del inversor es convertida en corriente alterna (A.C) requerida por la carga. Se define al inversor como cualquier conversor estático de potencia con control, protección y funciones de filtrado, utilizado para interconectar una fuente de energía eléctrica con un sistema eléctrico de servicio público o la carga [21].

- *Cables eléctricos*

Debido a la magnitud de salida de voltaje de los sistemas fotovoltaicos, las corrientes que fluirán a través de los cables son mucho más altas que las de los sistemas con voltaje de 110 o 220V AC, llegado a ser casi 20 veces mayor. Debido a lo anterior, es necesario utilizar cables mucho más gruesos para disminuir riesgos tales como recalentamiento o la

quemado de los cables; por consiguiente, los cables utilizados en un sistema fotovoltaico son diseñados especialmente para el tipo de aplicación requerida [21].

- *Batería*

Las baterías solares se utilizan en las instalaciones fotovoltaicas Off-Grid, es decir, las instalaciones no conectadas a la red, sin embargo hay instalaciones conectadas a la red que tienen baterías solares. Las funciones de la batería es el almacenamiento de la energía solar y el suministro de una intensidad de corriente mayor a la que recibe el panel solar [11].

Consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad, las cuales tienen un electrodo positivo y uno negativo con movimiento de iones a través de electrolitos, lo que facilita el flujo de corriente fuera de la batería. En el transcurso del día el panel solar suministra la electricidad a los electrodomésticos que estén conectados a la red, el excedente es almacenado en la batería de la instalación, quien toma protagonismo en horarios nocturnos, abasteciendo la demanda energética [11].

- *Regulador de carga*

Las baterías deben ser protegidas de una descarga por debajo del nivel de tensión final de descarga (sulfatación) y una sobrecarga por encima del nivel final tensión de carga (hervor del electrolito) especificados por el fabricante; por lo tanto, el regulador de carga es aquel que cuantifica la carga y descarga del banco de baterías, además de prolongar la vida útil del mismo [11].

Dentro de las funciones de un regulador de carga se encuentra impedir la descarga de las baterías a través de los paneles durante la noche, evitar la sobrecarga y sobredescarga de las baterías, además de mantener abierto el circuito si el voltaje de salida de los paneles es menor al del banco de acumulación [11].

6.7.2 Sistema On-Grid

Los sistemas conectados a la Red On-Grid, se caracterizan por devolver energía sobrante a la red eléctrica de la empresa proveedora de energía, en lugar de almacenarla en baterías. Un sistema On Grid está conformado por un generador fotovoltaico, el cual capta y transforma la radiación en energía eléctrica; el inversor de corriente que transforma la corriente directa en alterna; un medidor bidireccional que permite contabilizar el total de energía que se ha generado por medio de los módulos

fotovoltaicos; la carga y finalmente una conexión a la red eléctrica, esa última permite la utilización tanto del generador fotovoltaico como del suministro de red pública [11].

En general, un sistema On-Grid genera energía para el autoconsumo en los momentos de insolación, inyectando el excedente a la red; mientras que los momentos en que la radiación solar es insuficiente, el consumo se abastece automáticamente desde esta última. Por seguridad, el sistema no funciona en cortes de suministro eléctrico, dando protección a operarios trabajando en el tendido eléctrico [11].

6.7.3 Sistema mixto

Un sistema híbrido utiliza dos o más fuentes de alimentación distintas, cuentan con baterías para localizaciones aisladas y con grupo electrógeno de back up, que se enciende en caso de que la energía obtenida no sea suficiente, debido a lo anterior no es necesario sobredimensionar el generador solar para los periodos de baja Irradiancia. En el sistema el uso de energía suministrada por el módulo fotovoltaico es prioritario, al combinarlo con una segunda fuente, se obtiene un suministro de energía fiable y disponible constantemente. En este sentido, en un sistema fotovoltaico solar híbrido es una combinación de la tecnología de la energía solar y la Red Eléctrica de forma de poder integrar de la mejor forma ambas fuentes de Energía [11].

En este sistema el inversor toma gran relevancia permitiendo el uso de la red eléctrica y el uso de baterías, puesto que están diseñados para poder aprovechar al mismo tiempo las diferentes fuentes de energía como son: energía fotovoltaica, eólica, red eléctrica y grupo electrógeno. Este equipo integra las diferentes fuentes de energía y gestiona su uso dando prioridad a cada una, dependiendo de las necesidades [11].

6.8 Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos On-Grid

6.8.1 Inversores fotovoltaicos

Los inversores convierten la corriente continua (CC) en corriente alterna (AC). Las características deseables para un inversor son principalmente la alta eficiencia, manteniendo el funcionamiento para un amplio rango de potencias; bajo consumo sin carga; alta fiabilidad en los picos de arranque; protección contra cortocircuitos; seguridad; buena regulación de la tensión y frecuencia de salida. En la siguiente imagen se pueden observar las características principales de un inversor, en la ficha técnica suministrada por el fabricante [11].

Las características de salida del inversor, representadas en corriente alterna, están principalmente conformadas por la forma de onda, comúnmente una señal sinodal con

su valor eficaz y variación especificada; distorsión, indica la posible degradación de la onda; y frecuencia de la señal, la cual debe coincidir con la de la red eléctrica para mantener la estabilidad [11].

Figura 5. Características de inversores

Model SI	612 624 648	812 824	1212 1224 1248	1624	2324 2348	3324	3548
Input voltage (Unom) [V]	12/24/48	12/24	12/24/48	24	24V/48	24	48
Nominal power [W]	600	800	1200	1600	2300	3300	3500
« Standby » current [mA]	25/21/10	25/21	25/21/12	21	25/17	25	30
Power « ON » no load [W]	2.6	2.8	4.8	5.8	9	13	17
Power « ON » no load [W] TWINPOWER system	-----	-----	< 0.5	< 0.5	< 0.6	< 0.7	< 0.8
Maximum efficiency [%]	91	92	93 - 95	93 - 95	95	95	95
Length L x 124 (H) x 215 (W) [mm]	276	276	391	391	591	636	791
Weight [kg]	6.9	10.4	13.2	15.2	27	30	38

Tensión de entrada: debe coincidir con la tensión nominal de las baterías

Potencia nominal: es la potencia que es capaz de entregar el inversor a la instalación. Siempre será mayor que la que hayamos calculado como consumo de los equipos que van a funcionar en alterna.

Corriente en reposo

Rendimiento máximo: importante, porque nos indicará la potencia real entregada por el convertor, que siempre es menor que la potencia nominal del mismo. Es un factor a tener en cuenta cuando hagamos el dimensionado de la instalación

Potencia en vacío, cuando no hay carga conectada

Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

La variación que puede tener la frecuencia de salida en el inversor, especificada por el fabricante, toma importancia en las instalaciones conectadas a la red, pues es un parámetro limitado por normativas en su valor máximo, debido las repercusiones que pueden tener en el sistema [11].

Además de realizar la conversión de continua a alterna, el inversor debe sincronizar la onda eléctrica generada con la de la corriente eléctrica de la red, para que su compatibilidad sea total. Los parámetros que determinan las características y prestaciones de un inversor son la potencia máxima que podrá suministrar a la red eléctrica en condiciones óptimas, la gama de potencias en el mercado abarca desde los 50 W a 400W para pequeños campos fotovoltaicos, hasta potencias de varios kilovatios; las fases; el rendimiento energético, actualmente en el mercado los inversores tienen un rendimiento medio en torno al 90%, siendo mayor cuanto más próximo se encuentra a su potencia nominal, para un funcionamiento óptimo de la instalación, la potencia de pico del campo fotovoltaico nunca debe ser menor que la potencia nominal del inversor; y las protecciones [11].

Las protecciones principales que un inversor debe incorporar están dadas por un interruptor automático, sobre el cual actuarán los relés de mínima y máxima tensión; el

rearme del sistema de conmutación; funcionamiento aislado, para evitar la posibilidad de funcionamiento cuando ha fallado el suministro eléctrico o su tensión ha descendido por debajo de un determinado umbral; limitador de tensión máxima y mínima; limitador de frecuencia máxima y mínima; protección contra contactos directos; protección contra sobrecarga; protección contra cortocircuito; y finalmente, bajos niveles de emisión e inmunidad de armónicos [11].

Un microinversor es un inversor solar de tamaño reducido conectado directamente a cada módulo solar, en la parte posterior, cumpliendo con la función convertir de manera individual, la corriente continua generada por cada módulo en corriente alterna; algunos microinversores pueden llegar a compartir dos módulos fotovoltaicos. Los microinversores tienen la capacidad de extraer la máxima potencia en cada panel y minimizar el efecto sombra, permitiendo que el rendimiento del sistema fotovoltaico no sea afectado en gran medida por este [11].

Los reguladores MPPT (Maximum Power Point Tracking o Rastreador del Punto de Máxima Potencia) utilizan toda la potencia que puede producir un panel solar, suelen ser utilizados en instalaciones de tipo más complejo o que necesiten una cantidad de potencia elevada, mitigando las pérdidas, producidas por la ausencia de control, sobre la cantidad que se envía a las cargas. La unión de un regulador MPPT y una alta seguridad y versatilidad, puede generar instalaciones de muy alto rendimiento [11].

La cantidad de módulos fotovoltaicos conectados en serie se denominan string, los inversores fotovoltaicos tienen entradas directas para los strings generando disponibilidad de conexión de filas de módulos solares conectados en serie [21].

Los inversores vienen caracterizados principalmente por la tensión de entrada, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia [21]. La potencia a manejar por el inversor está dada por la Ecuación 1.

$$P_{inversor} = P_{panel} * N^{\circ} \text{ paneles} \quad (1)$$

Con base en la ecuación anterior, se selecciona un inversor que mantenga un rango de potencia de campo fotovoltaico acorde al resultado. Se procede con el cálculo de la cantidad máxima de paneles según la Ecuación 2.

$$N_{de \text{ paneles en serie}} = \frac{V_{Max \text{ entrada inversor}}}{V_{oc \text{ Panel}}} \quad (2)$$

Se debe verificar el voltaje máximo de los paneles en serie, utilizando la Ecuación 3.

$$Voltaje \text{ de MP de los paneles en serie} = V_{maxpot} * N^{\circ} \text{ paneles en serie} \quad (3)$$

Con base en el número de paneles necesarios calculados y los paneles en serie, se debe cuantificar el número de ramales en paralelo a instalar por medio de la Ecuación 4.

$$N^{\circ} \text{ Ramas en paralelo} = \frac{N^{\circ} \text{ Total de paneles}}{N^{\circ} \text{ paneles en serie}} \quad (4)$$

6.8.2 Cables eléctricos para los sistemas fotovoltaicos

Los materiales de conductores más utilizados en instalaciones solares residenciales y comerciales son el cobre y el aluminio. El cobre mantiene una conductividad mayor que la del aluminio, mientras este último es menos costoso, pero puede ser debilitado durante la instalación. El aislamiento que cubre el alambre puede proteger el cable del calor, humedad, luz ultravioleta o químicos, en la Tabla 2 se muestran algunos tipos de aislamiento y su respectiva función [11].

Tabla 2. Tipos de aislamiento

Tipo de aislamiento	Lugar de uso
THHN	Se utiliza comúnmente en lugares secos, interiores.
THW, THWN y TW	Pueden utilizarse en interiores o para aplicaciones húmedas al aire libre en el conducto.
UF	Son buenos para aplicaciones húmedas o subterráneas.
PV, USE-2 cables RHW-2	Pueden ser utilizado en condiciones húmedas al aire libre donde su cableado externo es UV y resistente a la humedad.
XLPE	Aislamiento termoestable; mezclas las propiedades de la goma con las características mecánicas y eléctricas del polietileno. Posee resistencia al ozono, humedad, calor, agentes químicos y rayos solares.
PVC	Aislamiento termoplástico; se utiliza preferiblemente en conductores de baja tensión debido a su bajo costo.
EPR	Resistente a la ionización utilizado especialmente en instalaciones de alta tensión.

Fuente: RETIE sección 21.8.2 b

Para conectar los distintos paneles solares con el tablero de conexión y con los equipos de control, la norma RETIE en su sección 21.8.2 b dictamina que los conductores deben

ser de tipo cables aislados con materiales de alta calidad para que se asegure la durabilidad y la fiabilidad del sistema a la intemperie y a la humedad, certificados para usos en sistemas fotovoltaicos, con el fin de reducir el riesgo de falla a tierra, cortocircuito y contacto a personas. El cable fotovoltaico, o cable PV, es un cable de un solo conductor utilizado para conectar los componentes de un Sistema Fotovoltaico, creado específicamente para este tipo de aplicaciones, donde es necesario llevar la energía eléctrica a una caja combinadora o punto de almacenamiento [33].

Para el dimensionamiento de los cables existen tres tipos de criterios, el criterio térmico o de máxima intensidad, el criterio de caída de tensión y el criterio de intensidad de cortocircuito [33].

En el criterio térmico de máxima intensidad admisible el cálculo de la sección del conductor está en función del tipo de instalación, agrupamiento, tipos de cables y el parámetro de intensidad máxima en régimen permanente; se busca asegurar que el aislamiento del cable no sufra daños por exceso de temperatura en régimen permanente, para ello la temperatura del conductor no puede ser mayor a la máxima admisible utilizada como aislamiento del cable. La temperatura máxima del conductor varía en función del tipo de su aislamiento [33].

La normativa NTC 2050 sección 220.3 exige el dimensionamiento de los cables de conexión para una intensidad no menor al 125% de la máxima intensidad del generador. La intensidad máxima admisible para los conductores de cobre en una instalación al aire en galerías ventiladas se observa en la Tabla 3. Existen factores de corrección para este parámetro dependiendo de las agrupaciones de cables unipolares instalados al aire y de la temperatura ambiente.

Tabla 3. Intensidad admisible para conductores de cobre según la RA8-003

AWG	AREA SECCIONAL EN MILIMETRO CUADRADOS	Capacidad corriente conductores canalizados (no mas de 3) y temperatura ambiente de 30°C			Capacidad corriente conductores al aire libre y temperatura ambiente de 30°C		
		60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C
		16	1,308	-	-	18	-
14	2,08	20	20	25	25	30	35
12	3,308	25	25	30	30	35	40
10	5,261	30	35	40	40	50	55
8	8,365	40	50	55	60	70	80
6	13,301	55	65	75	80	95	105
4	21,15	70	85	95	105	125	140
3	26,67	85	100	110	120	145	165
2	33,63	95	115	130	140	170	190
1	42,407	110	130	150	165	195	220
0	53,475	125	150	170	195	230	260

Fuente: autores

La circulación de corriente por medio de los conductores conlleva una pérdida de potencia representada por la caída de tensión de este proceso, el criterio de caída de tensión, dado por la normativa NTC 2050 sección 530, limita a un 1.5% a este parámetro para los conductores que conectan el generador fotovoltaico con el inversor. Mrabet Zerrouk [33] en su memoria de cálculos recomienda para la parte de corriente alterna que la caída de tensión sea inferior del 2%, teniendo en ambos casos como referencia las tensiones correspondientes a cajas de conexiones.

Es importante minimizar la longitud del cable a utilizar con el fin de disminuir al máximo las pérdidas, que sobretodo se incrementan con longitudes largas del conductor, para ello se utiliza la expresión de cálculo de caída de tensión que se produce en una línea (ver Ecuación 5) con el fin de verificar el impacto que mantiene la longitud seleccionada para el cable a instalar, en relación con su área transversal [34].

$$S = \frac{2 * L * I}{\Delta V (\%) * U * \sigma} \quad (5)$$

Donde S es la sección teórica del conductor en [mm²]. L es la longitud del conductor [m]. I es la corriente de cortocircuito de los paneles [A]. ΔV (%) es la caída de tensión [V]. σ es la conductividad del elemento que forma el conductor, para el cobre electrolítico la conductividad a 90°C es de 44 m/Ω*mm². U es la Tensión en el ramal.

Finalmente, en el criterio de intensidad de cortocircuito, se estipula la temperatura alcanzada por el conductor como consecuencia de un cortocircuito de corta duración, no mayor a 5 segundos. Comprobar los esfuerzos térmicos en cortocircuito, se reduce a verificar que la temperatura del cable no supere la temperatura máxima admisible de cortocircuito [33].

6.8.3 Protecciones

Las protecciones son una serie de elementos ubicados estratégicamente para la detección y eliminación de incidentes, seguridad para equipos y personal de mantenimiento y la correcta explotación de la instalación. Son las encargadas de detectar las anomalías producidas procurando dejar para servicio el menor tramo posible de la instalación al aislar el sector afectado [11]. A continuación, se puede observar algunos tipos de falla presentes en un Sistema Fotovoltaico con sus respectivas causas y consecuencias (ver Tabla 4)

Tabla 4. Tipos de falla encontradas en un S.F.

TIPO DE FALLA	CAUSAS	CONSECUENCIAS
Falla a tierra	Deterioro de aislamiento (i.e. rayos UV, humedad, calor, sobrevoltajes, envejecimiento, químicos), daño al instalar, mala instalación. Cable suelto en caja de conexiones, abrasión, roedores, etc.	Posibles: descarga eléctrica, arcos, fuego, corriente inversa en módulos, sobrecorrientes y pérdida de potencia.
Cortocircuito		Pérdida de potencia, posibles arcos y fuego, por consiguiente, daño al sistema de CD.
Circuito abierto	Mala instalación, componentes inadecuados, fatiga por ciclos térmicos o vibración.	Pérdida de potencia, posibles arcos eléctricos y fuego.
Sobrevoltaje inducido	Descargas atmosféricas.	Posibles daños a componentes, particularmente a equipos electrónicos
Sobrevoltaje directo	Descargas atmosféricas directas.	Daños al generador y equipos electrónicos.
Sombreado	<i>Cell mismatch</i> , celdas defectuosas, basuras, aves, localización inapropiada.	Generación de puntos calientes y posible destrucción del módulo.

Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

Existen tres tipos principales de protecciones eléctricas, el primero definido como protección contra sobrecargas, donde la falla genera un exceso de intensidad en el circuito y la función de la protección es de despejar el defecto, en un tiempo inversamente proporcional a la intensidad de sobrecarga. Un equipo de protección contra sobrecarga deberá cumplir con las siguientes condiciones presente en la siguiente ecuación [33].

$$I_t \leq I_n \leq I_{adm} \wedge I_{df} \leq I_{adm} * 1.45 \quad (6)$$

Donde I_t es la intensidad de funcionamiento del circuito, I_n la intensidad nominal del interruptor e I_{adm} la máxima intensidad admisible por el cable, I_{df} es la intensidad que asegura el funcionamiento del dispositivo de protección cuyo valor se determina siguiendo las indicaciones a continuación en fusibles de protección.

Si I_{df} es mayor o igual a 16 A, el valor a tomar para análisis será de 1,6 I_n ; si I_{df} se encuentra entre 4 A y 16 A, el valor de análisis será 1,9 I_n ; si I_{df} es menor a 4 A el valor de análisis será de 2,1 I_n . El valor de análisis se utiliza para corroborar los parámetros de diseño presentes en la Ecuación 6 en relación con la intensidad de fusión [33].

El poder de corte (PdC) en un dispositivo de protección es la capacidad de corte en cuanto a intensidad, el cual debe ser capaz de abrir el circuito e impedir el paso de la corriente de cortocircuito [35]. El segundo tipo de protección, definido como protección contra cortocircuito, utiliza el poder de corte para asegurar la cobertura de la máxima intensidad de cortocircuito prevista en el punto de instalación (ver Ecuación 7).

$$PdC \geq I_{ccmax} \quad (7)$$

En el circuito de corriente alterna el valor de la corriente de cortocircuito se calcula Según norma UNE 21239, referente a cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas trifásico de corriente alterna.

$$I_{ccmax} = \frac{cUn}{\sqrt{3} * Z_{eq}} \quad (8)$$

Donde c es el factor de tensión, Un es Tensión nominal de la red de baja tensión (V), Zeq es la Impedancia equivalente del circuito (U), I_{max cc} es la Corriente de cortocircuito máxima en el lado de baja tensión del transformador en (kA).

Finalmente, la protección contra sobretensiones se realiza con unos equipos llamados “descargadores de sobreintensidad”, también denominados autoválvulas o pararrayos, formados por una resistencia inversa cuyo valor disminuye al aumentar la tensión aplicada. Los descargadores se instalan lo más cerca posible del equipo a proteger, debido a que su función es derivar a tierra el exceso de tensión, evitando así la perforación de los aislamientos, la reducción del rendimiento y la vida de la instalación. El uso de protecciones contra sobretensiones garantiza la optimización del rendimiento de la instalación y en consecuencia se muestra como una decisión altamente rentable [33].

En el proceso de selección, rige el principio de protección escalonada donde se distinguen tres clases de protección que se muestran en la Tabla 5 [27].

Tabla 5. Principio de protección escalonada

Tipo de protección	Función
Tipo 1. Protección basta	Son descargadores desarrollados para dar protección frente a corrientes de rayo. Se instalan lo más cerca de la acometida en baja tensión.
Tipo 2. Protección media	Son descargadores destinados a la protección de instalaciones y equipos frente a sobretensiones (originadas por descargas de rayo indirectas, conmutaciones en alta, inducciones...). Se instalan en los cuadros de distribución.
Tipo 3. Protección fina	Son descargadores de sobretensiones para protección específica de equipos finales. Se instalan lo más cerca posible del equipo a proteger.

Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

En corriente Alterna existe un paso natural por el cero en cada semiperiodo, en corriente continua esto no sucede por lo cual es necesario hacer una interrupción gradual hasta la anulación de la corriente, evitando bruscas alteraciones que darían lugar a elevadas sobretensiones [33].

En el tramo de corriente alterna se puede hacer uso de interruptores de tipo automático y diferencial, los primeros deben cumplir con los siguientes requisitos (ver Ecuación 9)

$$I_t \leq I_n \leq I_{adm} \wedge I_{dint} \leq I_{adm} * 1.45 \wedge I_{dint} = 1.3 * I_n \quad (9)$$

Donde I_{dint} es la Intensidad convencional de funcionamiento del dispositivo de protección.

Los interruptores diferenciales proporcionan protección a las personas contra descargas eléctricas, tanto en el caso de contactos directos como indirectos y también proporcionan protección a las instalaciones, al detectar fugas a tierra en el caso de fallo de aislamiento o equipos defectuosos. Además de los interruptores diferenciales se deben emplear otras medidas de protección, tales como interruptor magnetotérmico o fusible [33].

Otra alternativa de protección son los diodos, componentes electrónicos que permiten el flujo de corriente en una única dirección. En los sistemas fotovoltaicos generalmente se utilizan de dos formas: como diodos de bloqueo y como diodos de bypass [11].

Los diodos de bloqueo impiden que la batería se descargue a través de los paneles fotovoltaicos en ausencia de luz solar y evitan el flujo de corriente entre bloques de paneles conectados en paralelo, cuando en uno o más de ellos se produce una sombra. En los strings o arreglos en serie los diodos de bypass protegen individualmente a cada panel de posibles daños ocasionados por sombras parciales, impidiendo que cada módulo individualmente absorba corriente de otro de los módulos del grupo, si en uno o más módulos del mismo se produce una sombra [11].

6.8.4 Puesta a tierra

Es la conexión metálica de uno o varios puntos de la instalación a uno o varios electrodos enterrados, evita que existan tensiones peligrosas en la instalación generadas por corrientes de fallo o descargas atmosféricas. Su instalación se realiza de tal forma que no altere la de la compañía eléctrica, por ello, se realiza una única toma de tierra a la que se conecta tanto la estructura soporte, como el terminal de puesta a tierra del inversor; previniendo la creación de diferencias de tensión peligrosas. La sección de los conductores mínima de tierra se elige según lo indicado en la siguiente tabla [33].

Tabla 6. Relación entre las secciones de los conductores de protección y los de fase

Sección de los conductores de fase de la instalación (mm ²)	Sección mínima de los conductores de tierra (mm ²)
$S \leq 16$	$S_p = 6$
$16 < S \leq 35$	$S_p = 16$
$S > 35$	$S_p = S/2$

Fuente: Universidad de Sevilla

Las tierras del lado de continua y de alterna serán separadas e independientes. El chasis de los elementos de corriente alterna se une a los demás componentes en una tierra de protección; dichos componentes pueden incluir las envolventes de los cuadros de corriente alterna, el borne de tierra de protección de corriente alterna del inversor, entre otros [21].

Existen dos tipos de puesta a tierra diferenciados por su función, la puesta a tierra de los equipos que permite proteger a las personas y a los equipos contra fallas de aislamiento, conectando las partes metálicas del sistema, que no forman parte de los circuitos eléctricos, formando una malla equipotencial; si la parte de corriente continua está aterrizada se debe conectar con este tipo de tierra. La puesta a tierra del sistema reduce el daño a equipos por voltaje inducido, estabiliza el voltaje, facilita la eliminación y detección de las corrientes de falla y reduce los efectos de interferencias electromagnéticas [11], [33].

Para la realización de la puesta a tierra, el Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico TERMEX hace las siguientes recomendaciones presentes en la Tabla 7.

Tabla 7. Recomendaciones para la realización de puesta a tierra

Es recomendable que el conductor de protección a tierra no se atornille directamente al marco de los paneles, sino hacerlo por medio de un terminal auxiliar, de modo que se pueda quitar un módulo (por avería, mantenimiento, etc.) sin interrumpir la conexión a tierra del resto de la instalación.
Es recomendable que el conductor de protección a tierra no se atornille directamente al marco de los paneles, sino hacerlo por medio de un terminal auxiliar, de modo que se pueda quitar un módulo (por avería, mantenimiento, etc.) sin interrumpir la conexión a tierra del resto de la instalación.
El conductor de protección a tierra no debería atornillarse directamente al marco de los paneles, sino hacerlo por medio de un terminal auxiliar, de modo que se pueda quitar un módulo sin interrumpir la conexión a tierra del resto de la instalación.
La simple conexión de los marcos de los módulos a una estructura anclada en el suelo no se considera como una puesta a tierra eficaz. Error muy habitual.

El conductor de protección a tierra de los módulos solares es recomendable que se conecte también a un punto de la estructura.
Los conductores de protección deben conectarse al punto de puesta a tierra de la instalación, que a su vez se conectará al electrodo principal de tierra a través del conductor de enlace.
El conductor de puesta a tierra del sistema fotovoltaico debe ser desnudo, o ir protegido bajo tubo

Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

6.8.5 Canalización eléctrica

Según la NTC 2050 sección 100-A una canalización es un conducto cerrado de material metálicos, diseñado para contener alambres, cables o barras, bajo un contexto eléctrico. Existen varios tipos de canalización como lo son los conductos de metal rígido, conductos rígidos no metálicos, conductos metálicos intermedios, conductos flexibles e impermeables, tuberías metálicas flexibles, tuberías eléctricas no metálicas, de tuberías eléctricas metálicas, subterráneas, de hormigón en el suelo, de metal en el suelo, superficiales, de cables y de barras.

De acuerdo al área transversal de la canalización eléctrica, el número de conductores permitidos debe ocupar como máximo un 40% en canalizaciones con uniones externas y un 25% en canalizaciones con uniones internas.

La EPM [36] establece recomendaciones al momento de la instalación de canalizaciones eléctrica. A continuación, se enuncian algunas de ellas. Los tubos metálicos se deben instalar como un sistema completo, y deben ir bien sujetos a losas, pantallas, columnas o elementos estructurales de la edificación. No se permite el uso de accesorios no estandarizados en sistemas de tuberías eléctricas expuestas, a menos que sea necesaria para el cableado, no permita manipulación de cableado y no esté compuesto por tornillos de fijación externa.

El ingreso a celdas, tableros, cajas o armarios se debe realizar de manera perpendicular. Deben instalarse terminales roscadas con adaptador para conexión del conductor de puesta a tierra, debidamente equipotencializadas, en los extremos de tubería metálica o ingresos a cajas metálicas, tableros o celdas. No se permite poner a tierra la tubería metálica con métodos que impliquen su modificación constructiva [36].

Se permite una máxima de dos curvas en el trayecto de tuberías eléctricas expuestas instaladas entre cajas de inspección o tableros; de igual forma, deberá marcarse como mínimo cada tres metros con franjas de color naranja de al menos 100 milímetros de ancho y con la leyenda "Peligro Media Tensión 13200 Voltios", además del símbolo de riesgo eléctrico, en conductores de media tensión [36].

En zonas de tránsito vehicular, los tramos horizontales de tubería no podrán ser instalados a una altura inferior a 2100 mm medidos desde el nivel del suelo hasta la parte inferior del tubo o soporte del mismo [36].

Según el diámetro de los tubos a instalar, el diámetro de los espárragos o espaciadores a emplear para su fijación no podrá ser inferior a lo descrito en la Tabla 8.

Tabla 8. Diámetro de espárragos espaciadores de acuerdo al diámetro de tubería

Diámetro del tubo [Pulgadas]	Diámetro mínimo del esparrago [Pulgadas]
4	1/2
3	3/8
2	5/16
1	1/4

Fuente: Empresas Públicas de Medellín (EPM)

6.9 Estructura de soporte de los paneles solares

La estructura es el sistema de soporte donde se instalan los paneles solares, su función principal es proporcionarles la consistencia mecánica adecuada mediante un sistema de anclaje que permita la orientación e inclinación correcta [11].

En el diseño es importante conocer el lugar de instalación, donde se analiza los factores más importantes que influyen directamente en la estructura de soporte. Además de la carga del conjunto de los paneles se deben tener en cuenta los esfuerzos ocasionados por agentes atmosféricos como la fuerza ejercida por el viento. Existen diferentes tipos de estructuras ya estandarizadas que se adaptan según los requerimientos técnicos del tipo de superficie del lugar de instalación, algunas de ellas se representan en la siguiente tabla [11].

Tabla 9. Tipos de estructura de paneles solares

Tipo de estructura del panel	Especialización
Estructura sobre suelo	Se utiliza generalmente en sistemas donde se pretende colocar una gran cantidad de módulos fotovoltaicos. Su principal ventaja es la facilidad de montaje. Es importante evitar su instalación junto a árboles o edificios para que no genere sombra sobre ellos.
Estructura sobre mástil o poste	Se emplea generalmente para arreglos pequeños de uno o dos módulos; se

	implementa sobretodo en casos en los que no hay espacio para la instalación.
Estructura sobre tejado o loza	Es similar a la instalación sobre suelo, su estructura está totalmente reforzada. Es fundamental dejar un espacio para la circulación de aire entre el arreglo fotovoltaico y la loza para facilitar la circulación del calor producido por los módulos.
Estructuras individuales	Son para espacios sencillos como lo son las terrazas o techos planos en los que se necesitan colocar módulos en posición horizontal para lograr un óptimo funcionamiento.
Estructuras con triángulo inclinado	Se aplican en terrazas o techos planos. En ellas se coloca los triángulos inclinados, los módulos se colocan en posición vertical y son más económicas cuando la cantidad de paneles necesarios es mayor.
Estructura Coplanar	Estos modelos se usan en techos inclinados, por lo general ofrecen soluciones de instalación y facilitan el montaje, además de ofrecer seguridad en todo momento.

Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

Las estructuras de soporte pueden estar hechas en su mayoría de aluminio o acero galvanizado. El aluminio es un material apropiado para la fabricación de soportes de paneles ya que es un metal muy liviano con una densidad de $2,70 \text{ g/cm}^3$ a temperatura ambiente; presenta unos pesos propios de hasta un 80% más bajos que sus equivalentes en acero, mostrando una ventaja contundente frente a este. Por otro lado, es apto para ser ubicado a la intemperie ya que soporta la corrosión debido al óxido que produce naturalmente este material, el óxido de aluminio forma una capa protectora entre el aluminio y el ambiente [11].

El aluminio presenta una larga vida útil ya que sus propiedades fisicoquímicas permiten su conservación y estabilidad frente a diversos factores externos que puedan deteriorarlo, tales como temperaturas extremas, lluvias, radiaciones, partículas de aire, etc. El aluminio es uno de los materiales con un potencial de reciclabilidad cerca del 95%, aunque el gasto de energía necesario para su elaboración es alto, en el ámbito de los

paneles solares se ve compensado con la elevada cantidad de años que se va a aprovechar, por ello, la huella medioambiental que se deja es mucho más pequeña en comparación con la utilización de otros materiales [11].

Al ser el aluminio de un peso ligero, reduce los costes de transporte y facilita la instalación al momento de elevar la estructura y ser soportada por los tejados; este material presenta una conductividad térmica elevada, esto hace que el calor se propague rápidamente por la superficie evitando puntos fijos de concentración de calor en la estructura; posee un alto punto de fusión que garantiza la resistencia a los climas extremos. El aluminio es un material versátil lo que facilita su corte, soldado, mecanizado, taladrado y remachado; adaptándose fácilmente a todo tipo de formas según los requerimientos [11].

Las estructuras de soporte realizadas en acero galvanizado tienen agregada una capa de zinc en la superficie, este proceso de galvanización se realiza mediante la inmersión del acero en zinc fundido con el fin de proteger el acero de la corrosión y mejorando su resistencia mecánica a los golpes y a la abrasión, por lo que se garantiza su durabilidad en la instalación [11].

Existen diversos aspectos a estudiar antes de realizar la instalación de una estructura solar fotovoltaica. Es importante analizar los paneles solares, la superficie y las condiciones geográficas del lugar donde van a ser instalados. La geografía es uno de los aspectos más importantes, allí se tiene en cuenta la latitud para conocer el posicionamiento ideal y la situación climática para tener en cuenta la inclinación y posición del sol [11].

Las estructuras deben ser dimensionadas para que logren soportar las cargas que puedan aparecer. Debido a que los paneles son instalados en el exterior, deben ser capaces de soportar lluvias y fuertes vientos, aquí radica la importancia de utilizar buenos procedimientos de anclaje y fijación [11].

Existen varios tipos de anclaje según la necesidad de cada superficie, los más recurrentes son bajo teja y perforación de teja. El anclaje bajo se basa en una pieza que va anclada debajo de la teja y sale por la parte inferior de esta, para ello es necesario retirar la teja donde va el anclaje; es una maniobra delicada y hacer un movimiento brusco puede provocar la rotura de la teja. En perforación de teja es necesario perforar la teja y llegar a algún elemento estructural de la construcción para evitar ejercer la fuerza sobre la teja, ya que ésta no debe soportar los esfuerzos; la sujeción de este sistema es similar al de el anclaje bajo teja, agregando el sellado completo del agujero para no tener problemas de filtración de agua en un futuro [11].

Una vez definido el tipo de anclaje, se debe seleccionar la fijación. Los elementos de anclaje deben ser capaces de soportar los esfuerzos que se puedan producir. Los casos de anclaje más populares en trabajos de instalación son de soporte macizo con taco químico o con taco metálico. En soporte macizo con taco químico se tiene una capa de concreto u hormigón macizo de al menos 10 cm de profundidad, ahí se puede realizar el anclaje directamente. Para realizar la fijación con un taco químico primero se debe realizar la perforación en la superficie, se limpia la zona de los restos que queden antes de introducir el anclaje, se introduce el casquillo de inyección del taco asegurando que el tamaño del agujero sea el adecuado, posteriormente se rellena el agujero con la resina adecuada que será la encargada de fijar el anclaje, se introduce el taco químico y finalmente se debe esperar el tiempo recomendado de endurecimiento antes de poner la carga [11].

En anclaje con taco metálico se realiza la perforación sobre el concreto, se extrae el polvo con una bomba de soplado o un compresor, se eliminan los residuos con un cepillo metálico, se coloca el anclaje sobre la pieza a fijar, se realiza el par de apriete [11].

6.10 Aspecto Financiero

El análisis financiero es el estudio que se elabora sobre la investigación contable, haciendo uso de indicadores establecidos por balances, ingresos y pérdidas sobre las entidades [37]. El estudio se desarrolla solo cuando existe un mercado potencial que el proyecto pueda cubrir y cuando tecnológicamente ha sido determinado factible.

Un estudio de viabilidad de proyectos, permite a las organizaciones determinar si una acción tiene sentido desde el punto de vista financiero y operativo [38]. Los sistemas fotovoltaicos se evalúan por medio del contexto de proyectos de inversión, los que se definen como la planeación o distribución de recursos que permitirán llevar a cabo un conjunto de acciones para el logro de un beneficio futuro. La evaluación de proyectos de inversión busca determinar la conveniencia de llevar a cabo una inversión cuando existen diferentes alternativas.

6.10.1 Criterios evaluación de proyectos de inversión

- *VPN (Valor Presente Neto)*

Es el indicador más importante para determinar si el proyecto es viable desde el punto de vista económico, permite saber el valor actual del proyecto teniendo en cuenta los diferentes tiempos de financiación. Utiliza el flujo de caja a lo largo de la vida de la instalación adaptando los valores a la fecha actual; a mayor VPN mayor es la rentabilidad del proyecto [21].

Si el VPN es mayor que cero, el proyecto es económicamente rentable, recuperamos la inversión inicial y tendremos más capital que si lo hubiéramos puesto a renta fija. Si el VPN es menor que cero, el proyecto no es viable, genera pérdidas y la inversión se rechaza. Si el VPN es igual a cero, los ingresos son iguales a los egresos y el proyecto es indiferente. La ecuación para calcular el VPN es la siguiente [33].

$$VPN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} \quad (10)$$

Donde V_t representa los flujos de caja de cada periodo t , I_o es la inversión inicial, n es el número de periodos y K es la tasa de descuento que muestra la rentabilidad de la mejor alternativa posible de riesgo similar.

Un flujo de caja se determina mediante la sustracción de los egresos o costos del proyecto a los ingresos, en su respectivo periodo de análisis [21].

Los ingresos de un proyecto fotovoltaico están representados por el ahorro en el pago de la factura del consumo energético. Dependiendo del tipo de cliente, la electrificadora correspondiente, define el tipo de tarifa como plana o variable; el precio unitario varía de acuerdo al estrato social en que se encuentre la instalación [21].

Dentro de los egresos de un proyecto fotovoltaico se encuentra la inversión inicial, representada por los elementos que componen el sistema como lo son paneles solares, inversores, cableado, obras civiles, entre otros. De igual forma, se encuentran las inversiones durante la marcha, compuestas de los costos de administración, operación, reemplazo de equipos y mantenimiento; teniendo en cuenta la vida útil estimada de los sistemas fotovoltaicos cercana de los 20 años [21].

Dentro de las inversiones se pueden definir los gastos operacionales a través de la depreciación y el costo de operación y mantenimiento incluyendo la mano de obra. Los sistemas fotovoltaicos tienen un costo de mantenimiento muy bajo, sin embargo, es necesario asegurar el funcionamiento del sistema durante su vida útil, evitando pérdidas de producción por pequeños fallos; para efectos económicos se puede calcular el costo anual de mantenimiento como un 0,7% de los costos iniciales de la instalación [21].

Los equipos pierden valor por conceptos de edad, uso y obsolescencia durante su vida útil; esta pérdida de valor se traduce en costo a través de la depreciación. Existen tres tipos de depreciación legalmente aprobada, en primer lugar, la depreciación de la línea recta que da importancia a la vida útil del equipo y no al uso del mismo, consiste en aplicar cada año la misma cantidad de depreciación hasta agotar el valor del equipo [39].

La depreciación por unidades de producción divide el valor del equipo por el número de unidades que puede producir durante toda su vida útil, en cada periodo se multiplica el costo correspondiente a cada unidad por la cantidad producida [39].

Por último, la depreciación por suma de dígitos anuales rebaja el costo de desecho, disminuyendo progresivamente a lo largo del tiempo; consiste en sumar el número de periodos para obtener un común divisor y posteriormente dividir la cantidad entre el mismo, el resultado será multiplicado por el monto a depreciar [39].

- *Tasa Interna de Retorno (TIR)*

La tasa interna de retorno es la tasa de rentabilidad del proyecto y establece la viabilidad en los proyectos de inversión, es aquella tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero para los flujos de entrada y salida traídos a valor presente. Si la TIR es superior a la tasa de descuento utilizada para calcular el VPN, se da el proyecto como una inversión conveniente. Cuanto mayor sea el valor de TIR, mayor será la rentabilidad del proyecto [33], [40].

$$VPN = \frac{\sum R_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (11)$$

Donde t es el tiempo de flujo de caja, i es la TIR y R_t es el flujo neto de efectivo

- *Retorno de la Inversión (ROI)*

El Retorno de la Inversión es simplemente el beneficio que se obtiene de una inversión. Se calcula restando del retorno el monto invertido [40].

$$ROI = \left(\frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión}} \right) * 100 \quad (12)$$

6.11 Aspecto normativo y legal

Para el presente estudio es fundamental conocer el marco regulatorio energético colombiano. La normatividad específica a tener en cuenta y que será cobijada por el Plan Nacional de Desarrollo, comprende entre otras, la resolución CREG-030 de 2018 y CREG-002 de 2021 correspondientes a la Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE) y Generación Distribuida (GD). La ley 1715 del 13 de mayo de 2014, por medio de la cual se regula la Integración de las Energías Renovables No Convencionales al Sistema Energético Nacional. Ley 142 cuyo ámbito se aplica a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural. Ley

143, la cual establece el régimen de las actividades de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad, todas las anteriores regidas por el Ministerio de Minas y Energía.

La Resolución 1283 del 3 de agosto de 2016 por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables-FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios establecidos en la Ley 1715, Resolución cobijada por el Marco del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Finalmente, tanto el diseño como la instalación de los Sistemas Eléctricos en Colombia estarán sometidos a lo reglado tanto en la Norma Técnica Colombiana NTC-2050 y al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE.

6.12 Aspecto Ambiental

Según el Ministerio de Ambiente [8], la huella de Carbono es un indicador que cuantifica la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero liberadas a la atmósfera por las actividades humanas, medidas en emisiones de CO₂ equivalentes.

Dependiendo del enfoque, existen diversos protocolos o metodologías reconocidas internacionalmente para abordar la huella de carbono [41]; en el enfoque corporativo, se evalúa la huella de carbono de una organización principalmente para la elaboración de reportes corporativos, que sirven de base para la comunicación del desempeño de la empresa frente al cambio climático, agrupando anualmente las emisiones de gases de efecto invernadero en emisiones directas, es decir, aquellas que provienen de fuentes que son propiedad o son controladas por el establecimiento; emisiones indirectas por consumo y distribución de energía; y, otras emisiones indirectas que no son propiedad ni están controladas por la organización.

El enfoque de ciclo de vida de un producto o servicio, evalúa la huella de carbono a lo largo de la cadena de valor incluyendo el consumo y término de vida útil. En el enfoque personal, se evalúan las emisiones de efecto invernadero, provocadas por una persona, en un periodo determinado, para su determinación, es necesario conocer los hábitos de consumo del individuo.

En caso de realización de eventos, se evalúa, las emisiones de gases de efecto invernadero, a través del uso de electricidad, transporte, alimentación, insumos de papelería y emisiones generadas durante la planificación y realización del mismo. En un enfoque territorial, se determina un territorio acotado para su posterior análisis del impacto global del cambio climático. Finalmente, es posible analizar la huella de carbono en enfoque específicos de la Industria a través de todas las etapas de producción.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

Esta investigación es de tipo descriptivo explicativo mixto. La población objetivo corresponde al Supermercado “Siga y Merque” La metodología por objetivos se explica en la Tabla 10.

Tabla 10. Cuadro de objetivos vs actividades

Objetivos	Actividades	Resultados
Estimar la demanda energética a partir de los históricos de consumo de energía registrados en las facturas de la ESSA con el fin de obtener los requerimientos de diseño que permitan cumplir con el rango de disminución de la Factura de la ESSA.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acopiar las facturas de la ESSA. ✓ Documentar base de datos del consumo de los últimos 12 meses. ✓ Calcular el consumo promedio diario en Kwh-días. ✓ Calcular el costo promedio mensual. 	KWh-día \$consumo/mes
Diseñar la central fotovoltaica teniendo en cuenta la demanda actual de energía.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Determinar mediante la página del IDEAM o fuentes fidedignas, del valor de la Hora Solar Pico (HSP) para la Ciudad de Piedecuesta. ✓ Calcular la Potencia del Generador Fotovoltaico para cubrir el entre el 90% y el 100% de la Demanda de Energía. ✓ Elegir el tipo de panel solar, su capacidad de potencia en Wp (Watts-Pico) y la cantidad de los mismos. ✓ Dimensionar el Inversor Solar. ✓ Especificar el Contador Bidireccional. ✓ Dimensionar el cableado en corriente directa y en corriente 	Especificación del Generador Fotovoltaico entregando información de la potencia a generar, tipo y cantidad de paneles solares, especificación del Inversor Solar, del Contador Bidireccional, Tablas de Cableado y Protecciones Eléctricas.

	<p>alterna y las protecciones eléctricas asociadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Dimensionar la canalización para el cableado. ✓ Diseñar los Tableros de Interconexión y Protecciones. ✓ Validar el área disponible para la instalación de los paneles solares requeridos. ✓ Diseñar la Estructura de Soporte de los paneles solares. 	
Calcular el Presupuesto para la Solución Técnica definida.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Calcular Mano de Obra ✓ Calcular Materiales y Equipos ✓ Calcular Herramientas y Transporte ✓ Calcular costos administrativos 	Presupuesto desglosado en pesos colombianos: Mano de Obra, Materiales y Equipos, Herramientas y Transporte, Costos Administrativos.
Evaluar la solución fotovoltaica propuesta, mediante análisis económico y de impacto ambiental con el fin de mostrar la viabilidad de la misma.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Calcular el retorno de la inversión (ROI) y los ahorros estimados durante la vida útil remanente de la Planta Solar. ✓ Cálculo del impacto ambiental mediante la estimación de emisiones de CO₂ dejadas de emitir a la atmósfera por el uso de la Energía Solar. 	ROI: Tiempo en años para recuperar la Inversión. Emisiones de CO ₂ Evitadas al ambiente.

Fuente: autores

8. DESARROLLO DEL PROYECTO

8.1 Estimación del Generador fotovoltaico

8.1.1 Estimación del consumo de la carga

Se debe determinar la energía eléctrica diaria que necesitará la instalación receptora, para ello es fundamental obtener los datos del consumidor lo más realistas posibles; el cálculo del consumo diario se realiza a través de la sumatoria de la energía consumida por cada carga, multiplicando la potencia individual por su respectivo tiempo medio diario de funcionamiento. Es recomendable separar los consumos en corriente continua y corriente alterna, debido a que conservan factores de pérdida distintos [11].

Una forma de calcular de forma teórica la energía real necesaria (L) es mediante la utilización de las eficiencias de los subsistemas como se muestra en la Ecuación 12.

$$L = \frac{L_{cc}}{\eta_g} + \frac{L_{ca}}{\eta_g \eta_{inv}} \quad (12)$$

Donde L es la energía real necesaria, L_{cc} la carga diaria en corriente continua, L_{ca} la carga diaria en corriente alterna, η_g la eficiencia carga y descarga de la batería y η_{inv} la eficiencia media diaria del inversor. Para los valores de η_g y η_{inv} el Manual de dimensionamiento TERMEX identifica como eficiencias 87%-90% y 85%-98% respectivamente [11], [21].

Debido a que el supermercado Siga y Merque lleva un historial mayor de un año en su facturación de energía, se va a estimar el consumo de la carga a través de los datos proporcionados por ESSA, mediante el uso de los recibos correspondientes a un año de anterioridad, con el fin de obtener un dato de consumo promedio exacto. De igual forma, se realizará una comprobación del consumo mediante la Ecuación 12, para los dispositivos instalados en el local.

Para determinar el consumo de la carga se cuenta con los recibos, suministrados por el consumidor (ver Anexo A), de los meses correspondientes al periodo marzo a noviembre del 2020 y marzo a última facturación del año en curso. Para los periodos que no cuentan con su correspondiente factura, se utilizan los históricos de consumo del periodo más cercano, sin proyectar el valor de la factura, debido a que solamente se puede conocer la energía real activa a través de este valor.

Se determina la energía real necesaria (L) como el promedio de consumo en KWh de los últimos 12 meses al mes en curso, así como un valor estimado del costo de la factura eléctrica mensual. La información sustraída con los datos suministrados se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Registro de consumos y pagos supermercado Siga y Merque

Período	Consumo (kWh-mes)	Valor Pagado (\$)	Valor Promedio \$/kWh
May 2020	3.510	2.516.693	717
Jun 2020	3.625	2.599.897	717
Jul 2020	3.583	2.966.618	828
Ago 2020	3.687	3.041.187	825
Sep 2020	3.814	3.132.246	821
Oct 2020	3.736	3.076.320	823
Nov 2020	4.017	3.277.799	816
Dic 2020	3.903		
Ene 2021	3.406		
Feb 2021	3.636		
Mar 2021	3.615	2.721.989	753
Abr 2021	3.493	2.478.110	709
Promedio	3.669	2.867.873	779

Fuente: autores

Para calcular la energía real necesaria teórica, se cuenta con 12 neveras de la marca Imbera (Ver Anexo B) 2 computadores con caja registradora con un consumo de 540 W cada uno, para L_{ca} ; por otro lado, 1 televisor de 55 pulgadas de 145 W, 4 parlantes de 100 W, 8 cámaras de 4 W y 24 bombillos de 36 W cada uno, para L_{cc} . Se obtiene un valor L de **3633,2** con los datos suministrados anteriormente y un valor de η_g y η_{inv} de 0,9 y 0,85 respectivamente.

8.1.2 Obtención hora solar pico

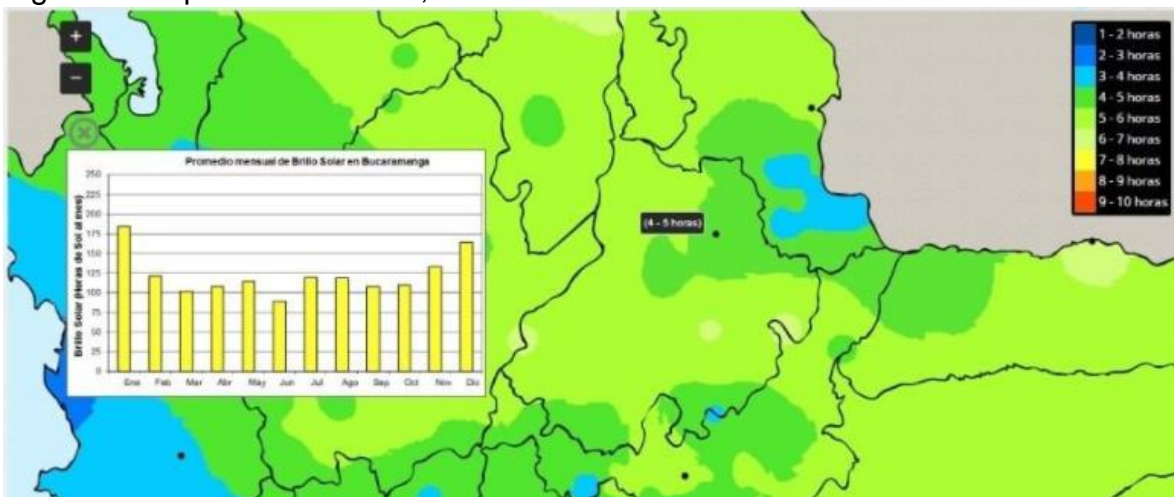
El IDEAM se define a sí mismo como “una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, que facilite la definición y ajustes de las políticas ambientales y la toma de decisiones por parte de los sectores público, privado y la ciudadanía en general” [42].

El IDEAM cuenta con un mapa interactivo de radiación solar, ultravioleta y de ozono de Colombia, por medio del cual se observa un valor de 4 a 5 horas de sol al día para el área metropolitana de Bucaramanga (ver Figura 6), con base en las estaciones “climática

principal” 2319500065 GRANJA PIEDECUESTA y la presente en la Universidad Industrial de Santander. Para efectos de este proyecto se toma el valor de 4 horas de sol al día.

Según el Catálogo Nacional de Estaciones una estación climatológica principal es aquella en la cual se hacen observaciones de precipitación, temperatura del aire, temperaturas máximas y mínimas a dos metros, humedad, viento, radiación, brillo solar, evaporación, temperaturas extremas del tanque de evaporación, cantidad de nubes y fenómenos especiales.

Figura 6. Mapa de Santander, atlas interactivo IDEAM



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

8.1.3 Dimensionamiento del generador solar

Como se menciona en el marco teórico, la cantidad de energía que incide sobre los paneles depende de su orientación respecto del sol, Colombia se ubica en la zona ecuatorial pasando manteniendo un ambiente tórrido o intertropical, lo que repercute en bajas latitudes manteniéndose así una irradiación solar constante durante todo el año [21].

Para calcular el grado de inclinación del panel, es necesario contar con los datos de latitud y longitud de la zona de estudio, siendo para el municipio de Piedecuesta de 6,9 de Latitud y $-73,04^\circ$ de longitud. El manual de dimensionamiento fotovoltaico [11], recomienda un grado de inclinación de 15° para la latitud presente en la zona, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Ángulo de inclinación respecto a latitud del lugar

Latitud del lugar en grados	Angulo de inclinación fijo en grados
0 a 15	15
15° a 25°	La misma latitud
25° a 30°	Latitud + 5°
30° a 35°	Latitud + 10°
35° a 40°	Latitud + 15°
40° o más	Latitud + 20°

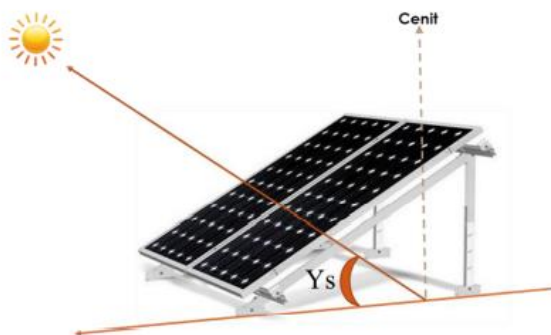
Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

La utilización de varios paneles fotovoltaicos en un área determinada, requiere del cálculo de la distancia a la cual se colocará unos de los otros sean en filas o columnas de paneles de tal manera que no se afecte con sombras entre ellos.

La distancia mínima entre módulos fotovoltaicos depende de la altura del módulo y de la latitud del lugar donde se hará la instalación. Para ello es necesario tener presente los siguientes conceptos.

La elevación solar (Y_s) es el ángulo que se forma entre los rayos solares con el eje horizontal del ecuador de la Tierra. Toma valores que van de $(90^\circ - \phi - \delta)$ en el solsticio de invierno, y a $(90^\circ - \phi + \delta)$ en el solsticio de verano, siendo ϕ la latitud del lugar y δ la declinación [11].

Figura 7. Ángulo de elevación solar



Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

El acimut solar ψ_s es el ángulo que se forma entre el meridiano del sol y el meridiano del lugar, tomando como referencia el eje vertical, siendo los valores de ψ_s positivo correspondientes al norte. Los valores que toman como positivos se encuentran en los cuadrantes 2 y 3, los valores que se toman como negativos se hallan en los cuadrantes 1 y 4. El ángulo de inclinación β es el ángulo que se forma entre la superficie del lugar con el plano horizontal del módulo fotovoltaico [11].

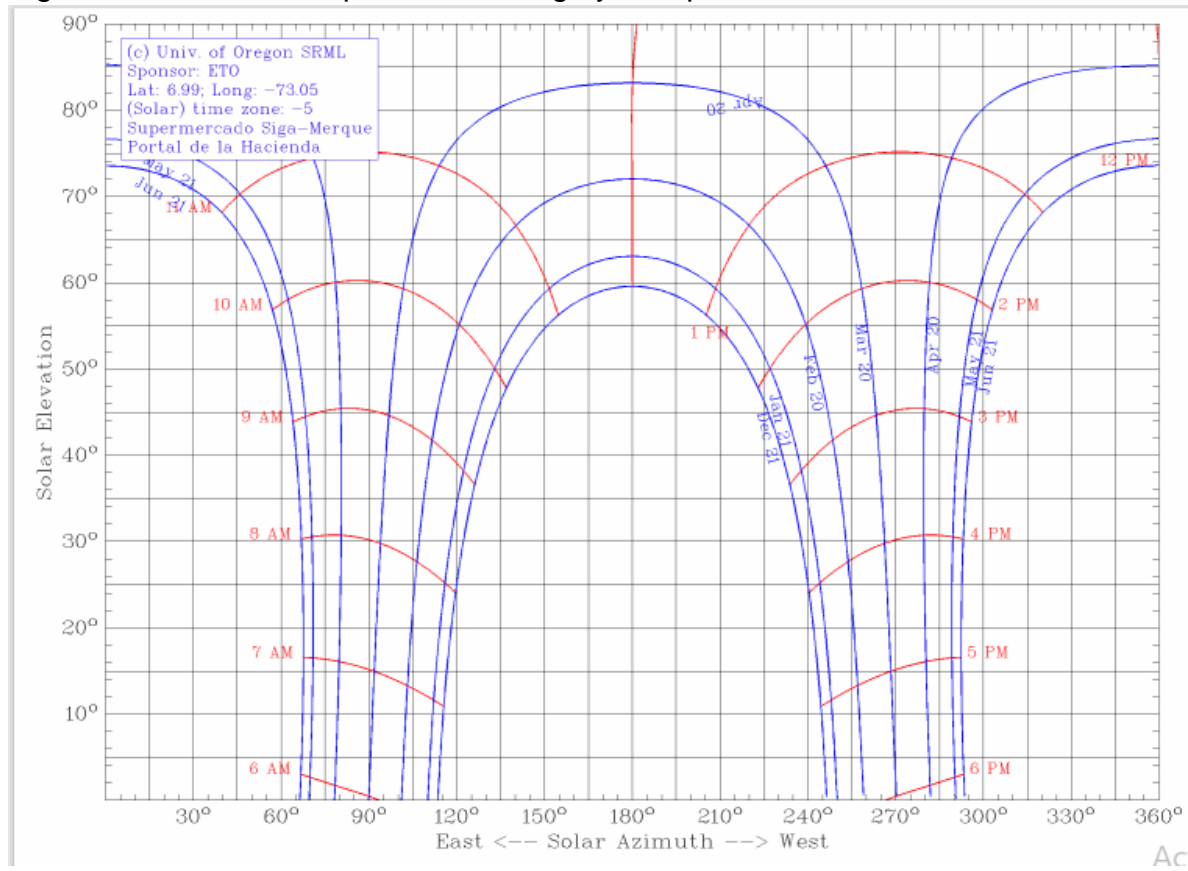
Una carta solar muestra la posición del sol para una ubicación específica durante distintas épocas del año, permitiendo conocer en qué momento se producirían sombras sobre el sistema fotovoltaico. Debido a que se identificaron 4 HSP para la zona de estudio, la carta solar a utilizar tomará el rango de las 10 a las 14 horas [11].

Como se mencionó anteriormente, el ángulo de inclinación para el presente proyecto es de 15° respecto al eje horizontal del módulo fotovoltaico, de esta forma es posible hallar la altura máxima alcanzada por el módulo, aplicando funciones trigonométricas y conociendo su longitud. Para el caso en particular se utiliza la Ecuación (13)

$$\text{Altura } (H) = \text{Longitud del panel} * \text{Sen } \beta \quad (13)$$

A continuación, se determina el ángulo de elevación solar y el acimut solar, a través del uso de la ventana solar del sitio de instalación otorgada por la página de la universidad de Oregon, la cual cuenta con el software necesario para generarla. Siguiendo las instrucciones del manual de dimensionamiento fotovoltaico para la determinación de la carta solar que se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Carta solar supermercado Siga y Merque



Fuente: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>

Haciendo uso de la Figura 8 se procede a calcular el ángulo de elevación solar y el acimut solar, para ello se identifica el horario de las 10 am siguiendo la línea roja hasta llegar al 21 de diciembre, que es el momento más crítico; en esta zona se traza una línea horizontal que determina el ángulo de elevación que tiene el sol para este periodo, en este caso tomando un valor $Y_s = 48^\circ$. Luego para determinar el ángulo de acimut, trazamos una línea vertical desde el punto de intersección hasta el eje horizontal, el cual interseca en $\psi_s = 140^\circ$.

Con los ángulos obtenidos, se prosigue a calcular la distancia de la sombra proyectada por el arreglo fotovoltaico, utilizando la función trigonométrica de la tangente (Ecuación 14)

$$\text{Distancia mínima } (D_s) = \frac{H}{\tan(Y_s)} \quad (14)$$

Para hallar la potencia del generador fotovoltaico, se utiliza la Ecuación 15 que necesita de conocer la producción en KWh necesaria para abastecer los requerimientos energéticos, dicha producción se calcula mediante la cantidad de HSP mencionadas anteriormente, pues este es el periodo en que el generador hace la captación de energía. Se obtuvo un valor de 30,57 kW_{ins}.

$$kW_{ins} = \frac{\left(\frac{\text{Consumo}_{mes}}{30}\right)}{HSP} \quad (15)$$

Para suministrar la energía necesaria del supermercado es indispensable calcular el número de paneles requeridos en el arreglo fotovoltaico, para ello se utiliza la Ecuación 16.

$$N^\circ \text{ de paneles } (N) = \frac{\text{Energía del Generador } (kW_{Instantaneo})}{HPS * \text{rendimiento de trabajo} * Wp} \quad (16)$$

Según Sandoval [30] la eficiencia energética de una instalación, los valores típicos son de 0,6 con batería e inversor y 0,7 sin batería y con inversor. En este caso, al ser un sistema On-Grid se utiliza el valor de 0,7.

En el proceso de selección del panel, se realizan los cálculos correspondientes para diversas referencias y valores de potencia. La información obtenida se muestra en la Tabla 13 eligiendo como panel del proyecto el de referencia JAM72S20 con potencia de 450 W, debido a su economía, área total utilizada y eficiencia cercana a los paneles de potencia similar; cabe resaltar que los paneles EGE-380-400M-72 son una segunda opción viable en el mercado; siendo necesario el uso de 97 paneles para cubrir la necesidad del modelo.

Tabla 13. Comparación de paneles solares

Referencia	SR-72MHLPro	JAM72S20	EGE-380-400M-72	ESPMC 340	JAP6-60/255-275/4BB	SOLAR MODULE EGE-200P-48	
Potencia [W]		550	450	400	340	275	200
Marca	SUNRISE	JA solar	ECO GREEN ENERGY	ERA solar	JA solar	ECO GREEN ENERGY	
Largo [m]		2,28	2,12	1,98	1,96	1,65	1,32
Ancho [m]		1,13	1,05	1	0,992	0,991	0,992
Eficiencia del Panel		20,73%	20,20%	20,10%	17,50%	16,82%	15,27%
Área Utilizada [m ²]		2,49	2,15	1,91	1,88	1,58	1,26
Altura [m]		0,29	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26
Distancia Min		0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23
Área Total Inclínada[m ²]		2,54	2,20	1,96	1,92	1,63	1,31
Área Total Horizontal [m ²]		2,58	2,23	1,98	1,94	1,64	1,31
Diferencia [%]		1,36%	1,21%	1,05%	1,03%	0,58%	0,12%
Peso [Kg]		28,00	25,00	22,90	20,90	18,00	15,00
Precio [\$]	\$	1.048.000	\$ 566.800	\$ 505.700	\$ 464.000	\$ 418.500	\$ 312.000
kWinst		30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57
#Paneles		79	97	109	128	159	218
Área Total Paneles [m ²]		204,59	216,05	216,19	249,76	259,70	285,95
Diferencia [m ²]		277,41	265,95	265,81	232,24	222,30	196,05
Costo Total	\$	83.221.861	\$ 55.011.839	\$ 55.216.871	\$ 59.604.342	\$ 66.466.315	\$ 68.133.929

Fuente: autores

8.2 Dimensionamiento del inversor

De acuerdo con lo explicado en el marco teórico, la potencia del inversor se calcula mediante la Ecuación 1 dando como resultado una potencia requerida de 43,67 KW para un número total de paneles de 97 a la potencia seleccionada de 450 W de la referencia JAM72S20, cuya ficha técnica se puede ver en el Anexo C.

Para el presente proyecto, se tomará el inversor de marca INGECON SUN de la referencia 33TL (ver Anexo D) cuyo rango de potencia de campo fotovoltaico recomendado es de 34 a 45 KW. A continuación, se pueden observar la información de mayor relevancia del inversor (Ver Tabla 14).

Tabla 14. Parámetros del inversor

VALORES DE ENTRADA (DC)	VALOR
	Referencia 33TLM
Potencia campo fotovoltaico	34 - 45 kW
Rango de tensión MPP1	200 - 820 V
Rango de tensión MPP2	200 - 820 V
Tensión máxima	1.000 V
Corriente máxima (Entrada 1 / Entrada 2)	40 / 40 A

Fuente: autores

Seguidamente se procede a calcular la cantidad máxima de paneles en serie según la Ecuación 2, dando como resultado un string de máximo 16 módulos.

$$N_{de\ paneles\ en\ serie} = \frac{820}{49,7} \approx 16,5$$

Tomando un número entero de paneles, en este caso 16, el máximo voltaje de una cadena de paneles en serie, representado por la Ecuación 3, sería de 795,2 voltios; valor inferior al voltaje máximo de entrada de voltaje especificado por el fabricante (820 V MPPT1-MPPT2). Seguidamente, se calcula el número de ramas en paralelo, haciendo uso de la Ecuación 4, obteniendo un total de 6 strings.

$$N^{\circ}_{\text{Ramas en paralelo}} = \frac{97}{16} = 6,06$$

Con base en los resultados de los procedimientos anteriores, se obtiene de manera teórica un arreglo de 6 ramas en paralelo, conformadas por 16 módulos cada una, dando como consecuencia una potencia real de campo fotovoltaico de 43,2 KW al reemplazar los valores en la Ecuación 18, valor menor al establecido por la CREG en la resolución UPME 281 de 2015, que define como Autogenerador de pequeña escala a aquel cuya capacidad instalada sea menor a 1 MW.

$$P_{\text{real}} = N^{\circ}_{\text{Ramas en paralelo}} * N_{\text{de paneles en serie}} * P_{\text{panel}} \quad (18)$$

Como se observa en la Tabla 14, la entrada máxima de corriente por MPPT es de 40 A, y asociando 3 strings de 16 paneles en serie, por MPPT, se obtiene un valor de corriente de entrada de 34,08 A al sustituir los datos en la Ecuación 19, valor que es inferior al especificado por el fabricante.

$$I_{\text{in}_{\text{inv}/\text{MPPT}}} = N^{\circ}_{\text{strings}/\text{MPPT}} * I_{\text{scpanel}} \quad (19)$$

Debido a los cálculos anteriores, se comprueba la factibilidad del uso del inversor JAM72S20 con entrada de 3 string, con 16 paneles en serie, por MPPT; obteniendo un suministro de potencia teórico del 98,92% respecto al requerido.

8.3 Dimensionamiento del cableado

Como se observa en el mapa climatológico proporcionado por el IDEAM, la temperatura varía en la zona correspondiente al proyecto, durante el periodo anual, cambios que pueden afectar de manera directa a la eficiencia de los paneles solares seleccionados anteriormente [34]. Para establecer la magnitud en que afecta el clima sobre el sistema solar fotovoltaico, se determinan los parámetros en los módulos solares en condiciones diferentes a STC (Condiciones de Prueba Estandarizadas o Standard Test Condition) de acuerdo a la variación de la temperatura.

El procedimiento a continuación se utiliza para anticipar el comportamiento de los módulos solares de manera teórica; para ello es necesario conocer con antelación la

Irradiancia y la temperatura mínima, máxima y promedio del lugar de estudio. Primeramente, se calcula la temperatura del panel en condiciones nominales de operación (NOCT), haciendo uso de la Ecuación 20.

$$T_{Celda} = T_{amb} + \left[(T_{NOCT} - T_{ambpruebaNOCT}) * \left(\frac{E_{sitio}}{E_{NOCT}} \right) \right] \quad (20)$$

Donde T_{amb} es la temperatura nominal del lugar de la instalación, T_{NOCT} es la temperatura nominal de operación de célula, otorgada por el fabricante en las características de temperatura de la ficha técnica; $T_{ambpruebaNOCT}$ es la temperatura ambiental de prueba realizada con el módulo por el fabricante, se puede encontrar en la ficha técnica del módulo al igual que la E_{NOCT} o Irradiancia en condiciones NOCT, utilizada de igual manera en el procedimiento de prueba; y, E_{sitio} o Irradiancia nominal del sitio de la instalación.

Para el presente proyecto, con base en la información de la ficha técnica del panel seleccionado (JAM72S20) se obtiene el valor de los parámetros T_{NOCT} , $T_{ambpruebaNOCT}$ y E_{NOCT} . Por medio de la indagación de los mapas climatológicos proporcionados por el IDEAM se determina la temperatura mínima, promedio y máxima para el lugar proyectado de la instalación. Finalmente, en “Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia” se proyecta la Irradiancia nominal al lugar de instalación, tomando como magnitud el valor promedio de los datos obtenidos por las diferentes estaciones del estudio [43]. El valor de las variables necesarias para sustituir en la Ecuación 20 se plasman en la Tabla 15.

Se calculan las variaciones de tensión, corriente y potencia haciendo uso de las ecuaciones a continuación.

$$D_{P,I,V}\% = C_{P,I,V}\% * D_T \quad (21)$$

$$D_T = T_{celda} - T_{STC} \quad (22)$$

Donde los parámetros con los subíndices “P,I,V” pueden acomodarse de acuerdo al tipo de variación a calcular, el parámetro C o coeficiente de temperatura en condición correspondiente, dado en %/°C, se puede visualizar en la ficha técnica al igual que T_{STC} o temperatura de la celda en condiciones estándar. En la tabla a continuación se recopila la información obtenida de los procedimientos anteriores.

Tabla 15. Parámetros nominales de temperatura e Irradiancia y variaciones eléctricas

T max [°C]	30	Esitio [w/m2]	1660		Cisc	0,044	[%/°C]
T prom [°C]	24		Enoct	800	Cvoc	-0,272	[%/°C]
T min [°C]	18	NOCT	Tnoct	20	Cpmax	-0,350	[%/°C]
			Tambpruebanoct	45		+- 2	

Fuente: autores

Con los valores de las variaciones en porcentajes y los valores de Pmax, Voc, Vmp, Isc e Imp en condiciones STC, obtenidos en la ficha técnica, se calculan los valores finales de tensión, corriente y potencia corregidos con la Ecuación 23.

$$Valor_{P,I,V}corregido = \left[\frac{100\% + D_{P,I,V}\%}{100\%} \right] * Valor_{P,I,V}STC \quad (23)$$

Por último, se realiza el cálculo de la eficiencia con base a los valores corregidos tomando como referente los valores STC (Ver Ecuación 24) este parámetro es importante en la toma de decisiones del número de módulos analizando el sitio de instalación.

$$\eta = \left(\frac{P_{maxsitio}}{P_{maxSTC}} \right) * 100 \quad (24)$$

Donde η es la eficiencia de operación del módulo en sitio. Los valores corregidos mediante la Ecuación 23 y las eficiencias de operación calculados de acuerdo a la temperatura mínima, promedio y máxima siguiendo el procedimiento anteriormente explicado, se recopila en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores corregidos por temperatura

	STC	Tmax	Tprom	Tmin
Pmax	450,00	360,42	369,87	379,32
Voc	49,70	42,01	42,82	43,63
Vmp	41,52	35,10	35,77	36,45
Isc	11,36	11,64	11,61	11,58
Imp	10,84	11,11	11,08	11,05
n	100,00%	80,09%	82,19%	84,29%

Fuente: autores

De la tabla anterior se puede inferir que las condiciones de operación críticas se obtienen al trabajar con la temperatura máxima del sitio de instalación; con base en ello es recomendable tener en cuenta la importancia de estos valores en la determinación del cable a instalar en el sistema fotovoltaico, en el tramo de generador a caja de paso.

Todo sistema de transmisión de energía tiene dos partes la fuente de energía y el receptor de la misma, por ello se considera la corriente a transportar y las caídas de tensión. Para el análisis de la corriente, se toma el criterio de máxima intensidad en la determinación del área transversal de cable a utilizar; como ya se mencionó la normativa NTC 2050 sección 220.3 rige este criterio en un diseño para una corriente no menor al 125% de la corriente a trabajar.

La intensidad máxima del generador aportada por los módulos fotovoltaicos es la intensidad de cortocircuito (I_{sc}) bajo condiciones STC, aunque se trabaja con una intensidad cercana a corriente de punto de máxima potencia (I_{pmp}), debido a su cercanía en magnitud con la I_{sc} [34] y tomando una perspectiva de seguridad, se toma esta última y se define la sección transversal del conductor para aquella cuya intensidad máxima admisible sea mayor o igual a la intensidad máxima calculada (Ver Tabla 3).

Se aplican factores de corrección a la intensidad de cortocircuito, independientes al 125%, los cuales tratan de acomodar las condiciones normalizadas para diferentes entornos de aplicación. En el tramo generador a caja de paso se toma los factores de corrección correspondientes a la temperatura y la agrupación de cables, de acuerdo al resumen enfocado en los factores de corrección aportado por el fabricante Cables RCT los valores obtenidos son de 1,14 y 1 respectivamente [44], [33]. La intensidad máxima se calcula mediante la Ecuación 25 obteniendo un valor de 16,59 A.

$$I_{m\acute{a}x} = FC_{temp} * FC_{agrup} * (125\% * I_{sc}) \quad (25)$$

Comparando el valor e intensidad máxima obtenida en la Tabla 3 en la parte correspondiente a conductores al aire libre y temperatura de 30°C, tomando la temperatura del cableado de 90°C, se determina un calibre 16 AWG para el tramo de generador a caja de paso. Si se realiza el análisis con la temperatura máxima del lugar de instalación, se obtiene el mismo valor de calibre.

El criterio correspondiente a la caída de tensión sirve como punto de comparación con el de intensidad máxima, con el fin de obtener una sección transversal de cable lo más segura posible. Para determinar el área transversal mediante este criterio, se debe tener en cuenta la Ecuación 26.

$$S = \frac{\rho * 2L * I_{pmp}}{\left[\left(\frac{\Delta V\%}{100\%} \right) * V_{mp} \right]} \quad (26)$$

Donde S es el área transversal del cable en mm^2 , L es la longitud del cable a utilizar, ρ es la resistividad del cobre asumida con un valor constante de $0,01724 \Omega * mm^2/m$ [34] y $\Delta V\%$ es la caída de tensión en porcentaje limitado a 1,5% por la norma NTC 2050 sección 530 en corriente continua.

La máxima distancia entre un arreglo de paneles en serie y la caja de paso es de 16,5 m valor que se plasma como la longitud del cable a utilizar. Con el fin de hacer un análisis exhaustivo para el área transversal del cable se hace uso de los diferentes valores corregidos de acuerdo a las temperaturas del lugar de instalación, donde la mayor área transversal necesitada se calcula con los parámetros de temperatura máxima, siendo su

valor de 12,01 mm² y su calibre correspondiente de 6 AWG (Ver Tabla 3). Debido a que este valor de área transversal es mayor al obtenido por el criterio de máxima intensidad, se hace selección del mismo para las características del cable a utilizar en el tramo generador a caja de paso.

Despejando la variable correspondiente a caída de tensión de la Ecuación 5 y tomando el área transversal correspondiente a 6 AWG se confirma que el valor de caída de tensión no supere al 1,5% establecido por la norma NTC 2050; dando como resultado al reemplazar los valores una magnitud de 0,000964%, valor inferior al límite.

El cable seleccionado para este tramo es el Cable Fotovoltaico ENERGYFLEX H1Z2Z2-K, con temperatura de operación de 90°C, aislamiento de Polietileno Reticulado XLPE Libre de halógeno, retardante a la llama, conductores de cobre estañado suave flexible y tensión nominal de 1,5 kV DC, certificado por la norma RETIE y NORMA N° 07225.

El tramo de caja de paso a inversor cuenta con una tubería de protección expuesta a la luz solar, con una longitud de cable aproximado de 25 m. El procedimiento a realizar es el mismo del tramo anterior, siguiendo en primer lugar el criterio de máxima intensidad seguido del de caída de tensión.

El cálculo del criterio de máxima intensidad se realiza con la Ecuación 27 y tiene en cuenta el factor de corrección de temperatura con valor de 0,96, el cual se obtiene al analizar la Tabla 17. Se determina un valor de máxima intensidad de 52,08 A correspondiente a un calibre de 8 AWG al relacionar los datos en la Tabla 3.

Tabla 17. Factores de temperatura del conductor permisible en el aislamiento

Temperatura Ambiente Corregido en °C	Rango de Temperatura del conductor permisible en el aislamiento			
	60°C	75°C	90°C	105°C
30 o Menos				
31-35	1	1	1	1
36-40	0,91	0,94	0,96	0,97
41-45	0,82	0,88	0,91	0,93
46-50	0,71	0,82	0,87	0,89
51-55	0,58	0,75	0,82	0,86
56-60	0,41	0,67	0,76	0,82
61-70		0,58	0,71	0,77
71-80		0,33	0,58	0,68
81-90			0,41	0,58
				0,5

Fuente: autores

$$I_{Nominal} = \frac{1,25 * I_{maxinv}}{FT} \quad (27)$$

Donde I_{maxinv} es la corriente máxima de entrada del inversor y FT el factor de corrección de temperatura de acuerdo a la temperatura permisible en el aislamiento.

En el criterio de caída de tensión se vuelve a hacer uso de la Ecuación 26 tomando como valor de L 25 m, ρ con un valor constante de $0,01724 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ [34], $\Delta V\%$ limitado a 1,5% por la norma NTC 2050 sección 530 en corriente continua y V_{pm} de 820 V de entrada máxima del inversor. Una vez hecho el cálculo, se obtiene un área transversal del cable de $2,8 \text{ mm}^2$ que representan un calibre de 12 AWG.

Como el criterio de máxima intensidad recomienda un área transversal del cable mayor, se toma este valor para la selección del cable correspondiente al tramo caja de paso a inversor. Por último, se realiza el análisis de caída de tensión correspondiente al tramo para corroborar que no supere el límite establecido por la norma NTC 2050, en conjunto con el primer tramo del cableado; para ello se retoma la Ecuación 5 obteniendo un valor para el tramo de 0,066% y un valor total 0,0076%, valor inferior al dado por la normativa.

El cableado de Corriente alterna corresponde al último tramo de la instalación fotovoltaica, el cual finaliza con la conexión física de la misma a la red eléctrica de distribución en baja tensión. Este tramo se inicia a la salida del inversor y finaliza en el punto de conexión a la caja de paso alterna.

Debido a las propiedades y funciones del inversor, el tramo de conexión del inversor a cada de paso alterna se realiza teniendo en cuenta las características de corriente alterna y trifásica; de igual forma se sigue manteniendo como criterio de selección del área transversal del cable la intensidad máxima y se define la caída de tensión procurando sea menor al 2%.

Para el criterio de intensidad máxima en corriente alterna, la ecuación a utilizar es la 28, donde los valores se toman de la ficha técnica del inversor incluyendo el parámetro de factor de potencia, el cual se calcula de manera teórica con esta información, despejando el valor de φ en la Ecuación 29.

$$I_{Nominal} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \text{Cos}\varphi} \quad (28)$$

Donde P es la potencia nominal del inversor, U es la tensión nominal del inversor y $\text{Cos}\varphi$ el factor de potencia.

$$Q_{m\acute{a}x} = S_{m\acute{a}x} * \text{Sen } \varphi \quad (29)$$

Los valores de Qmax y Smax son aportados por el fabricante para un factor de potencia ajustable.

El factor de corrección correspondiente a la temperatura se define por medio del uso de la tabla B. 52. 14 de la norma UNE-HD603604-5-52 para temperaturas ambiente diferentes de 30°C y corrientes admisibles para cables en el aire, se determina el uso de un aislamiento XLPE en la instalación debido a sus ventajas en ambientes hostiles. El valor del factor de corrección encontrado es de 1.

Una vez realizados los cálculos necesarios, se obtiene una corriente nominal de 59,54 A correspondiente a un calibre 7 AWG, este valor se identifica haciendo uso de la tabla B 52. 5 de la norma UNE-HD603604-5-52 correspondiente a la corriente admisible para los diversos métodos de instalación de cables aislados con XLPE-EPR, tres conductores cargados, cobre o aluminio, temperatura del conducto 90°C temperatura ambiente 30°C, manteniendo el método de instalación B1.

El cable seleccionado para el tramo inversor a caja de paso alterna es el AFUMEX CLASS 1000 V (AS RZ1-K) con temperaturas de servicio de hasta 90°C, aislamiento XLP tipo DIX3, resistente a la absorción de agua, frio, rayos ultravioletas; flexible sin propagación de llama ni de incendios.

El inversor seleccionado hace parte de una familia de inversores trifásicos multi-strig para uso doméstico, industrial y de instalaciones fotovoltaicas de campo, por ello, para determinar la caída de tensión debe realizarse a través de la ecuación 30, la cual tiene en cuenta la naturaleza trifásica del sistema.

$$DV = (R + X * \text{Tan } \varphi) * \frac{P}{V} \quad (30)$$

Donde R es la resistencia de la línea, X es la reactancia de la línea, P es la potencia en vatios transportada por la línea, V es la tensión de salida del inversor y $\text{Tan } \varphi$ es la tangente del ángulo correspondiente al factor de potencia.

Para el cálculo de la resistencia de la línea se hace uso de la Ecuación 31 con una resistividad del cobre a 90°C de 0,02273 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, una longitud del cable de 10 m y una sección transversal de 10,6 mm^2 obteniendo como resultado una resistencia de 0,02144 Ω .

$$R = \rho * \frac{L}{S} \quad (31)$$

Al momento de determinar el valor de la reactancia, se hace necesario conocer la resistencia del conductor de acuerdo a la longitud a utilizar, valor otorgado por el

fabricante, siendo de 1,21 Ω /Km para el cable seleccionado; debido a lo anterior se obtiene una reactancia final de 0,0121 Ω para la longitud de 10 m.

Con los valores de resistencia y reactancia hallados, es posible calcular la caída de tensión en voltios mediante la Ecuación 30 obteniendo un valor final de 0,93 V, el cual al compararse con los 400 V de salida del inversor, representa una magnitud de 0,23% como caída de tensión, valor que es menor al 2% seleccionado para el tramo.

8.4 Puesta a tierra

Tanto los circuitos de corriente continua como los de alterna se encuentran conectados a tierra y esta conexión se realiza de tal manera que no afecte a las condiciones de la puesta a tierra de la red de distribución.

Siguiendo la normativa NTC 2050, se determina el área transversal para el electrodo o conductor de puesta a tierra para corriente continua, con base en la sección 250-93 de la norma donde se define que el calibre no debe ser menor al del conductor más grande, en instalaciones que no consten de un equipo trifilar o un bobinado equilibrado; adicionalmente se establece un área mínima de 8,36 mm² u 8 AWG para el cobre. En el presente proyecto se toma un área transversal del cable de puesta a tierra en corriente continua de 13,3 mm² o 6 AWG.

Mediante la tabla 250 -94 de la norma NTC 2050 para acometidas de baja tensión, se halla el valor del área transversal para el conductor del electrodo de puesta a tierra en el sistema de corriente alterna. Como la sección transversal del mayor conductor de la acometida en alterna es menor a 33,62 mm² se halla una sección transversal mínima de 8,32 mm² u 8 AWG. Siguiendo las recomendaciones anteriores se toma el mismo calibre del cable a utilizar para el tramo inversor a caja de paso alterna.

Finalmente se determina el calibre de los conductores de puesta a tierra de los equipos, haciendo uso de la tabla 250-95 de la norma NTC 2050, tomando la corriente de salida del inversor como corriente nominal, dando como resultado una sección transversal mínima de 5,25 mm² o 10 AWG; para mayor economía se toma un área transversal del cable de 8,32 mm² u 8 AWG.

8.5 Canalización eléctrica

Siguiendo la normativa NTC 2050 sección 352 se evalúa el área transversal de las tuberías a utilizar de acuerdo al número de cables transportados por las mismas. En el tramo caja de paso a inversor, es necesario dimensionar la canalización para 13 cables de área transversal igual a 8,35 mm², los cuales cubren un área total de 108,55 mm²;

recordando que el área utilizada por los cables no debe ser mayor a 40% se calcula una sección de canalización mínima de 271,38 mm².

La tubería a utilizar son los tubos Conduit Galvanizados IMC que cuenta con la certificación UL 1242, diseñados para proteger cables eléctricos de instalaciones industriales en áreas clasificadas de alto riesgo de explosión y zonas de ambiente corrosivo. Mediante la revisión del catálogo del proveedor se identifica el diámetro nominal de la canalización que sea mayor al mínimo calculado anteriormente; se selecciona un diámetro interno de tubería de 1,28 in o 32,51 mm, que representa un área transversal de 285 mm².

Para las conexiones en corriente alterna se debe definir el área transversal de canalización que pueda transportar hasta 4 cables de calibre 10,6 mm² o 7 AWG, los cuales representan un área total de 42,4 mm² y un área mínima de canalización de 106 mm². Con base en lo anterior se selecciona una canalización con diámetro interno de 1,024 in o 26 mm y área transversal de 132,73 mm².

8.6 Protecciones

El análisis de las protecciones se realiza para las cajas de paso de corriente continua y corriente alterna de manera independiente. La caja de paso correspondiente a corriente continua cuenta con un fusible de protección y un interruptor automático polarizado para instalaciones fotovoltaicas, por cada conductor presente en la misma [33]. Para determinar las características de las protecciones en este tramo, se hace uso de los criterios presentes en la Ecuación 6; tomando como valor de I_t la intensidad en máxima potencia (I_{mp}) de los paneles con un valor de 10,84 A e I_{adm} de 132 A, dato obtenido de la ficha técnica del cable. De lo anterior se infiere un rango de posibilidades de selección para la intensidad nominal (I_n) de la protección, como se muestra a continuación.

$$10,84 \leq I_n \leq 132$$

Entre la gama de fusibles se elige un fusible que cumpla con esta condición y cuya intensidad nominal sea la más baja posible. El fusible fotovoltaico de la empresa FUSELCO LTDA de modelo QR26-15gPV1K cumple con las especificaciones requeridas, con una corriente nominal de 15 A y una tensión de operación de 1000 Vdc.

Como el valor que provoca la fusión del fusible otorgado por el fabricante es de 22,5 A, el valor de I_{df} será 1,6 veces I_n , es decir 24 A. El anterior parámetro, se corrobora con la segunda parte de la Ecuación 6, donde se observa la viabilidad del fusible seleccionado al ser menor a 1,45 veces la corriente admisible por el conductor.

Finalmente se comprueba el funcionamiento del fusible elegido contra cortocircuitos, haciendo uso de las curvas de prearco presentes en la ficha técnica; realizando un análisis con intensidad máxima de cortocircuito (I_{ccmax}) igual a la intensidad de cortocircuito de los paneles de 11,36 A, un tipo de cortocircuito recomendado de 5 s y una corriente nominal de 15 A; dando como resultado una protección contra cortocircuito de hasta 38 A, valor que comprueba el funcionamiento en cortocircuito ya que es mayor a I_{ccmax} y menor a los 10 KA de punto de corte del fusible.

El interruptor automático de corriente directa se determina haciendo uso de los análisis anteriores, buscando una corriente nominal cercana a I_{mp} , una tensión de trabajo de 1000 Vdc con punto de corte mayor a la corriente máxima de cortocircuito. Con base en lo anterior se elige el interruptor automático NB1DC-4P-C13-1000V de la serie NB1DC de la marca Chint.

Para la caja de paso de corriente alterna, se propone la instalación de interruptores diferenciales e interruptores magnetotérmicos para su protección. Para el cálculo de la intensidad nominal del interruptor magnetotérmico a utilizar en este tramo, es necesario calcular la corriente máxima admisible por los conductores y la corriente normal de empleo.

Haciendo uso de la ficha técnica del cable utilizado para corriente alterna, se identifica una Intensidad convencional de funcionamiento del dispositivo de protección de 75 A acorde a la sección transversal seleccionada; lo que conlleva a una intensidad admisible de 108,75 A. Para determinar la intensidad de funcionamiento del circuito (I_t) se hace uso de la siguiente ecuación.

$$I_t = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} \quad (32)$$

Donde P es la potencia máxima del inversor de 33 KW, U es el voltaje de salida del inversor de 400 V y $\cos \varphi$ es el factor de potencia calculado de manera teórica a partir de la ficha técnica del inversor. Al reemplazar los valores anteriores se obtiene una corriente I_t de 59,54 A; dando como rango de selección de la corriente nominal del interruptor magnetotérmico, el que se muestra a continuación.

$$59,54 \leq I_n \leq 108,75$$

El interruptor magnetotérmico seleccionado es el correspondiente a la serie NP1 de la marca Chint con corriente nominal de 63 A, tensión nominal de 415 V, frecuencia nominal de 60 Hz y punto de corte de 10 KV. Seguidamente se hace el análisis del dispositivo en cortocircuito utilizando la Ecuación 33.

$$S = \frac{I_{ccmax}\sqrt{t}}{K} \quad (33)$$

Donde S es el área transversal del conductor (10,6 mm²), K es la constante que depende de la naturaleza del conductor y del tipo de aislamiento (143) y t es la duración del cortocircuito en segundos en un rango de 0,1s a 5s. Como los valores de S y K son constantes, el valor de corriente máxima de cortocircuito se obtiene en el tiempo de duración de cortocircuito mínimo. Reemplazando se determina I_{ccmax} de 4,79 KA, valor inferior al punto de corte del dispositivo seleccionado.

Para la selección del interruptor diferencial se toma como criterios de selección la corriente nominal, la tensión de trabajo y el punto de corte que cumplan con los análisis realizados anteriormente. Se elige el interruptor diferencial correspondiente a la serie NL1 – AC NL1-4-63-30AC de la marca Chint con corriente nominal de 63 A, poder de corte de 6 KA y sensibilidad de 30 mA.

8.7 Selección de tableros o cajas de paso

Haciendo uso de la norma IEC 60229, se eligen las cajas de paso a utilizar procurando que su protección contra el ingreso de objetos sólidos extraños y la penetración del agua sean las necesarias para la seguridad de la instalación.

Cabe resaltar que la Norma IEC 60529 define el código IP como “Sistema de codificación para indicar los grados de protección proporcionados por una envolvente contra el acceso a partes peligrosas, la penetración de cuerpos sólidos extraños, la penetración de agua y para suministrar una información adicional unida a la referida protección”.

El tablero de protección correspondiente a la parte de corriente continua, se seleccionó con una protección IP66, es decir protegido totalmente contra el polvo y chorros fuertes de agua; la referencia seleccionada es la FHS-S3 54W de la serie FHS correspondiente a los envoltorios industriales de la marca Chint; cuenta con opciones diferentes de montaje, un chasis modular, puerta opaca y posibilidad de montaje en diversas superficies.

El tablero de protección de corriente alterna se seleccionó con un código de protección IP54 lo que representa protección contra el polvo y proyecciones de agua. La referencia NXW5-4030/15 de la Serie NXW5 de la marca Chint es la seleccionada para este tramo de la instalación debido a su facilidad de fijación en pared.

8.8 Selección del contador bidireccional

El decreto 348 de 2017 de la CREG, expresa que, para la autogeneración a pequeña escala, los excedentes que se entreguen a la red de distribución, se reconocerán mediante medición bidireccional, como créditos de energía.

Debido a que el proyecto se basa en un diseño de un sistema fotovoltaico ON-GRID, es necesario hacer la selección de un contador bidireccional acorde a las características del mismo. El dispositivo seleccionado es el LY-SM300-CT de la familia de medidores de infraestructura de medición avanzada AMI de la empresa TECUN, el cual cuenta con conexión para 3 fases y 4 hilos, voltaje nominal de 3x120/208V, frecuencia 60 Hz y resolución de 6400 Imp/kWh.

8.9 Diseño de la estructura de soporte

Para la realización del diseño estructural en primer lugar se debe determinar el tipo más adecuado de la estructura, teniendo en cuenta la necesidad de acceso a los componentes para su fácil mantenimiento. Para el presente proyecto, la superficie donde se ubica la instalación es el techo del edificio de tres pisos donde se encuentra el supermercado, este techo presenta un tejado de zinc y aunque existen métodos de fijación de soportes directamente a tejas, el manual de dimensionamiento solar fotovoltaico TERMEX [11] recomienda hacer la fijación del soporte llanamente sobre los elementos estructurales del edificio, en este caso sobre las columnas del mismo, esto con el fin de garantizar la seguridad de la fijación de los paneles solares.

Teniendo en cuenta los requerimientos de este proyecto se selecciona el tipo de estructura individual ya que esta se ajusta a tejados planos como en el presente caso, además, se moldea a las necesidades referentes a la ubicación estratégica de los paneles, debido a su diseño específico sólo para este caso de instalación.

Una vez seleccionado el tipo de estructura se procede a elegir el material más adecuado para la misma, como se menciona en el marco teórico los dos materiales más utilizados para esta función es el aluminio y el acero galvanizado. Los criterios de selección que se tiene en cuenta se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 18. Comparación de propiedades del aluminio y el acero

Criterio	Aluminio	Acero
Ligereza	Peso reducido	Peso significativo
Reciclabilidad y sostenibilidad	El 95% del aluminio utilizado en la fabricación de estructuras solares puede ser recuperado a través del reciclaje sin	34% es reutilizado (International Iron and Steel Institute)

	alterar sus características.	
Conductividad térmica y resistencia al fuego	Conductividad térmica de 205 W/(m.K) y un rango de fusión, superior a 600°	Conductividad térmica de 80 W/(m.K) y un punto de fusión alrededor de 1375°C
Versatilidad	Acepta muy bien el moldeado por lo que durante su extrusión se le pueden conferir todo tipo de formas.	Se adapta muy bien a la prefabricación.
Solidez y resistencia	tiene un límite de resistencia en tracción de 160-200 MPa.	La resistencia en tracción del acero es de 340 mega-pascales
Nulo mantenimiento	Se debe realizar mantenimiento periódico	Nulo mantenimiento
Resistencia a la corrosión	Soporta especialmente bien la corrosión gracias a al óxido que se produce naturalmente en este material, el óxido de aluminio	El recubrimiento de acero galvanizado provee una protección frente a la corrosión atmosférica y del agua extremadamente larga.
Costo	Precio asequible	Aunque se puede encontrarse en precios bajos es más costoso con respecto al del aluminio

Fuente: Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico

Con base a las propiedades de los materiales estudiados, se opta por el aluminio para la estructura de soporte, pues, al comparar, es más ligero, presenta una alta reciclabilidad además de una adecuada conductividad térmica, punto de fusión y resistencia a la corrosión a un precio asequible. Por otro lado, se elige el acero para los elementos de unión debido a que este material presenta más solidez y resistencia, siendo el criterio más significativo para los elementos que están sometidos constantemente a esfuerzos normales y cortantes.

Una vez seleccionado el material se calcula la carga total que debe soportar la estructura, en este caso la carga será 2405 Kg por parte de los paneles y el cableado. Para el cálculo de la fuerza total de la estructura se hace uso de la sumatoria de la fuerza mínima y la fuerza del viento (Ver Ecuación 34).

$$F = (p * g) + 9,8 * (0,11v^2 * S) \quad (34)$$

Donde p es la carga en kilogramos, g es la gravedad en m/s², v es la velocidad del aire en m/s y S es la superficie receptora en metros. Con esta expresión se obtiene una fuerza total de la estructura de 23,6KN.

La estructura del presente proyecto está dimensionada con base en los criterios de los fabricantes, tales como peso y fuerza del viento, y a las condiciones estructurales del edificio donde se encuentra el supermercado; en el Anexo E se puede observar al detalle cada uno de los elementos metálicos, expuestos a continuación.

La estructura está conformada por 39 columnas metálicas de aluminio tipo cajón de 1,80 metros de longitud, esto con el fin de permitir el acceso al personal de mantenimiento en la parte inferior de los paneles [45], estas columnas son utilizadas en el área de construcción ya que cumple con los requerimientos aceptados por los análisis estructurales, a partir de todas las combinaciones de cargas aplicables, tales como momentos flexionantes, fuerzas axiales, fuerzas cortantes, etc.

Para la unión entre columnas se opta por la viga IPE 180 de 200 x 200, el alma es de este perfil es la encargada de absorber los esfuerzos de cortante de manera eficiente, mientras que las alas están encargadas de absorber los esfuerzos perpendiculares a la sección [46]. El soporte donde descansan los paneles está compuesto por dos tipos de perfiles, un perfil doble C de 120 x 100 x 2 que va unido de la viga al segundo perfil C de 100 x 50 x 2, este último es se une directamente al panel por medio de una platina de 3"x3". Finalmente, como se mencionó en el marco teórico el método de fijación de la estructura a las columnas de concreto del edificio es mediante el anclaje con taco químico como se observa en el detalle A del Anexo E, se utilizan pernos de anclaje con tuercas y contratueras para nivelar alturas y e inclinaciones.

8.10 Análisis financiero

8.10.1 Cálculo del presupuesto

- *Calculo de Mano de Obra*

Se cuenta con un técnico electricista para la instalación eléctrica de los equipos, interruptores y tableros de distribución; un técnico instrumentista para la visualización de mantenimientos, apoyo en instalación eléctrica, montaje y operación de los equipos e instrumentos de control; un técnico en mecánica para el montaje, instalación y puesta en marcha de la estructura de soporte, y personal de apoyo. De igual forma se prevé la contratación de un ornamentador para la realización de la estructura. Se propone la

contratación con terceros para el personal necesario para la puesta en marcha del sistema fotovoltaico. El presupuesto de la mano de obra se ve en la tabla a continuación.

Tabla 19. Presupuesto Mano de Obra

Mano de obra requerida		
Cargo	Cantidad	Salario
Técnico Electricista	1	\$ 1.500.000
Técnico Instrumentista	1	\$ 1.500.000
Técnico Mecánico	1	\$ 1.500.000
Ornamentador	1	\$ 7.000.000
Ayudantes	2	\$ 908.526
	Total	\$ 13.317.052

Fuente: autores

- *Cálculo de Materiales y Equipos*

Se realiza la cotización de los diversos equipos dimensionados para el funcionamiento del generador fotovoltaico, así como la estructura, utilería y accesorios; consultando en diversos proveedores, fabricantes e intermediarios. Se toma la TRM correspondiente al día 8 de agosto del 2021 para las respectivas cotizaciones, por ende, el valor total de la inversión puede variar a futuro. A continuación, se presenta el presupuesto correspondiente a los materiales y equipos en la Tabla 20.

Tabla 20. Presupuesto Materiales y Equipos

Materiales y equipos			
Elemento	Costo unitario	Cantidad	Costo por elemento
Panel Solar JAM72S20	\$ 566.800	96	\$ 54.412.800
Inversor INGECON SUN 33TI	\$ 19.400.000	1	\$ 19.400.000
Tablero FHS-S3 54W	\$ 1.500.000	1	\$ 1.500.000
Tablero NXW5-4030/15	\$ 442.000	1	\$ 442.000
Fusible Solar QR26-15gPV1K	\$ 198.000	12	\$ 2.376.000
Portafusibles Autosolar	\$ 19.000	6	\$ 114.000
Interruptor NB1DC-4P-C13-1000V	\$ 706.000	3	\$ 2.118.000
Interruptor magneto térmico NB1	\$ 850.000	1	\$ 850.000
Interruptor diferencial NL1	\$ 1.750.000	1	\$ 1.750.000
Contador bidireccional LY-SM300-CT	\$ 892.000	1	\$ 892.000
Cable H1Z2Z2-K 6 awg [metro]	\$ 12.000	230	\$ 2.760.000
Cable H1Z2Z2-K 8 awg [metro]	\$ 9.990	355	\$ 3.546.450
Cable AS RZ1-K 7awg [metro]	\$ 8.000	55	\$ 440.000
Tubería y uniones conduit 3/4"	\$ 119.000	1	\$ 119.000
Tubería y uniones conduit 1"	\$ 336.728	1	\$ 336.728
Pernos de anclaje	\$ 3.000	36	\$ 108.000
Estructura de Aluminio [metro]	\$ 80.000	250	\$ 20.000.000
Resina para taco químico	\$ 52.000	13	\$ 676.000
Uniones de acero galvanizado	\$ 1.975	384	\$ 758.400
Utilería	\$ 500.000	1	\$ 500.000
		Total	\$ 113.099.378

Fuente: autores

- *Calculo de Herramientas y transporte*

Con base en la propuesta de la tercerización laboral del personal, las herramientas necesarias están cubiertas por la empresa a contratar, previendo gastos de este ámbito en el apartado utilería del presupuesto de materiales y equipos. Para el transporte de la mercancía necesaria se calcula el flete necesario en los equipos de posible importación, además se cuenta con un margen de seguridad del 25%; el presupuesto final de herramientas y transporte es de \$ 27.227.572.

- *Calculo de Costos Administrativos*

Se tuvo en cuenta como costos administrativos la papelería, alimentación y transporte necesaria para la operación del proceso de instalación, durante el periodo de un mes laboral. El presupuesto de costos administrativos es de \$ 6.950.000.

8.10.2 Valor Presente Neto (VPN)

Para el cálculo del Valor Presente Neto, se realiza el análisis de ingresos y egresos del proyecto partiendo de un costo mensual promedio de energía eléctrica de \$ 2.867.873, una inflación anual promedio de 3,5% en el costo KWh y una cobertura del sistema fotovoltaico del 90% de la capacidad requerida, simulando un escenario crítico del diseño. Se estima un retorno de la inversión bruto en el año 2026.

Para la evaluación de los egresos del proyecto del sistema fotovoltaico, se toma el método de depreciación de la línea recta para los paneles solares, inversor y contador bidireccional, con tiempo de vida útil de 20 años desde el momento de la instalación. El valor correspondiente a costos de mantenimiento anual se define como el 1% del valor de la inversión inicial. Finalmente se agrega el 10% de la capacidad requerida como gasto por parte de la factura eléctrica.

Por último, se realiza el cálculo de flujo de caja y su valor actual, tomando como tasa de descuento la rentabilidad efectiva anual de invertir en CDT para la entidad CREZCAMOS, con un valor de 5,89% E.A. Con base en los cálculos anteriores (Ver Tabla 21) se determina un VPN para el proyecto de \$ 213.714.970 si se realiza el 100% de la inversión inicial en el primer año. Como el VPN es positivo se puede afirmar que el proyecto es viable. Cabe resaltar que, al tomar el diseño del proyecto bajo un promedio de consumo, es posible obtener ahorros de autogeneración al suministrar energía a la red eléctrica, en meses de baja demanda.

Tabla 21. Cálculos previos al VPN

Año	Ingresos	Egresos		Flujo de caja	Flujo de caja acumulado	Valor Actual Flujo de Caja
		Instalación	Electrificadora			
2022	\$ 32.057.087	\$ 90.755.436	\$ 3.561.899	-\$ 62.260.247	-\$ 62.260.247	-\$ 58.797.098
2023	\$ 33.179.085	\$ 4.866.234	\$ 3.686.565	\$ 24.626.286	-\$ 37.633.961	\$ 21.962.867
2024	\$ 34.340.353	\$ 4.866.234	\$ 3.815.595	\$ 25.658.524	-\$ 11.975.437	\$ 21.610.600
2025	\$ 35.542.265	\$ 4.866.234	\$ 3.949.141	\$ 26.726.891	\$ 14.751.454	\$ 21.258.306
2026	\$ 36.786.245	\$ 4.866.234	\$ 4.087.361	\$ 27.832.650	\$ 42.584.104	\$ 20.906.427
2027	\$ 38.073.763	\$ 4.866.234	\$ 4.230.418	\$ 28.977.111	\$ 71.561.215	\$ 20.555.375
2028	\$ 39.406.345	\$ 4.866.234	\$ 4.378.483	\$ 30.161.628	\$ 101.722.844	\$ 20.205.525
2029	\$ 40.785.567	\$ 4.866.234	\$ 4.531.730	\$ 31.387.603	\$ 133.110.447	\$ 19.857.226
2030	\$ 42.213.062	\$ 4.866.234	\$ 4.690.340	\$ 32.656.488	\$ 165.766.935	\$ 19.510.794
2031	\$ 43.690.519	\$ 4.866.234	\$ 4.854.502	\$ 33.969.783	\$ 199.736.718	\$ 19.166.521
2032	\$ 45.219.687	\$ 4.866.234	\$ 5.024.410	\$ 35.329.044	\$ 235.065.761	\$ 18.824.673
2033	\$ 46.802.376	\$ 4.866.234	\$ 5.200.264	\$ 36.735.878	\$ 271.801.640	\$ 18.485.493
2034	\$ 48.440.459	\$ 4.866.234	\$ 5.382.273	\$ 38.191.952	\$ 309.993.592	\$ 18.149.202
2035	\$ 50.135.875	\$ 4.866.234	\$ 5.570.653	\$ 39.698.989	\$ 349.692.581	\$ 17.815.998
2036	\$ 51.890.631	\$ 4.866.234	\$ 5.765.626	\$ 41.258.771	\$ 390.951.352	\$ 17.486.064
2037	\$ 53.706.803	\$ 4.866.234	\$ 5.967.423	\$ 42.873.147	\$ 433.824.499	\$ 17.159.562
2038	\$ 55.586.541	\$ 4.866.234	\$ 6.176.282	\$ 44.544.025	\$ 478.368.524	\$ 16.836.637
2039	\$ 57.532.070	\$ 4.866.234	\$ 6.392.452	\$ 46.273.384	\$ 524.641.908	\$ 16.517.419
2040	\$ 59.545.693	\$ 4.866.234	\$ 6.616.188	\$ 48.063.271	\$ 572.705.178	\$ 16.202.025
2041	\$ 61.629.792	\$ 4.866.234	\$ 6.847.755	\$ 49.915.803	\$ 622.620.982	\$ 15.890.556
2042	\$ 63.786.834	\$ 4.866.234	\$ 7.087.426	\$ 51.833.175	\$ 674.454.156	\$ 15.583.101

Fuente: autores

8.10.3 Tasa Interna de Retorno TIR

Se obtiene un valor de TIR del 43,62%, valor muy superior a la tasa de descuento utilizada para el cálculo del Valor Presente Neto, por lo cual el proyecto es altamente rentable desde el punto de vista económico.

8.10.4 Retorno de la Inversión ROI

En el cálculo de retorno de la inversión se toma el Valor Presente Neto como el total de ingresos del proyecto a 20 años; adicionalmente los egresos para el cálculo de la ROI fueron la suma total de los presupuestos realizados antes de incurrir en la depreciación. El valor encontrado para la ROI fue del 136,08%, esto quiere decir que por cada 100 pesos invertidos el proyecto retorna aproximadamente \$136 como ganancia a la inversión, haciendo al diseño factible.

8.11 Análisis ambiental

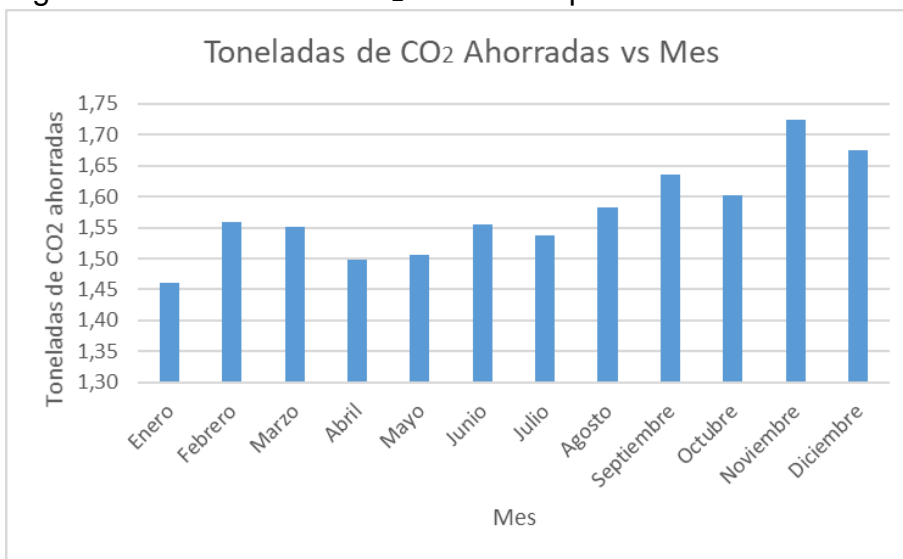
En términos ambientales, el análisis se realiza por medio de la cantidad de CO₂ evitado al implementar sistemas solares fotovoltaicos, en comparación a la producción de energía eléctrica convencional, para ello, la agencia de protección ambiental de Estados Unidos

(EPA) identifica un valor de conversión de 429 Gramos de CO₂/kWh Instalado como emisiones evitadas, obteniendo por consecuencia la siguiente ecuación [47].

$$\text{Emisiones Ahorradas de CO}_2 = \text{Energía en kWh} * 429 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} \quad (35)$$

Con el fin de implementar de manera objetiva el diagnóstico, se toma el registro de consumos del último año, obteniendo un total de 18,89 Toneladas de CO₂ ahorradas al año. En la siguiente figura se presentan las emisiones ahorradas de CO₂.

Figura 9. Toneladas de CO₂ Ahorrados por mes

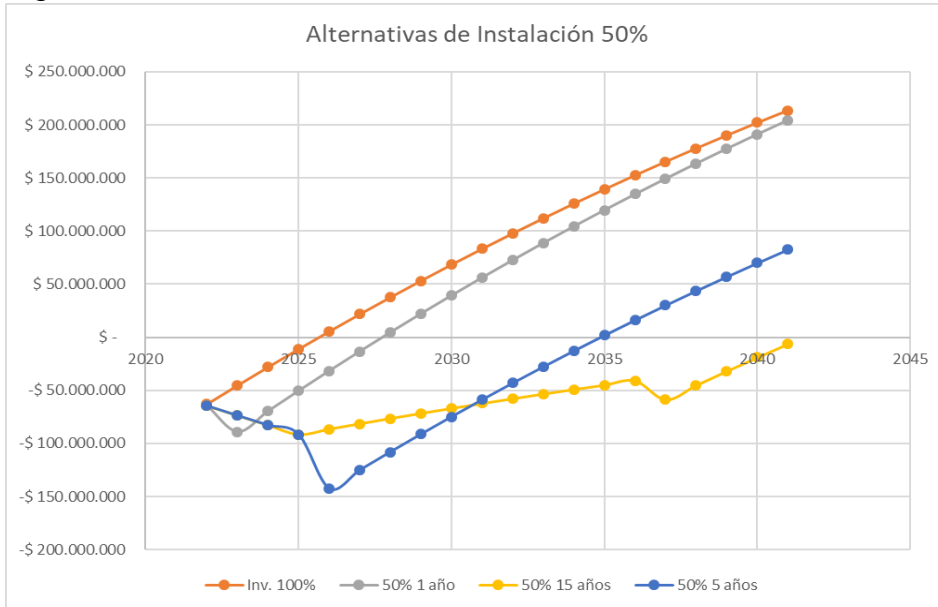


Fuente: autores

8.12 Alternativas de instalación

Con el fin de presentar diversas alternativas de inversión, se realiza un análisis con base a una capacidad inicial instalada del 50% y una capacidad futura del 50%. Se toma como parámetro de comparación el Valor Presente Neto de una simulación a 20 años de vida útil de los equipos instalados en la fase inicial; de acuerdo a lo anterior se identifica viabilidad del proyecto hasta máximo 14 años de espera para el 100% de la transición (Ver Figura 10).

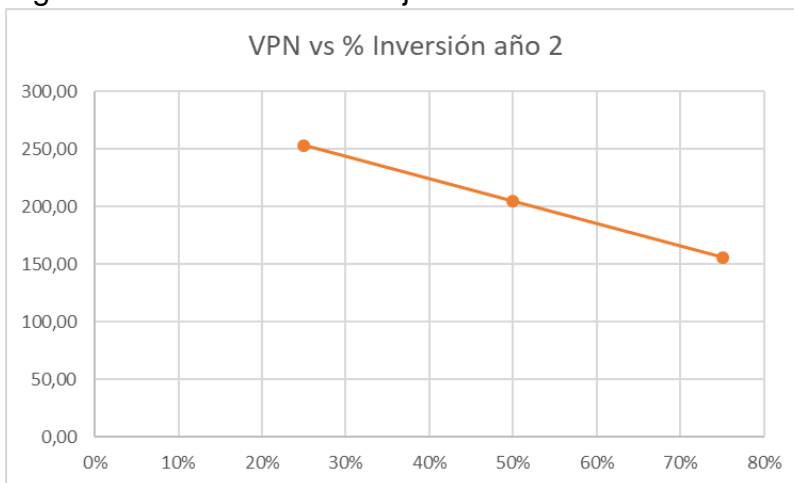
Figura 10. Alternativas de Instalación 50%



Fuente: autores

Se observa un VPN similar entre la inversión a 100% en primer año y la inversión a 50% a segundo año, correspondiente al 91,67% del primer valor, por lo cual se infiere viabilidad con dos etapas de inversión con separación de 1 año de espera. Con base en lo anterior se analiza la segunda inversión con diversos valores de transición, pero partiendo del supuesto de una transición final del 100% y una cobertura del sistema mínima del 90%. Se concluye que a mayor valor de inversión inicial mayor será la viabilidad del proyecto (Ver Figura 11).

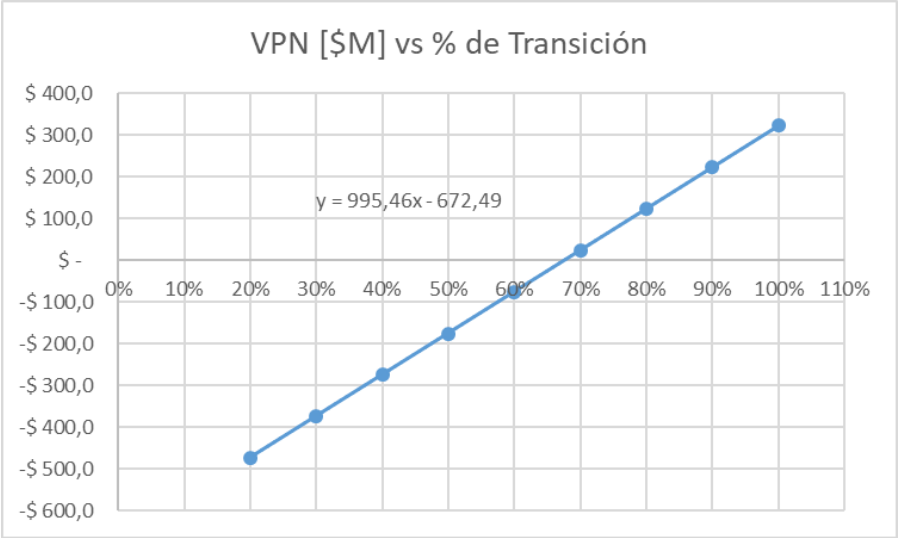
Figura 11. VPN vs Porcentaje de Inversión año 2



Fuente: autores

Finalmente, se presentan los VPN para diversos porcentajes de transición, con base en los equipos presupuestados anteriormente, permitiendo la posibilidad de elección de acuerdo a la capacidad económica del interesado en el proyecto sin perder la viabilidad del mismo. Cabe resaltar que, de acuerdo a los parámetros del inversor, se puede elegir como mínimo el 25% de la capacidad proyectada. Se observa un porcentaje de transición inicial mínima del 67% sin afectar la viabilidad del diseño (ver Figura 12).

Figura 12. VPN vs Porcentaje de Transición



Fuente: autores

9. CONCLUSIONES

Una vez analizados los históricos del establecimiento, se obtuvo un consumo promedio mensual para el supermercado “Siga y Merque” de 3.669 kWh que representa un gasto en energía eléctrica de \$ 2.867.873 COP, es decir, un consumo promedio anual de 44.028 kWh.

El diseño de la central fotovoltaica (ver Anexo F) cuenta con una potencia de generador de 43,2 kW, valor inferior al establecido por la resolución CREG para los usuarios de autogeneración a pequeña escala (1MW). Adicionalmente, la potencia abarca desde un 90,87% de la capacidad requerida, al comparar con los históricos del establecimiento, tomando como eficiencia el 82,19% calculado para la temperatura promedio del lugar. Cabe resaltar que todos los equipos utilizados, fueron dimensionados con base en la normativa colombiana o su equivalente internacional.

Se determina un presupuesto para Mano de Obra de \$ 13.317.052, Materiales y Equipos de \$ 113.099.378, herramientas y transporte de \$ 27.227.572, Costos Administrativos de \$ 6.950.000, para una inversión inicial total a primer periodo anual de \$ 161.724.996.

Mediante el análisis económico se determinó para el proyecto viabilidad, con una TIR de 43,62% y factibilidad con un VPN de \$ 213.714.970 COP, un ROI de 136,08%, para un análisis a 20 años luego de la instalación. Igualmente se determina viabilidad para una inversión en el segundo periodo anual de operación, partiendo de un 50% de transición, representando un 91,67% de los beneficios obtenidos respecto a la primera alternativa.

La sostenibilidad del proyecto se ve representada con las 18,89 Toneladas de CO₂ ahorradas al año, que aportan directamente a los objetivos 7 y 9 de los ODS, de igual manera apoyando al cumplimiento del Plan Nacional de Desarrollo.

En general, al realizar el dimensionamiento energético para el supermercado “Siga y Merque”, con base en la energía solar fotovoltaica, se identificó viabilidad, factibilidad y sostenibilidad en el diseño propuesto, al contar con un retorno de la inversión en el tercer periodo anual, luego de la implementación del sistema; un ahorro en pago de energía eléctrica ante la ESSA de \$213.714.970 COP en valor actual, para los 20 años de vida útil de la instalación; garantizando un abastecimiento mínimo del 90% de la capacidad requerida por el establecimiento, con los equipos de uso actual.

10.RECOMENDACIONES

Se observa la posibilidad de la creación de un manual básico para el dimensionamiento de instalaciones On-Grid a partir de la recopilación teórica presente en el proyecto. De igual forma es posible indagar en los sistemas fotovoltaicos Off-Grid e Híbridos con el fin de mostrar más alternativas conforme a las facilidades de los interesados.

Para mayor detalle en el proceso de dimensionamiento e instalación, es posible ahondar en normativas internacionales que partan de la misma base a la nacional, como lo son UNE e ITC.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Cortés y A. Arango Londoño, «ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA: UNA APROXIMACIÓN HACIA A LA ECONOMÍA,» Revista Ciencias Estratégicas, Medellín, 2017.
- [2] M. Giraldo , R. Vacca Ramirez y A. Urrego Quintanilla, «LAS ENERGÍAS ALTERNATIVAS ¿UNA OPORTUNIDAD PARA COLOMBIA?,» Dailnet, Colombia, s.f.
- [3] J. Gómez Ramírez, J. Murcia Murcia y I. Cabeza Rojas, «LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERSPECTIVAS,» Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2017.
- [4] G. V. Mir, «Enérgya VM,» 12 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.energyavm.es/las-energias-no-renovables-no-estan-de-moda/>.
- [5] N. U.-A. d. París, «United Nations Climate Change,» UNFCCC Sites and platforms, Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>. [Último acceso: Marzo 2021].
- [6] PNUMA, Manual del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, Nairobi: UNON, 2006.
- [7] M. d. Ambiente, «Ministerio del Ambiente,» Convenio de Viena, 24 Agosto 2010. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=193:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-9>. [Último acceso: 12 Mayo 2021].
- [8] «Ministerio de Ambiente,» Protocolo de Kioto, 2008. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/convencion-marco-de-naciones-unidas-para-el-cambio-climatico-cmnucc/protocolo-de-kioto>. [Último acceso: 12 Mayo 2021].
- [9] N. Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2015-2019. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [10] A. I. d. I. E. Renovables, «Fuentes de Energías Renovables,» 21 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.seslatam.com/novedades/2020/el-crecimiento-de-la-energia-solar-supera-todas-las-expectativas/>.
- [11] TERMEX, Manual Técnico de Dimensionamiento Solar Fotovoltaico, Ciudad de México: TERMEX, 2021.
- [12] Departamento Nacional de Planeación, «Plan nacional de desarrollo,» 2018.
- [13] J. Gómez-Ramírez, J. Murcia-Murcia y I. Cabeza-Rojas, «LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERSPECTIVAS,» Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2017.
- [14] T. González Estrada y J. A. Valencia Marín, «Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,» upme, Bogotá, 2015.
- [15] L. Palacios, A. Hernández, Y. Villareal y R. Fontalvo, «ELABORACIÓN DE DOCUMENTO DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA VEREDA DINDAL,» Universidad Católica de Colombia, Hila, s.f..

- [16] M. . C. Artunduaga Rojas y L. M. Bermeo Méndez, «La energía solar fotovoltaica como alternativa sostenible de abastecimiento eléctrico en la vereda Charguayaco del municipio de Pitalito Huila,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD, Pitalito, 2019.
- [17] S. Caicedo Gómez, «ESTUDIO TÉCNICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD PILOTO COMO CASO DE ESTUDIO,» Universidad Pitoto de Colombia, Bogotá, 2019.
- [18] W. A. Barrera Salazar y F. A. Castilla Garzón, «PROPUESTA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA CONSUMO ELÉCTRICO EN EL MUNICIPIO DE QUEBRADANEGRA, CUNDINAMARCA.,» Universidad Libre de Colombia, Bogotá, 2018.
- [19] J. Acero Herrera y H. S. Puentes Acevedo, «GUÍA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y SELECCIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS PARA EDIFICIOS Y VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.,» Universidad La Gran Colombia, Bogotá, 2019.
- [20] J. L. Rodríguez Cortés y D. L. Quintero Cárdenas, «EVALUACIÓN DE BENEFICIOS EN TIEMPO, ALCANCE Y COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA UN PABELLÓN CARCELARIO EN COMPARACIÓN CON UN SISTEMA CONVENCIONAL,» Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2019.
- [21] C. M. Espitia Rey, «GUIA METODOLOGICA PARA LA IMPLEMENTACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A PEQUEÑA ESCALA EN COLOMBIA,» Universidad de Santander, Bucaramanga, 2017.
- [22] A. García Barrero y L. Peñuela Guevara, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES COMO PRUEBA PILOTO PARA SUMINISTRO ENERGÉTICO DE DISPOSITIVOS MÓVILES, EN LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, SEDE VILLAVICENCIO CAMPUS LOMA LINDA,» Universidad Santo Tomás, Villavicencio, 2019.
- [23] Universidad de las Americas (UDLAP), «FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS SOLARES,» de *CONTROL DIGITAL PARA CONVERTIDOR MULTINIVEL ALIMENTADO CON ENERGÍA SOLAR*, Puebla, s.f., p. 10.
- [24] O. Perpiñán Lamigueiro, *ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA*, Madrid: Creative Commons, 2020.
- [25] H. Ramos López y R. Luna Puente, «“DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A LA RED PARA EL AREA DE ESTACIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE SALAMANCA”,» Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua , 2014.
- [26] J. Martinez Borgues, «IMPLEMENTACIÓN DE PANELES SOLARES EN CASA HABITACIÓN,» Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2013.
- [27] L. F. Basuto Gustines, «PLAN DE NEGOCIOS PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA DEDICADA A LA COMERCIALIZACIÓN, INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PANELES SOLARES EN EL ÁREA RURAL DEL CANTÓN SANTA LUCÍA, PROVINCIA DEL GUAYAS”,» Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2015.
- [28] MARVIVA, «PANELES SOLARES. ENERGÍA SOLAR EN VELEROS. PLACAS SOLARES EN BARCOS,» Bogotá, s.f.

- [29] Grupo Elektra, *HORA SOLAR PICO*, México, 2014.
- [30] L. G. Sandoval Quijano, «ENERGÍA SOLAR: ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA PARA EL EDIFICIO YARIGUIES DE LA UNIVERSIDAD DE SANTANDER UDES,» Universidad de Santander, Bucaramanga, 2013.
- [31] J. L. Higón Calvet, «CONTRIBUCIONES AL ESTUDIO DE ASOLEO GEOMÉTRICO. PROCEDIMIENTOS PARA EL CÁLCULO DE OBSTRUCCIÓN SOLAR. APLICACIONES,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [32] CENTRO DE ESTUDIOS DE ENERGÍAS RENOVABLES, «Energía Solar Fotovoltaica,» de *Curso Técnico Energía Fotovoltaica*, España.
- [33] N. Mrabet Zerrouk, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2011.
- [34] A. F. Ospino Martínez, «REFRIGERACION, CLIMATIZACION, ELECTRICIDAD Y ENERGIA SOLAR,» Mex.tl, 2021. [En línea]. Available: http://refrigeracionyclimatizaciondelasabana.mex.tl/1036991_VIDEOTUTORIAL-DE-COOLPACK.html. [Último acceso: Julio 2021].
- [35] CADENZA ELECTRIC, «CADENZA ELECTRIC,» [En línea]. Available: <https://www.cadenzaelectric.com/magnetotermico-como-funciona.html>. [Último acceso: Julio 2021].
- [36] Empresas Públicas de Medellín (EPM), «TUBERÍAS ELÉCTRICAS EXPUESTAS,» CENTROS DE EXCELENCIA TÉCNICA UNIDAD NORMALIZACIÓN Y LABORATORIOS, 2018.
- [37] J. Marsano Delgado, «EL ANÁLISIS FINANCIERO Y SU IMPORTANCIA EN LA GESTIÓN DE EMPRESAS TURÍSTICAS,» Escuela Profesional de Turismo y Hotelería, Lima, 2013.
- [38] CONEXIONESAN, «CONEXIONESAN,» 20 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2020/07/como-realizar-un-estudio-de-viabilidad-de-proyectos-de-manera-correcta-1/>. [Último acceso: Julio 2021].
- [39] PAL CONSULTING, «PAL CONSULTING,» 5 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.palcorporate.com.mx/es/articulos/que-es-la-depreciacion-contable-y-cuales-son-los-tipos>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [40] ZONA ECONÓMICA, «EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN,» [En línea]. Available: <https://www.zonaeconomica.com/evaluacion-proyectos-inversion>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [41] Ministerio del Medio Ambiente, «Ministerio del Medio Ambiente,» s.f. [En línea]. Available: <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [42] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «IDEAM,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/>. [Último acceso: Marzo 2021].
- [43] P. P. Vergara Barrios, J. M. Rey López, G. A. Osma Pinto y G. Ordonez Plata, «Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.

- [44] CABLES RCT, «CABLES RCT,» 6 Mayo 2019. [En línea]. Available: cablesrct.com. [Último acceso: Junio 2021].
- [45] UNIVERSIDAD DE SONORA, «PERFILES ARMADOS EN CAJÓN SUJETOS A COMPRESIÓN AXIAL,» [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/12230/Capitulo3.pdf>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [46] FERROS LA POBLA, «FERROS LA POBLA,» [En línea]. Available: <https://ferroslapobla.com/que-son-las-vigas-de-hierro/>. [Último acceso: agosto 2021].
- [47] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), «Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA),» [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos-y>. [Último acceso: Agosto 2021].