

**Prototipo de automatización y monitoreo de sistemas fotovoltaicos para comunidades  
vulnerables**

Miguel Ángel Muñoz Hernández

Wilson Giovani Ardila Aguirre

Asesor

Faver Adrián Amorocho Sepúlveda

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

## **Agradecimientos**

### Agradecimientos Wilson Ardila

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza, la perseverancia y la claridad necesaria para culminar satisfactoriamente este proceso académico y personal.

A mis padres, Luis Ardila y María Aguirre, quienes, con su apoyo incondicional, su confianza y su ejemplo de vida me han motivado a superar cada reto. Su respaldo moral, emocional y espiritual ha sido el pilar fundamental que me ha permitido avanzar con determinación en la construcción de este logro.

A mi compañero de proyecto, Miguel Muñoz, por su amistad sincera, su apoyo en los momentos de dificultad y la confianza mutua que nos permitió avanzar juntos. Su creatividad, disposición al trabajo en equipo y compromiso fueron esenciales para materializar esta propuesta. Gracias a este esfuerzo compartido, logramos adquirir nuevos conocimientos sobre las tecnologías renovables, en particular la energía fotovoltaica, que sin duda fortalecerán nuestra formación profesional y nos permitirán aportar soluciones innovadoras a las problemáticas que enfrenta nuestra comunidad día a día.

Al docente y tutor del proyecto, Faber Amorocho, por su acompañamiento constante en la planeación, desarrollo e implementación del prototipo de estación fotovoltaica, así como en la elaboración de este informe. Su guía permitió comprender la importancia de llevar a cabo un proyecto con orden, disciplina y visión, enseñándome que las ideas académicas también pueden transformarse en iniciativas de impacto real y en oportunidades de negocio para nuestra región.

Al Ingeniero Adrián Gaspar, por su valiosa asesoría en el diseño e implementación del prototipo, cuyo conocimiento y orientación fueron claves para dar forma técnica y práctica a esta propuesta.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, por el respaldo académico y administrativo brindado, así como por el acceso a recursos, información y equipos que hicieron posible la consolidación de este trabajo.

Finalmente, a todas las personas e instituciones que de una u otra manera contribuyeron con este proceso, les expreso mi más sincera gratitud. Este logro no es únicamente personal, sino también el resultado de la suma de voluntades, enseñanzas y apoyos que me acompañaron en el camino.

#### Agradecimientos Miguel Muñoz

En primer lugar, doy gracias a Dios, por su guía constante, por darme la salud, la paciencia y la motivación necesarias para culminar con éxito este proceso académico y de vida.

A mis padres, Gladis Hernández y Miguel Muñoz, quienes, con su ejemplo, apoyo incondicional y confianza en mis capacidades, han sido siempre mi mayor inspiración. Su acompañamiento, tanto en los momentos difíciles como en los logros alcanzados, ha sido esencial para avanzar en este camino.

A mi compañero de grado, Wilson Ardila, con quien compartí aprendizajes, retos y satisfacciones a lo largo del desarrollo de este proyecto. Su disciplina, compromiso y espíritu colaborativo fueron determinantes para consolidar los resultados y demostrar que el trabajo en equipo es la clave para alcanzar metas comunes.

A mi tío Héctor Muñoz, mi hermano Andrés Muñoz, y mis tías Sandra Muñoz y Doris Morales, por estar presentes con su apoyo, ánimo y confianza en cada etapa de este proceso. Extiendo

igualmente mi agradecimiento a toda mi familia, quienes con sus palabras de aliento fortalecieron mi determinación para no desfallecer.

A la doctora Diana Puerta, directora de la Maestría en Gerencia Ambiental de la Universidad de los Andes, por su liderazgo y visión académica, que inspiran a continuar investigando y trabajando en soluciones sostenibles que respondan a los desafíos actuales de nuestra sociedad.

## Resumen

El presente trabajo de grado presenta el diseño e implementación de un prototipo de estación fotovoltaica portátil y de bajo costo, orientado a la reducción del consumo energético en viviendas de estratos 1 y 2 de la ciudad de Medellín, específicamente en el barrio Manrique Oriental. El proyecto surge de la necesidad de promover el acceso a energías limpias en comunidades vulnerables y de aprovechar las condiciones favorables de radiación solar en el territorio. La investigación se desarrolló en tres fases: planeación, diseño y validación en campo. En la fase de diseño se seleccionaron los componentes principales como el panel solar policristalino de 150 W, inversor de 300 W, batería sellada de 12 V a 12 Ah y un controlador de carga PWM de 20 A ajustados a los requerimientos energéticos de viviendas tipo. Posteriormente, se construyó un prototipo móvil, el cual fue sometido a pruebas de consumo energético en condiciones reales. Los resultados evidenciaron que el sistema es capaz de suplir hasta un 9,15 % del consumo diario de energía eléctrica, priorizando cargas esenciales como la iluminación, ventiladores y cargadores de dispositivos. Se concluye que el prototipo hace parte de una alternativa técnica viable y replicable para hogares de bajos recursos, aportando al ahorro económico, a la sostenibilidad energética y a la sensibilización sobre el aprovechamiento de fuentes renovables en entornos urbanos.

**Palabras clave:** Energía solar, estación fotovoltaica, sostenibilidad, consumo energético, transición energética.

## Abstract

This thesis presents the design and implementation of a low-cost, portable photovoltaic station prototype aimed at reducing energy consumption in low-income housing in Medellín, specifically in the Manrique Oriental neighborhood. The project arose from the need to promote access to clean energy in vulnerable communities and to take advantage of the favorable solar radiation conditions in the area. The research was developed in three phases: planning, design, and field validation. In the design phase, the main components were selected: a 150 W polycrystalline solar panel, a 300 W inverter, a 12 V/12 Ah sealed battery, and a 20 A PWM charge controller adjusted to the energy requirements of typical homes. Subsequently, a mobile prototype was built and subjected to energy consumption tests under real-life conditions. The results showed that the system is capable of supplying up to 9.15% of daily electricity consumption, prioritizing essential loads such as lighting, fans, and device chargers. It is concluded that the prototype is part of a viable and replicable technical alternative for low-income households, contributing to economic savings, energy sustainability, and raising awareness about the use of renewable sources in urban environments.

**Keywords:** Solar energy, photovoltaic station, sustainability, energy consumption, energy transition.

## Tabla de contenido

Introducción .....	16
Planteamiento del Problema.....	18
Justificación.....	20
Objetivos... ..	22
Objetivo General .....	22
Objetivos Específicos .....	22
Antecedentes .....	23
Antecedentes de la Energía Solar Fotovoltaica .....	24
Situación de la Energía Fotovoltaica en Colombia .....	26
Marco de Referencia .....	29
Marco Teórico.....	29
Sistema Solar Fotovoltaico .....	29
Efecto Fotovoltaico.....	30
Captación de Energía .....	30
Radiación Solar.....	30
Panel Solar .....	30
Inversor Solar.....	31
Irradiación Solar .....	31
Brillo Solar.....	31

Marco Legal.....	32
Leyes y Decretos Principales.....	32
Ley 1715 de 2014. ....	33
Decreto 2143 de 2015.....	33
Decreto 1623 de 2015.....	33
Decreto 2469 de 2014.....	33
Decreto 2492 de 2014.....	33
Resoluciones Complementarias.....	33
Resolución UPME 0281 de 2015. ....	34
Resolución CREG 024 de 2015.....	34
Resolución Minambiente 1283 de 2016. ....	34
Normas Técnicas Aplicables.....	34
NTC 2050. ....	35
NTC 5549. ....	35
NTC 5710. ....	35
Entidades Reguladoras.....	35
Incentivos para la Adopción de Energía Solar.....	36
Requisitos Técnicos para la Instalación.....	36
Metodología .....	38
Desarrollo del Trabajo.....	39

Fase de Planeación .....	39
Ubicación y Características Geográficas del Proyecto.....	39
Consideraciones para la Instalación del Prototipo de Estación Fotovoltaica .....	41
Datos Necesarios para el Cálculo de Consumo Pico de Acuerdo con lo Establecido por el Artículo 220-37 del Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 .....	41
Orientación .....	43
Inclinación del Panel Solar .....	43
Sombreamiento .....	45
Ventilación .....	45
Información Meteorológica.....	45
Características Climatológicas y Radiación Solar.....	45
Irradiación Solar .....	46
Brillo Solar.....	49
Tecnologías de Paneles Fotovoltaicos .....	50
Requisitos del Diseño del Sistema .....	51
Determinación del Consumo Máximo en Viviendas de Estratos 1 y 2, Conforme a la Norma Técnica para el Cálculo y Diseño de Sistemas de Distribución Eléctrica de la ESSA .....	51
Especificaciones del Sistema Fotovoltaico Basados en el Análisis de Consumo en Hogares de Manrique Oriental para Cubrir el 100% .....	56
Cuadros de Cargas por Viviendas .....	57

Especificaciones del Prototipo de Estación Fotovoltaica Propuesto para las Viviendas	62
Cálculos Matemáticos.....	64
Energía que Puede Entregar el Panel Solar.....	64
Energía Máxima que se Puede Almacenar en la Batería. ....	65
Porcentaje de Cobertura Sobre el Consumo de la Vivienda 1 .....	65
Porcentaje de Cobertura Sobre el Consumo de la Vivienda 2 .....	66
Porcentaje de Cobertura Sobre el Consumo de la Vivienda 3 .....	67
Proyecciones para el Diseño del Prototipo de la Estación Fotovoltaica .....	68
Potencia del Panel Solar del Sistema.....	69
Irradiación Solar Sobre el Prototipo .....	71
Capacidad de Generación Energética y Porcentaje de Cobertura del Panel Solar .....	71
Selección del Inversor.....	71
Selección del Controlador de Carga .....	73
Selección de la Batería.....	74
Conexión del Sistema .....	76
Esquema de Conexión del Prototipo de Estación Fotovoltaica .....	76
Prototipo de Estación Fotovoltaica Ensamblado y Funcional .....	77
Análisis de Resultados .....	80
Análisis y Proyecciones de Ahorro de Energía Eléctrica en las Viviendas .....	80
Variación Costo (KW) .....	81

Pruebas en Campo .....	82
Pruebas de Consumo Eléctrico en la Vivienda 1 .....	82
Pruebas de Consumo Eléctrico en la Vivienda 2 .....	85
Pruebas de Consumo Eléctrico en la Vivienda 3 .....	88
Análisis del Comportamiento del Prototipo de Estación Fotovoltaica.....	90
Videos de Testimonios y Funcionamiento General del Prototipo de Estación Fotovoltaica	91
Conclusiones .....	93
Recomendaciones.....	95
Referencias Bibliográficas .....	96

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Características de los Paneles Policristalinos</i> .....	50
<b>Tabla 2</b> <i>Características de los Paneles Monocristalinos</i> .....	51
<b>Tabla 3</b> <i>Valores de Consumo por Horas para Viviendas de Estratos 1 Y 2</i> .....	55
<b>Tabla 4</b> <i>Información de Consumo por Horas en la Casa 1</i> .....	58
<b>Tabla 5</b> <i>Información de Consumo por Horas en la Casa 2</i> .....	59
<b>Tabla 6</b> <i>Información de Consumo por Horas en la Casa 3</i> .....	61
<b>Tabla 7</b> <i>Ficha Técnica del Panel Solar</i> .....	70
<b>Tabla 8</b> <i>Ficha Técnica del Inversor</i> .....	72
<b>Tabla 9</b> <i>Ficha Técnica del Controlador de Carga</i> .....	74
<b>Tabla 10</b> <i>Ficha Técnica de la Batería</i> .....	75
<b>Tabla 11</b> <i>Tabla de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 1</i> .....	83
<b>Tabla 12</b> <i>Tabla de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 2</i> .....	86
<b>Tabla 13</b> <i>Tabla de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 3</i> .....	89
<b>Tabla 14</b> <i>Recursos Audiovisuales de Testimonios Realizados en las Viviendas</i> .....	892

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Matriz de Generación de Energía Eléctrica.</i> .....	27
<b>Figura 2</b> <i>Vista Satelital de la Zona de las Pruebas del Proyecto.</i> .....	40
<b>Figura 3</b> <i>Factores de Demanda.</i> .....	42
<b>Figura 4</b> <i>Factores de Diversidad.</i> .....	43
<b>Figura 5</b> <i>Irradiación Solar en Colombia.</i> .....	46
<b>Figura 6</b> <i>Gráfica de Irradiación Solar Promedio Anual.</i> .....	47
<b>Figura 7</b> <i>Mapa de Irradiación Solar de Colombia y Datos de la Ciudad de Medellín.</i> .....	47
<b>Figura 8</b> <i>Potencial Eléctrico Fotovoltaico en Colombia.</i> .....	48
<b>Figura 9</b> <i>Gráfica de la Curva de Demanda Diaria.</i> .....	55
<b>Figura 10</b> <i>Fotografía del Panel Solar.</i> .....	69
<b>Figura 11</b> <i>Fotografía del Inversor.</i> .....	72
<b>Figura 12</b> <i>Fotografía del Controlador de Carga</i> .....	73
<b>Figura 13</b> <i>Fotografía de la Batería.</i> .....	75
<b>Figura 14</b> <i>Esquema de Conexión del Prototipo de Estación Fotovoltaica.</i> .....	77
<b>Figura 15</b> <i>Fotografías del Proceso de Construcción del Prototipo.</i> .....	78
<b>Figura 16</b> <i>Fotografías del Proceso de Pintura del Chasis del Prototipo.</i> .....	79
<b>Figura 17</b> <i>Fotografía del Prototipo de Estación Fotovoltaico Terminado.</i> .....	79
<b>Figura 18</b> <i>Fotografía del Sistema Fotovoltaico Operando.</i> .....	80
<b>Figura 19</b> <i>Gráfica de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 1</i> .....	84
<b>Figura 20</b> <i>Gráfica de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 2</i> .....	87
<b>Figura 21</b> <i>Gráfica de Pruebas en Campo</i> .....	90

<b>Figura 22</b> <i>Prueba de Funcionamiento de la Batería, Inversor y Medidor de Consumo Eléctrico.</i>	
.....	106
<b>Figura 23</b> <i>Inclinación del Panel Solar en Horas de la Mañana.</i>	106
<b>Figura 24</b> <i>Inclinación del Panel Solar en Horas de la Tarde.</i>	107
<b>Figura 25</b> <i>Inclinación del Panel Solar a Puesta de Sol.</i>	1077
<b>Figura 26</b> <i>Forma de la Onda de la Señal Senoidal Modificada.</i>	108
<b>Figura 27</b> <i>Medición de los Grados de Inclinación del Panel Solar Durante el Día.</i>	1088
<b>Figura 28</b> <i>Mediciones de las Diferentes Variables Electricas Tomadas en Campo.</i>	108

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A</b> <i>Registro Fotográfico</i> .....	106
---	-----

## Introducción

En Colombia, el consumo energético en los hogares se ha convertido en un tema central dentro de las discusiones sobre sostenibilidad y desarrollo económico. La creciente demanda de energía eléctrica, sumada a los efectos del cambio climático y a la necesidad de promover fuentes renovables, plantea el reto de implementar soluciones que reduzcan los costos y el impacto ambiental. En la actualidad, el acceso a fuentes de energías limpias y sostenibles hace parte de un desafío importante para las comunidades urbanas, en especial aquellas pertenecientes a los sectores vulnerables.

La ciudad de Medellín cuenta con condiciones climáticas favorables para la generación de sistemas solares fotovoltaicos, sin embargo, la adopción de estas tecnologías en el sector residencial aún es limitada. Esta situación representa no solo una oportunidad de ahorro económico, sino que también representa un aporte significativo en la reducción de la huella ambiental y a la diversificación de la matriz energética nacional. Frente a esto, el presente trabajo de grado propone el diseño e implementación de un prototipo de estación fotovoltaica portátil y de bajo costo, destinado a hogares de estratos 1 y 2 en el barrio Manrique Oriental de Medellín.

El proyecto integra componentes básicos de generación, almacenamiento y monitoreo de energía solar, con el fin de validar su eficiencia técnica y su relación costo-beneficio en un entorno real. Además, se articula con un análisis normativo que enmarca la generación distribuida en el país y con una revisión de antecedentes que permiten dimensionar la evolución y el potencial de estas tecnologías en el ámbito local y nacional.

A lo largo de este documento se presentan el marco teórico y legal que sustenta la propuesta, el proceso de diseño del prototipo, los resultados de las pruebas en campo y el análisis de su impacto en términos de ahorro y sostenibilidad. Por último, se plantean conclusiones y

recomendaciones orientadas a promover la implementación de soluciones fotovoltaicas en comunidades de bajos recursos, como un aporte a la transición energética y al compromiso ambiental del país.

## Planteamiento del Problema

La ciudad de Medellín presenta una evidente subutilización del potencial de generación de energía solar fotovoltaica. Esto ocurre a pesar de contar con condiciones climáticas favorables para su aprovechamiento. Vargas (2025) explica que, según el Mapeo Solar de Colombia realizado por OPS Colombia, Medellín tiene una radiación solar promedio diaria de aproximadamente 4.3 kWh/m<sup>2</sup>. Esta cifra supera el promedio de muchas ciudades europeas, donde el uso de esta fuente de energía renovable es considerablemente mayor.

A pesar de este potencial, el porcentaje de energía consumida en Medellín que proviene de fuentes solares sigue siendo muy bajo. De acuerdo con el portal especializado tutiempo.net (2025), la participación de la energía solar en la matriz energética de la ciudad apenas ronda el 1.6 %. Esto evidencia una mínima adopción de esta tecnología. La situación representa una oportunidad desde el punto de vista energético, económico y ambiental.

La baja implementación de sistemas solares en el sector residencial puede estar relacionada con varios factores. Entre ellos se encuentran el desconocimiento general sobre los beneficios de la energía solar, los costos iniciales de instalación y la falta de políticas públicas más agresivas en promoción e incentivos. La energía solar fotovoltaica no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. También ofrece una alternativa económica y sostenible que puede disminuir las facturas de electricidad en los hogares hasta en un 70 % (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021, p. 10).

La instalación de sistemas de energía solar en comunidades de estratos bajos y medios ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad económica de los hogares. Esto se logra al reducir los costos de electricidad y aumentar la autonomía energética. En Colombia, experiencias en Medellín y otras regiones del país muestran que, mediante comunidades

energéticas y proyectos de autogeneración, es posible disminuir el gasto mensual en servicios públicos. Además, se pueden generar ingresos mediante la venta de excedentes energéticos al sistema interconectado nacional (Monsalves, Gual, & De la Fuente, 2023).

En este contexto, las redes inteligentes surgen como una solución integral para optimizar la gestión del consumo energético en los hogares. Rodríguez et al. (2024, p. 6) señalan que estas redes permiten una supervisión y control más precisos del flujo de energía. Facilitan la integración de fuentes de generación distribuida y mejoran la calidad del suministro eléctrico. La implementación de tecnologías como medidores inteligentes y sistemas de monitoreo en tiempo real proporciona a los usuarios información detallada sobre su consumo. A su vez, habilita estrategias de eficiencia energética y reducción de costos. De esta manera, las redes inteligentes contribuyen significativamente a la sostenibilidad y resiliencia del sistema eléctrico.

Por lo tanto, para mitigar los altos costos de electricidad y avanzar hacia un modelo energético más sostenible, es urgente promover la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en sectores residenciales de Medellín. Esto debe acompañarse de una estrategia de sensibilización, financiamiento y modernización tecnológica. También debe incluir la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía y monitoreo digital. Estas acciones no solo mejorarían la eficiencia del consumo energético, sino que aumentarían la resiliencia frente a cortes o fallos en el sistema convencional (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2024, p. 3).

## Justificación

En la ciudad de Medellín se ha identificado un bajo aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Esto ocurre a pesar de contar con condiciones geográficas y climáticas ideales para su implementación. Colombia, en general, posee un alto potencial para la generación de energía solar gracias a su ubicación en la zona ecuatorial y a niveles de radiación promedio que oscilan entre 4.3 kWh/m<sup>2</sup>/día (Autosolar, 2021). No obstante, su adopción en el sector residencial aún es limitada.

Experiencias como la Comunidad Energética del barrio El Salvador en Medellín son todavía casos aislados. En este proyecto, apenas 24 familias inyectan energía solar a la red eléctrica nacional. Se toma como referencia esta comunidad porque en el sector también existen viviendas de estratos 1 y 2, similares a las estudiadas en la comuna 3 de Medellín, donde se realizó la implementación del prototipo de estación fotovoltaica (Empresas Públicas de Medellín [EPM], 2023).

Aunque han surgido iniciativas para fomentar el uso de energías limpias, estas aún no son suficientes para incidir significativamente en la toma de decisiones de los usuarios residenciales. El proyecto propuesto busca generar conciencia y educar a las comunidades sobre los beneficios de la energía solar. También pretende promover una transición hacia el uso de fuentes renovables. De acuerdo con Red A&M Ingeniería Eléctrica (2025), los sistemas fotovoltaicos pueden reducir los costos de electricidad hasta en un 70 %, dependiendo del perfil de consumo del hogar y del tamaño del sistema instalado.

Uno de los principales obstáculos para avanzar en la adopción de la energía solar es la falta de información precisa y accesible sobre el consumo energético en los hogares. Según Velásquez (2022), la mayoría de las familias no cuenta con herramientas que les permitan

monitorear y evaluar en tiempo real su consumo eléctrico. Esto impide una gestión eficiente de los recursos energéticos. La falta de visibilidad genera desperdicio de energía y, en consecuencia, un mayor gasto económico mensual.

Por ello, este proyecto propone el desarrollo e implementación de un sistema integral que combine paneles solares fotovoltaicos con tecnología de monitoreo y almacenamiento energético. Esta solución permitirá a las comunidades visualizar su consumo en tiempo real y tomar decisiones informadas sobre el uso de la energía. De esta forma, podrán reducir progresivamente su dependencia de la red eléctrica convencional. Además, se busca avanzar hacia la autonomía energética y mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias. También se pretende fomentar el desarrollo económico sostenible mediante la creación de empleos en el sector de las energías limpias.

El presente proyecto tiene como propósito orientar a las comunidades en la implementación de sistemas fotovoltaicos. Se busca fomentar el aprovechamiento de la energía solar para reducir la dependencia de fuentes tradicionales de electricidad y los altos costos que estas generan. El sistema incluirá un dispositivo de monitoreo para visualizar en tiempo real el consumo y el almacenamiento de energía. Con ello se pretende disminuir los costos eléctricos, mejorar la autonomía energética, fortalecer la capacidad de respuesta ante emergencias y promover el uso de energías renovables. Asimismo, se busca diversificar las fuentes energéticas y reducir la dependencia de recursos no renovables.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Construir un prototipo de estación solar fotovoltaica desmontable y de fácil transporte, mediante la implementación de panel solar, controlador de carga, sistema de almacenamiento de energía e inversor de uso comercial, verificando su eficiencia y relación costo beneficio en un entorno real de uso residencial.

### **Objetivos Específicos**

Establecer los requerimientos del sistema solar fotovoltaico de uso residencial, de acuerdo con la normativa vigente en Colombia y el consumo de energía en residencia tipo seleccionada.

Implementar un prototipo móvil de estación solar fotovoltaica, incorporando un sistema de generación, suministro, medición y almacenamiento de energía solar, para realizar validación del consumo y eficiencia en el suministro.

Validar la eficiencia del sistema solar implementado, mediante la instalación en horarios diferentes dentro de la residencia seleccionada y comparándola con el uso de energía eléctrica tradicional.

## Antecedentes

Según Factorenergía (2023), el aprovechamiento de la energía solar por parte de la humanidad se remonta a la antigüedad. En la antigua Grecia, alrededor del siglo V a. C, el ingeniero y astrónomo Anaxágoras propuso que una lente de vidrio enfocada sobre una superficie de madera podía incendiarla, siendo este uno de los primeros intentos documentados de utilizar la energía solar para producir calor.

De acuerdo con Endesa (2021), durante la Edad Media, Europa adoptó los molinos de viento para moler granos, estableciendo uno de los primeros modelos industriales de aprovechamiento de energía renovable.

Tal como afirma Iberdrola (n.d.), no fue sino hasta finales del siglo XVIII, en plena Revolución Industrial, cuando James Watt perfeccionó la máquina de vapor, marcando el inicio de una era de dependencia de combustibles fósiles como el carbón para la generación de energía mecánica y posteriormente eléctrica.

Como lo explica Iberdrola (n.d.), a mediados del siglo XIX, el carbón consolidó su papel como fuente primaria de energía. En 1859, Edwin Drake perforó el primer pozo de petróleo en Pensilvania, lo que inició la era de los combustibles fósiles líquidos, usados posteriormente en generadores eléctricos.

Según Iberdrola (n.d.), el interés por fuentes alternativas de energía se intensificó durante el siglo XX, especialmente tras la crisis del petróleo de 1973, que evidenció la dependencia de los países industrializados del crudo y provocó una búsqueda activa de soluciones energéticas sostenibles. En este contexto, la energía solar fotovoltaica recobró protagonismo. Sin embargo, sus fundamentos científicos se remontan al siglo XIX, cuando en 1839 el físico francés

Alexandre Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico al observar que ciertos materiales generaban corriente eléctrica al ser expuestos a la luz solar.

Según hogarsense (n.d.), en 1873 el físico Willoughby Smith descubrió la fotoconductividad en el selenio, lo cual abrió el camino hacia la investigación de materiales semiconductores para aplicaciones fotovoltaicas. Posteriormente, Endesa (2021) señala que en 1883 Charles Fritts fabricó la primera celda solar de selenio, aunque con una eficiencia muy baja.

De acuerdo con Energía solar (n.d.), en 1940 el científico Russell Ohl desarrolló la primera célula solar de silicio, convirtiéndose en el precursor directo de las celdas modernas. Más adelante, en 1954, los laboratorios Bell crearon la primera celda solar de silicio monocristalino con una eficiencia significativamente mejorada, marcando el nacimiento de la tecnología fotovoltaica comercial. Esta innovación permitió posteriormente la integración de paneles solares en aplicaciones espaciales, como los satélites Vanguard 1 y Vanguard 2, lanzados en 1958 y aún en funcionamiento parcial.

### **Antecedentes de la Energía Solar Fotovoltaica**

Como señala LGCY Power (2021), el efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el físico francés Alexandre Edmond Becquerel, quien, a los 19 años, observó que, al iluminar electrodos de platino recubiertos con cloruro o bromuro de plata sumergidos en una solución conductora, se generaba una corriente eléctrica. Este fenómeno sentó las bases para el desarrollo de las celdas solares modernas.

Tal como afirman Honsberg y Bowden (n.d.), en 1873 el ingeniero eléctrico Willoughby Smith descubrió la fotoconductividad del selenio al notar que su resistencia eléctrica disminuía

significativamente cuando era expuesto a la luz. Este hallazgo fue clave para el avance de dispositivos fotoeléctricos y la evolución de la tecnología fotovoltaica.

Según Un poco de ciencia, por favor (2022), en 1940 el ingeniero estadounidense Russell Shoemaker Ohl, trabajando en los Laboratorios Bell, descubrió el efecto fotovoltaico en una unión p-n de silicio, observando que ciertas impurezas en el material aumentaban su sensibilidad a la luz solar. Este hallazgo fue fundamental para el desarrollo de las primeras celdas solares de silicio y sentó las bases de la tecnología fotovoltaica moderna. Años más tarde, Criollo Enríquez et al. (2024) explican que en 1954 los científicos Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson, también en los Laboratorios Bell, fabricaron la primera célula solar de silicio monocristalino práctica, que alcanzó una eficiencia del 6 % en la conversión de luz solar en electricidad.

Como lo explica 1library (n.d.), en 1970 el físico soviético Zhorés Alfiórov y su equipo desarrollaron la primera célula solar con heteroestructura de arseniuro de galio (GaAs) altamente eficiente. Este avance marcó un hito en la tecnología fotovoltaica, especialmente para aplicaciones espaciales, debido a la alta eficiencia y durabilidad de este material en condiciones extremas.

En la última década, la eficiencia de los paneles solares ha experimentado un notable avance, pasando de un promedio del 15 % a casi el 20 % en la conversión de luz solar en energía utilizable. García Fernández (2024) señala que los modelos más avanzados, diseñados con tecnología de punta, pueden incluso alcanzar cifras impresionantes de hasta el 23 %. Además, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020) informó que los costos de la energía solar fotovoltaica han registrado un descenso del 82 % desde el año 2010.

En Colombia, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) es el encargado de monitorear los niveles de radiación solar en el país y ha desarrollado el Atlas de Radiación Solar de Colombia (IDEAM, 2017).

Conforme a lo establecido por la Agencia Internacional de Energía [IEA] (2019), a nivel global aproximadamente el 81 % de la energía consumida proviene de fuentes fósiles como petróleo, carbón y gas natural, que en 2018 sumaron cerca de 13,600 millones de toneladas equivalentes de petróleo. Las fuentes renovables representan solo el 19 % restante, incluyendo energía hidroeléctrica, solar y eólica, lo que resalta la necesidad de diversificar las matrices energéticas para reducir la dependencia de combustibles fósiles. En el caso de Colombia, la Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] (2017) informa que el 68 % de la generación eléctrica es hidroeléctrica, mientras que solo el 2 % corresponde a energías renovables no convencionales.

### **Situación de la Energía Fotovoltaica en Colombia**

La matriz de generación eléctrica en Colombia, ilustrada en la figura 1, ha estado históricamente dominada por fuentes renovables, en especial la hidroeléctrica. Entre 2018 y 2021, más del 70 % de la electricidad generada provino de estas fuentes, siendo la hidráulica la principal, con un 82,17 % en 2018 (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2017). No obstante, esta fuerte dependencia de los embalses hidroeléctricos implica vulnerabilidades, como los efectos del fenómeno de El Niño, que puede reducir los niveles de agua y afectar la generación energética (UPME, 2017).

**Figura 1***Matriz de Generación de Energía Eléctrica*

Participación en la matriz de generación eléctrica del SIN <sup>2</sup> por tipo de fuente de energía				
Fuente	2018	2019	2020	2021
No renovable	16,70 %	21,08 %	26,77 %	16,60 %
Renovable	83,30 %	78,92 %	73,23 %	83,42 %
Biomasa	1,06 %	1 %	1,04 %	1,07 %
Eólica	0,06 %	0,09 %	0,01 %	0,08 %
Hidráulica	82,17 %	77,64 %	71,89 %	81,82 %
Solar	0,02 %	0,19 %	0,28 %	0,44 %
Datos clave				
<b>258,66 MW</b>	Total de MW solares fotovoltaicos en operación en el SIN a septiembre de 2022			
<b>725 MW</b>	Capacidad instalada procedente de FNCER a mayo de 2022	Equivale a 25 veces lo que tenía Colombia en 2018 (28 MW)		
<b>6</b>	Nuevos proyectos fotovoltaicos en operación en septiembre de 2022	Suponen 86 nuevos MW al SIN Un 50 % más de lo que estaba conectado		

*Nota.* Energía solar en Colombia. Tomado de. Instituto Español de Comercio Exterior [ICEX], (2022).

<https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/020/documentos/2022/12/anexos/Ficha%20Sector%20Solar%202022.docx>

De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), en 2015 la capacidad instalada en Colombia alcanzaba los 15 GW, de los cuales 10 GW correspondían a centrales hidroeléctricas, lo que reafirma la predominancia de esta fuente en la matriz energética nacional (UPME, 2015). Esta situación evidencia la necesidad de diversificar las fuentes de generación, incorporando alternativas como la solar y la eólica. Asimismo, el informe de gestión de la UPME (2018) indica que para ese año la capacidad instalada de fuentes renovables no convencionales había llegado a 4.349 MW (p. 1).

En cuanto a la energía solar, aunque su participación en la matriz energética nacional seguía siendo baja (0,44 % en 2021, según la figura 1), se evidencian avances notables. Para septiembre de 2022, Colombia registraba 258,66 MW de capacidad solar fotovoltaica en operación dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN), a los que se sumaron seis nuevos proyectos que aportaron 86 MW adicionales (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2022). Entre ellos destaca la planta solar de El Paso (Cesar), compuesta por aproximadamente 250 000 paneles y con una capacidad de generación anual de 176 GWh (Revista Ecoguía, 2019).

La lenta adopción inicial de las tecnologías de generación solar y de los programas de eficiencia energética en Colombia se debió, en parte, al desinterés tanto de la ciudadanía como del sector industrial. Este panorama comenzó a cambiar con la promulgación de la Ley 697 de 2001, que fomentó el uso racional y eficiente de la energía y promovió las fuentes alternativas (Congreso de Colombia, 2001). Posteriormente, la Ley 1715 de 2014 reguló la integración de fuentes renovables no convencionales al sistema energético nacional, ofreciendo incentivos tributarios y deducciones fiscales para quienes implementaran sistemas de generación renovable (Congreso de Colombia, 2015).

Además, mediante la Resolución 030 de 2018 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se establecieron criterios para que los generadores autónomos pudieran vender a la red los excedentes de energía producida, lo que impulsó una mayor rentabilidad y eficiencia en la inversión en energías renovables (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2018, pp. 5–7).

## **Marco de Referencia**

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que convierte la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de celdas fotovoltaicas, constituyendo una alternativa renovable y sostenible frente a las fuentes más convencionales de energía. Su aprovechamiento se basa en los principios físicos como el efecto fotovoltaico y en el desarrollo de materiales semiconductores que permiten optimizar la generación de electricidad a partir de la luz solar. En base a esto se presenta un prototipo de estación fotovoltaica portátil como un ejemplo práctico para la aplicación de estos conceptos, evidenciando su relevancia en la transición hacia los sistemas energéticos más sostenibles y eficientes.

### **Marco Teórico**

Aquí se exponen los fundamentos científicos y técnicos que sustentan el desarrollo del prototipo de estación fotovoltaica. Se revisan los conceptos esenciales relacionados con la energía solar, los sistemas fotovoltaicos y su aplicación en contextos residenciales. Este marco proporciona el soporte necesario para comprender la viabilidad técnica del sistema propuesto, y orienta la interpretación de los resultados obtenidos en la fase experimental del proyecto.

### ***Sistema Solar Fotovoltaico***

Es un conjunto de componentes que permite convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante paneles solares. Estos sistemas incluyen, además de los paneles, inversores que transforman la corriente continua en alterna, estructuras de soporte, dispositivos de almacenamiento y herramientas de monitoreo. Pueden funcionar de manera autónoma (off-grid) o conectados a la red eléctrica (on-grid), y su implementación contribuye a reducir las emisiones contaminantes y a aprovechar una fuente de energía renovable e inagotable (Enel X, n.d.).

### ***Efecto Fotovoltaico***

Es el fenómeno físico mediante el cual ciertos materiales, como el silicio, generan corriente eléctrica al ser expuestos a la luz solar. Este proceso ocurre cuando los fotones inciden sobre las celdas fotovoltaicas, excitando los electrones y creando una diferencia de potencial que produce electricidad. Este fenómeno constituye la base del funcionamiento de los paneles solares y fue observado por primera vez por Alexandre Edmond Becquerel en 1839 (Repsol, 2023).

### ***Captación de Energía***

Se refiere al proceso mediante el cual se recolecta y aprovecha una fuente de energía disponible en el entorno para su conversión y uso en diversas aplicaciones. En el caso de la energía solar, esta captación se realiza mediante paneles fotovoltaicos o colectores solares, que absorben la radiación solar y la transforman en electricidad o calor. Este proceso es esencial en los sistemas de generación renovable, ya que permite utilizar los recursos naturales de forma eficiente y sostenible (Addmon Energsoir, 2020).

### ***Radiación Solar***

Es la energía que emite el sol en forma de ondas electromagnéticas, incluyendo luz visible, ultravioleta e infrarroja. Esta energía es esencial para la vida en la Tierra y se aprovecha en tecnologías como la energía fotovoltaica. Además, la intensidad de la radiación solar varía según factores como la latitud, la hora del día, las condiciones climáticas y la estación del año (Iberdrola, n.d.).

### ***Panel Solar***

Es un dispositivo diseñado para convertir la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Está formado por múltiples celdas de silicio interconectadas que, al recibir la luz del sol, generan una corriente eléctrica. Esta energía puede usarse directamente o

almacenarse en un banco de baterías para su consumo posterior, lo que convierte a los paneles solares en una solución clave para la generación y el monitoreo energético, especialmente en proyectos de sostenibilidad y optimización del consumo eléctrico (Celsia, 2018).

### ***Inversor Solar***

Es un componente esencial de los sistemas fotovoltaicos, responsable de convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), que es la forma de electricidad utilizada en hogares, industrias y redes eléctricas. Existen distintos tipos de inversores, como los conectados a la red (on-grid), los autónomos (off-grid) y los híbridos. Además, muchos modelos modernos incorporan tecnologías de monitoreo, optimización del consumo energético y protección contra variaciones de voltaje, lo que garantiza un suministro de energía renovable eficiente y seguro (González, 2023).

### ***Irradiación Solar***

También conocida como Irradiación Global Horizontal (GHI), es la suma de la radiación directa del sol y la radiación difusa proveniente del cielo, medida sobre una superficie horizontal a nivel del suelo. Este parámetro es fundamental para el diseño de sistemas fotovoltaicos, ya que permite cuantificar la energía solar disponible en una ubicación específica. En Colombia, el IDEAM, a través de su Atlas de Radiación Solar y de estaciones meteorológicas distribuidas por todo el territorio, proporciona datos confiables y actualizados sobre la irradiación solar, disponibles en formatos diarios, mensuales y anuales, lo que respalda el dimensionamiento de proyectos de energía solar basados en evidencia técnica (IDEAM, 2025).

### ***Brillo Solar***

Se define como el tiempo efectivo durante el cual la luz solar directa incide sobre un punto específico de la superficie terrestre sin interferencias significativas de nubosidad o

sombras. Este parámetro es fundamental para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, ya que influye directamente en la cantidad de energía que pueden generar los paneles solares (IDEAM, 2025).

### **Marco Legal**

Este apartado recopila las disposiciones normativas y políticas públicas que regulan el desarrollo y la implementación de sistemas de energías renovables en Colombia, con especial énfasis en la energía solar fotovoltaica. Se analizan las leyes, decretos y resoluciones que promueven el uso eficiente y seguro de la energía, los incentivos para la adopción de tecnologías limpias y las directrices relacionadas con la sostenibilidad ambiental. Dicho marco normativo constituye la base jurídica que respalda la pertinencia y la viabilidad del prototipo de estación fotovoltaica propuesto en este trabajo.

#### ***Leyes y Decretos Principales***

En esta sección se presentan las principales leyes y decretos que regulan y fomentan el uso de energías renovables en Colombia, en particular la energía solar fotovoltaica. Estas disposiciones establecen los lineamientos para la integración de fuentes no convencionales en la matriz energética nacional, promueven incentivos económicos y tributarios para su adopción, y garantizan un marco jurídico que respalde la sostenibilidad de proyectos como el prototipo de estación fotovoltaica desarrollado en este trabajo.

**Ley 1715 de 2014.** Expedida por el Congreso de la República, regula la integración de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) al sistema energético nacional. Esta norma fundamental para el sector establece los incentivos tributarios, promueve la eficiencia energética y define las disposiciones para la conexión a la red (Congreso de Colombia, 2014).

**Decreto 2143 de 2015.** Reglamenta la Ley 1715 y establece los lineamientos para aplicar incentivos fiscales, tales como la deducción de renta, la exclusión del IVA y la exención de aranceles (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

**Decreto 1623 de 2015.** Modifica el Decreto 1073 del mismo año e incorpora lineamientos para ampliar la cobertura energética en las zonas no interconectadas (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

**Decreto 2469 de 2014.** Establece los lineamientos para la entrega de excedentes de autogeneración de energía eléctrica (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

**Decreto 2492 de 2014.** Regula la implementación de los mecanismos de respuesta de la demanda energética (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

### ***Resoluciones Complementarias***

En este apartado se recopilan las resoluciones emitidas por entidades reguladoras y ministeriales que complementan el marco normativo de las energías renovables en Colombia. Estas disposiciones establecen criterios técnicos, operativos y administrativos para la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red, la gestión de incentivos, así como la aplicación de programas de eficiencia energética. Su inclusión permite comprender las condiciones específicas bajo las cuales debe desarrollarse e implementarse el prototipo de estación fotovoltaica planteado en este trabajo.

**Resolución UPME 0281 de 2015.** Define el límite máximo de potencia para la autogestión a pequeña escala, permitiendo realizar una clasificación clara de los proyectos solares domésticos (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2015).

**Resolución CREG 024 de 2015.** Regula la autogeneración a gran escala dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN), estableciendo las condiciones técnicas y comerciales (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2015).

**Resolución Minambiente 1283 de 2016.** Establece el procedimiento para la obtención del certificado de beneficio ambiental necesario para acceder a los incentivos tributarios establecidos en los artículos 11 a 14 de la Ley 1715 de 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

### ***Normas Técnicas Aplicables***

Aquí se abordan las normas técnicas nacionales que regulan el diseño, instalación, operación y seguridad de los sistemas solares fotovoltaicos. Estas normas establecen los parámetros de calidad, eficiencia y confiabilidad que deben cumplir los equipos y procedimientos asociados a la generación y uso de energía solar. Su aplicación asegura que el prototipo de estación fotovoltaica desarrollado en este trabajo cumpla con los estándares requeridos, garantizando tanto la seguridad de los usuarios como la sostenibilidad técnica del sistema.

**NTC 2050.** Es la norma técnica colombiana que regula la seguridad de las instalaciones eléctricas, incluyendo los sistemas fotovoltaicos. Establece protecciones contra sobrecargas, la correcta instalación de inversores y los requisitos de conexión a la red (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).

**NTC 5549.** Brinda una guía general sobre los sistemas fotovoltaicos terrestres generadores de potencia y los elementos que los conforman (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2007).

**NTC 5710.** Establece los métodos de protección contra sobretensiones en los sistemas fotovoltaicos, garantizando su durabilidad y la seguridad operativa (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2010).

La transición hacia las fuentes de energía más limpias y sostenibles ha llevado a Colombia a promover el uso de tecnologías renovables como la energía solar. En este contexto, el marco normativo juega un papel fundamental para facilitar la adopción y regulación de estas tecnologías, garantizando su correcta integración en el sistema energético nacional.

La Ley 1715 de 2014 constituye la base legal principal para el desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), incluyendo la energía solar fotovoltaica. Esta ley tiene como objetivo principal incentivar la diversificación de la matriz energética del país, reduciendo la dependencia hacia los combustibles fósiles y promoviendo el desarrollo sostenible.

### ***Entidades Reguladoras***

La implementación de esta legislación está a cargo de entidades como la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), la cual es responsable de la planificación energética y de establecer las políticas para la incorporación de energías renovables, la Comisión de Regulación

de Energía y Gas (CREG) es la encargada de definir las condiciones técnicas y comerciales para la integración de estas fuentes al sistema interconectado nacional.

### ***Incentivos para la Adopción de Energía Solar***

La Ley 1715 establece una serie de beneficios tributarios y comerciales que favorecen la inversión en los sistemas de generación solar, tales como:

La exención del Impuesto al Valor Agregado (IVA) para la compra de equipos y componentes solares.

La deducción del 50% del valor de la inversión en el impuesto de renta durante un período de cinco años.

Facilidades de conexión a la red eléctrica nacional para los proyectos fotovoltaicos.

Estos incentivos han contribuido de manera significativa al incremento de proyectos solares, tanto a pequeña como a gran escala, en Colombia (Congreso de Colombia, 2014).

### ***Requisitos Técnicos para la Instalación***

Además del cumplimiento del marco legal vigente, las instalaciones de los sistemas solares fotovoltaicos deben ajustarse a los requisitos técnicos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2050, la cual regula la seguridad y la calidad de las instalaciones eléctricas en Colombia (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).

Esta norma contempla criterios fundamentales para asegurar que la instalación sea segura, eficiente y confiable, abarcando aspectos como:

- Protección contra sobrecargas eléctricas y cortocircuitos: Se requiere el uso de dispositivos de protección, como interruptores termomagnéticos y fusibles apropiados, para prevenir daños en el sistema (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).

- Instalación adecuada de inversores y controladores de carga: Los equipos deben ser correctamente dimensionados y conectados conforme a las especificaciones técnicas y de seguridad establecidas en la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).
- Condiciones técnicas de conexión a la red pública: Los sistemas interconectados deben cumplir con los requisitos de sincronización, anti-isla y calidad de energía, a fin de garantizar su correcta operación con la red de distribución (Ministerio de Minas y Energía, 2013).
- Puesta a tierra y protección contra descargas eléctricas: La instalación debe contar con sistemas de puesta a tierra efectivos y, en muchos casos, con protecciones contra sobretensiones (SPD) para mitigar el riesgo de daños por descargas atmosféricas o transitorios eléctricos (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).
- Selección y tipo de cableado: El cableado debe ser dimensionado considerando la corriente máxima, las condiciones de instalación y las caídas de tensión permitidas, empleando cables certificados para ambientes solares (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).
- Señalización y etiquetado: Es obligatorio señalar todos los componentes del sistema, a fin de garantizar un mantenimiento seguro y el cumplimiento de las inspecciones técnicas (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998).

El cumplimiento de la Norma NTC 2050 y del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) es indispensable para asegurar la eficiencia, confiabilidad, vida útil y seguridad de las instalaciones solares fotovoltaicas en Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

## Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto corresponde a una investigación aplicada de enfoque mixto, dado que combina elementos cuantitativos (medición de variables técnicas, rendimiento energético y consumo eléctrico) y cualitativos (observación del comportamiento de los usuarios frente al uso del prototipo).

Según Hernández, Fernández y Baptista (2022), la investigación aplicada busca generar conocimiento orientado a resolver problemas prácticos, mientras que el enfoque mixto permite integrar datos numéricos y percepciones de los usuarios para obtener conclusiones más completas.

El diseño metodológico se estructuró en tres fases:

Planeación: recopilación de información teórica, normativa y técnica sobre energía solar y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

Diseño e implementación: selección de componentes, construcción y ensamblaje del prototipo, siguiendo los lineamientos del Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050).

Validación y análisis: instalación del sistema en viviendas reales, registro de datos de consumo y comparación del ahorro energético obtenido frente al consumo convencional.

Esta metodología permitió evaluar la viabilidad técnica, económica y social del prototipo de estación fotovoltaica, garantizando la coherencia entre los objetivos y los resultados obtenidos.

## **Desarrollo del Trabajo**

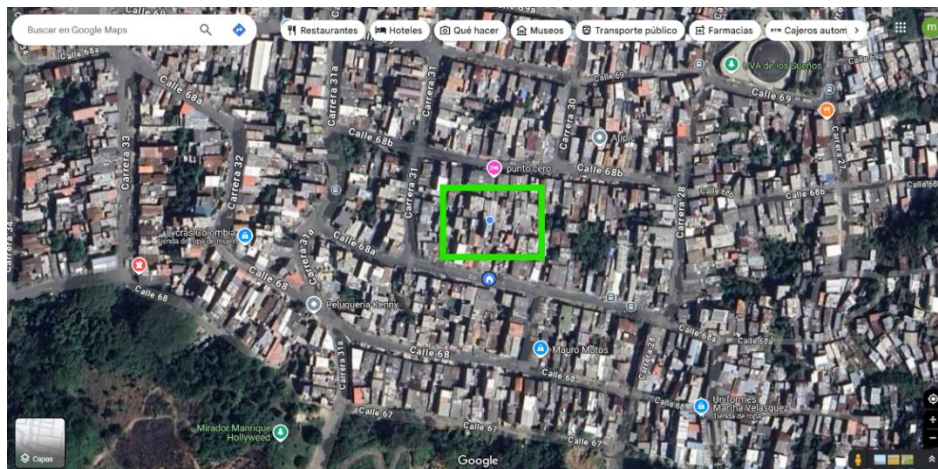
En este apartado se presenta de manera detallada el proceso seguido para la ejecución del proyecto, desde la etapa de planeación hasta la implementación y validación del prototipo. Se describen las fases de diseño, la selección de componentes, la construcción del sistema fotovoltaico y las pruebas realizadas en condiciones reales de operación. Este desarrollo metodológico permite evidenciar la coherencia entre los objetivos planteados y los resultados obtenidos, garantizando la rigurosidad técnica y científica del trabajo.

### **Fase de Planeación**

En el análisis y caracterización del consumo de energía eléctrica en viviendas representativas de estratos 1 y 2 de la comuna 3 de Medellín constituye un paso fundamental para comprender los patrones de uso y la demanda energética local. Esta información permite establecer criterios técnicos que facilitan el diseño e implementación del prototipo de estación fotovoltaica el cual, según los cálculos realizados, permite cubrir únicamente un porcentaje del consumo total de la vivienda debido a que el proyecto es autofinanciado, de esta manera, el prototipo busca optimizar la energía suministrada para atender una fracción del consumo que resulte estratégica y prioritaria para el usuario.

### **Ubicación y Características Geográficas del Proyecto**

Como se muestra en la figura 2 el punto demarcado dentro del recuadro verde corresponde a la imagen satelital del sitio donde se realizó la implementación y las pruebas del prototipo de estación fotovoltaica. A continuación, se muestra la información georreferencial.

**Figura 10***Vista Satelital de la Zona de las Pruebas del Proyecto*

*Nota.* Lugar geográfico de realización del proyecto. Tomada de Google Maps (n.d.).

<https://maps.app.goo.gl/EjYvQfWcQTDVfyCA>

El prototipo de estación fotovoltaica fue implementado en la ciudad de Medellín, específicamente en la siguiente dirección: Calle 68A #30-38, interior 308, ubicada en la comuna 3, barrio Manrique Oriental. Las coordenadas geográficas aproximadas para el sitio son:

Latitud: 6.275° N

Longitud: -75.559° O

Altitud: ~1.500 metros sobre el nivel del mar.

Medellín se encuentra en el Valle de Aburrá, una región montañosa de los Andes colombianos, lo que influye en su topografía y condiciones climáticas, la zona presenta una combinación de áreas urbanas densas y espacios verdes, con una topografía que varía entre planos y pendientes suaves.

## Consideraciones para la Instalación del Prototipo de Estación Fotovoltaica

La instalación del prototipo de estación fotovoltaica debe contemplar tanto los lineamientos del Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 para el cálculo de la demanda máxima como las condiciones técnicas y ambientales del lugar de implementación. Aspectos como la correcta orientación y el ángulo de inclinación de los paneles, la reducción del sombreado y una adecuada ventilación son esenciales para maximizar la captación solar, optimizar el rendimiento del sistema y garantizar su durabilidad en el tiempo.

### Datos Necesarios para el Cálculo de Consumo Pico de Acuerdo con lo Establecido por el Artículo 220-37 del Código Eléctrico Colombiano NTC 2050

Para el cálculo de la demanda máxima total instalada por usuario, se debe considerar la carga correspondiente al alumbrado general, la carga mínima de la lavadora y la plancha, así como la carga mínima de uno o más circuitos de pequeños aparatos. Con base en esto, la fórmula general para calcular la demanda máxima total está determinada por la siguiente expresión matemática (Electrificadora de Santander, n.d.):

$$\text{Demanda máxima total: } D_{max} = \frac{S_R}{F_{div\_res}} + S_{ACR} + \frac{S_C}{F_{div\_com}} + S_{ACC}$$

**Donde:**

$S_R$  Carga demandada del sector residencial.

$$S_R = [S_M + (S_I - S_M) * F_d] * N$$

$S_M$  Carga del aparato de mayor potencia.

$S_I$  Carga mínima instalada por usuario.

$S_{ACR}$  Carga de las áreas comunes en el sector residencial.

$N$  Número de usuarios.

$F_d$  Factor de demanda (figura 3).

$F_{div\_res}$  Factor de diversidad del sector residencial (figura 4).

$S_C$  Carga demandada del sector comercial.

$S_{ACC}$  Carga de las áreas comunes del sector comercial.

$F_{div\_com}$  Factor de diversidad del sector comercial (figura 4)

## Figura 19

### Factores de Demanda

Descripción	Carga (VA)	Factor de demanda (%)
<b>Residencial</b>		
Estratos 1 y 2	Carga aparato mayor potencia Resto	100 50
Estratos 3 y 4	Carga aparato mayor potencia Resto	100 40
Estratos 5 y 6	Carga aparato mayor potencia Resto	100 30
Carga áreas comunes	Motores Resto	100 60
<b>Comercial</b>		
Tomas comunes	Primeros 5000 Sobre 5000	100 50
Alumbrado	Primeros 50000 Sobre 50000	100 50
Cargas especiales y áreas comunes	Total	100
<b>Industrial</b>	Según proyecto particular	

*Nota.* Especificación de valores para aplicar en la formulación. Tomado de. Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Norma Técnica ESSA (n.d.).

<https://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Norma%20tecnica/Norma%20T%C3%A9cnica%20ESSA.pdf>

**Figura 28***Factores de Diversidad*

SECTOR	FACTOR DE DIVERSIDAD
ESTRATOS 1, 2, 3 y 4	$F_{div\_res} = \frac{1}{0,2 + 0,8 * e^{\left(\frac{1-N}{6}\right)}}$
ESTRATOS 5 y 6	$F_{div\_res} = \frac{1}{0,3 + 0,7 * e^{\left(\frac{1-N}{6}\right)}}$
COMERCIAL USUARIOS MONOFÁSICOS BIFILARES	$F_{div\_com} = \frac{1}{0,2 + 0,8 * e^{\left(\frac{1-N}{4,5}\right)}}$
COMERCIAL USUARIOS TRIFILARES Y TETRAFILARES	$F_{div\_com} = \frac{1}{0,3 + 0,7 * e^{\left(\frac{1-N}{4,5}\right)}}$

*Nota.* Especificación de valores para la formula. Tomado de. Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Norma Técnica ESSA (n.d).

<https://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Norma%20tecnica/Norma%20T%C3%A9cnica%20ESSA.pdf>

Para maximizar la eficiencia del sistema fotovoltaico en esta ubicación, se deben considerar los siguientes aspectos técnicos fundamentales:

***Orientación***

El panel solar debe orientarse hacia el norte geográfico para optimizar la captación solar.

En el hemisferio norte, el sol se encuentra principalmente al sur; mientras que, en el hemisferio sur, como en Colombia, la orientación correcta es hacia el norte (Castañeda, 2017).

***Inclinación del Panel Solar***

Para garantizar un óptimo aprovechamiento de la radiación solar, es indispensable determinar la inclinación adecuada de los paneles fotovoltaicos.

Esta inclinación permite maximizar la captación de energía solar directa y mejorar la conversión eficiente en energía eléctrica.

La inclinación óptima se calcula con base en la latitud geográfica del lugar de instalación.

En este caso, el proyecto se desarrolla en el barrio Manrique Oriental, comuna 3 de Medellín, ubicado aproximadamente en las siguientes coordenadas:

Latitud: **6.275° N**

Longitud: **-75.559° O**

Según la teoría básica de los sistemas solares, en zonas cercanas al Ecuador como Medellín la radiación solar incide de forma casi perpendicular durante todo el año.

Esto sugiere que la inclinación mínima teórica podría aproximarse a 0°.

No obstante, la literatura especializada y la experiencia en campo recomiendan mantener una inclinación entre 10° y 35° para:

Favorecer el escurrimiento del agua y el polvo sobre la superficie de los paneles;

Prevenir la acumulación de material particulado que reduce el rendimiento del sistema;

Asegurar una función de autolimpieza pasiva, especialmente en zonas urbanas con alta contaminación y exposición al polvo.

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando tanto los aspectos técnicos como las condiciones ambientales del sector, en este proyecto se adopta una inclinación fija de 30° para los paneles fotovoltaicos.

Esta configuración ofrece un equilibrio entre eficiencia energética, mantenimiento mínimo y adaptabilidad estructural para techos inclinados o planos de las viviendas típicas del sector.

### ***Sombreamiento***

Es fundamental minimizar las sombras generadas por edificaciones, árboles o estructuras cercanas, especialmente durante las horas pico de radiación solar (de 10:00 a 15:00).

Incluso las sombras parciales pueden reducir significativamente la producción de energía debido al efecto de punto caliente en los paneles solares (Fraunhofer ISE, 2020).

### ***Ventilación***

Se debe asegurar una adecuada circulación de aire alrededor de los paneles para evitar su sobrecalentamiento.

El aumento de temperatura en los módulos fotovoltaicos reduce su eficiencia de conversión energética (IEA, 2020).

### **Información Meteorológica**

La comprensión de las condiciones climáticas, niveles de radiación e irradiación solar y horas efectivas de brillo solar en la ciudad de Medellín son esenciales para dimensionar con precisión un sistema solar fotovoltaico. Estos factores determinan la capacidad real de generación y orientan la elección de las tecnologías de paneles más adecuadas, asegurando un desempeño eficiente y sostenible del proyecto.

### **Características Climatológicas y Radiación Solar**

Medellín posee un clima tropical monzónico, caracterizado por tener temperaturas estables a lo largo del año, con un promedio anual de aproximadamente 22 °C. La ciudad experimenta dos temporadas de lluvias al año, de abril a mayo y de septiembre a noviembre, y dos temporadas secas, de diciembre a marzo y de junio a agosto.

En cuanto a la radiación solar, Medellín recibe un promedio diario de aproximadamente 4,3 kWh/m<sup>2</sup>, lo que la sitúa por encima del promedio mundial de 3,9 kWh/m<sup>2</sup>. Esta cantidad de

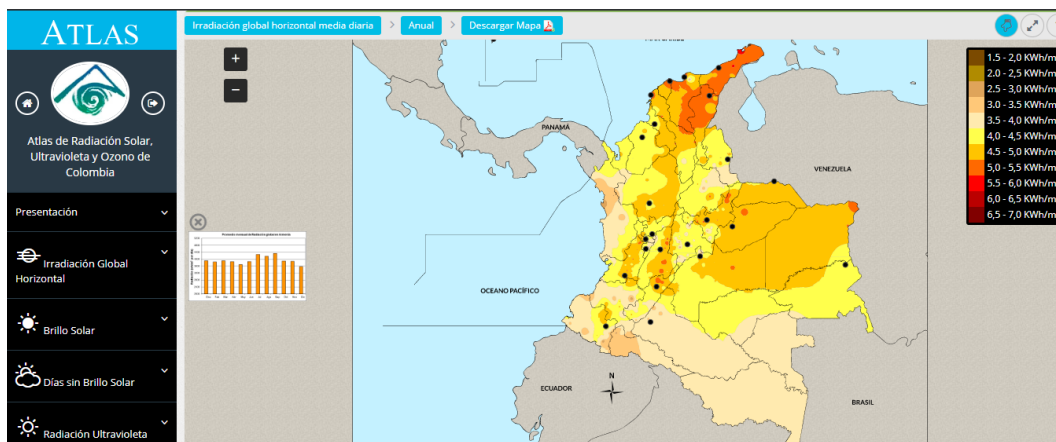
radiación es adecuada para la implementación de sistemas fotovoltaicos, aunque las variaciones estacionales y la nubosidad pueden llegar a afectar el rendimiento en ciertos periodos del año.

### ***Irradiación Solar***

Conforme a lo establecido por el Atlas de Radiación Solar de Colombia del IDEAM (2017), la ciudad de Medellín presenta una irradiación global horizontal promedio anual de aproximadamente 4,3 kWh/m<sup>2</sup>/día. Este valor varía mensualmente, alcanzando su punto más bajo en los meses de mayor nubosidad, como abril y octubre, y su punto más alto en los meses más secos, como enero y diciembre.

### **Figura 37**

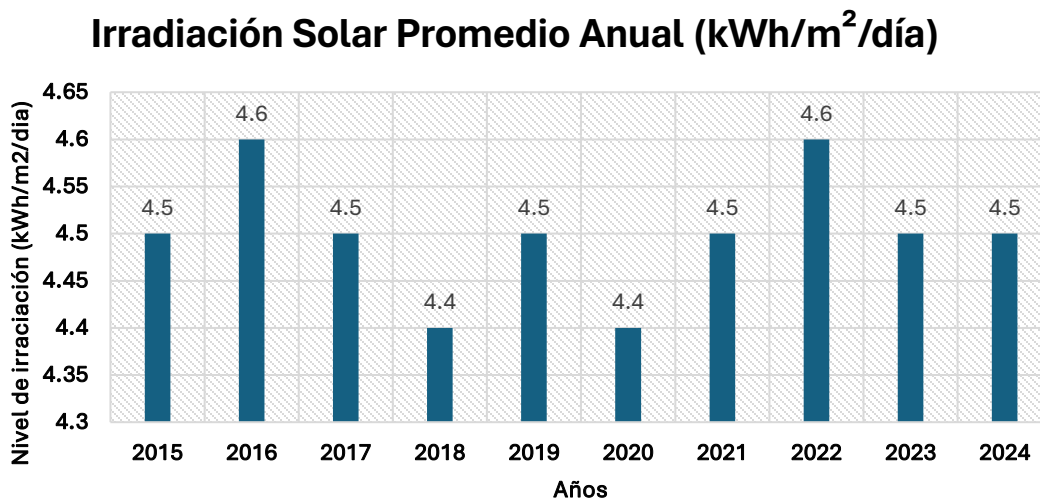
#### *Irradiación Solar en Colombia*



*Nota.* Mapa de irradiación solar completo. Tomado de. Atlas de Radiación Solar de Colombia – [IDEAM], (2017). [www.ideam.gov.co/sites/default/files/temas/tiempo-y-clima/documentos/atlas/ATLAS%2BRADIACION%2BSOLAR%2BUV%2BY%2BOZONO%2BDE%2BCOLOMBIA.pdf](http://www.ideam.gov.co/sites/default/files/temas/tiempo-y-clima/documentos/atlas/ATLAS%2BRADIACION%2BSOLAR%2BUV%2BY%2BOZONO%2BDE%2BCOLOMBIA.pdf)

Figura 46

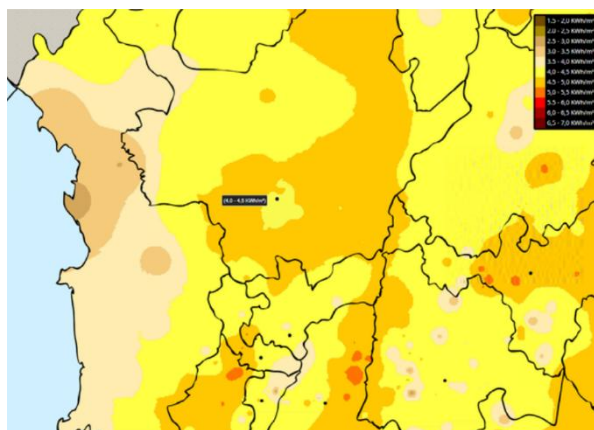
Gráfica de Irradiación Solar Promedio Anual



Nota. Irradiación solar desde 2015 hasta 2024

Figura 55

Mapa de Irradiación Solar de Colombia y Datos de la Ciudad de Medellín

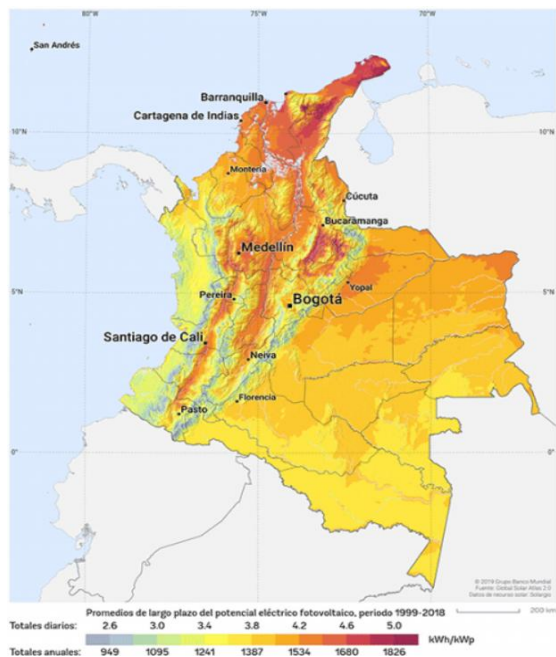


Nota. Mapa de irradiación solar más enfocada en la ciudad de Medellín. Tomado de. Aristizábal Alzate et al., (2022).

[https://www.researchgate.net/publication/365143702\\_Energia\\_solar\\_fotovoltaica\\_en\\_instituciones\\_educativas\\_caso\\_de\\_estudio\\_ITM\\_campus\\_Robledo](https://www.researchgate.net/publication/365143702_Energia_solar_fotovoltaica_en_instituciones_educativas_caso_de_estudio_ITM_campus_Robledo)

## Figura 64

*Potencial Eléctrico Fotovoltaico en Colombia.*



*Nota.* Potencial eléctrico fotovoltaico en Colombia. Tomado de. García Quintero, (2020).

<https://www.insolar.com.co/radiacion-solar-en-colombia>

La ciudad de Medellín, ubicada en el Valle de Aburrá, presenta un notable potencial para la generación de energía solar fotovoltaica debido a su favorable nivel de radiación solar promedio. Según el Atlas de Radiación Solar de Colombia, desarrollado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y el Ministerio de Minas y Energía (2017), Medellín registra una irradiación solar promedio diaria de 4,3 kWh/m<sup>2</sup>/día.

Este valor indica que, en promedio, cada metro cuadrado en Medellín recibe entre 4 y 4,5 kilovatios-hora de energía solar al día. Esta medida es esencial para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, ya que permite estimar la cantidad de energía que puede generarse en una ubicación específica.

La figura 7 muestra la distribución de la radiación solar en Colombia, destacando la ciudad de Medellín:

En el mapa, se observa que Medellín se encuentra en una zona con niveles de irradiación solar moderadamente altos, lo que la convierte en una ubicación adecuada para proyectos de energía solar.

Además, estudios como el realizado por Aristizábal Alzate et al. (2022), titulado Energía solar fotovoltaica en instituciones educativas: caso de estudio ITM campus Robledo, confirman que la radiación solar en Medellín es suficiente para el desarrollo de sistemas fotovoltaicos eficientes.

### ***Brillo Solar***

En el caso de la zona de Manrique Oriental, ubicada en la comuna 3 de Medellín, los registros históricos del IDEAM indican que el brillo solar promedio se encuentra entre 4 y 5 horas diarias efectivas a lo largo del año. Esta cifra representa un buen potencial para la captación de energía solar, especialmente durante los meses de mayor radiación como enero, febrero, diciembre y julio, donde se registran promedios cercanos o superiores a las 5,5 horas diarias de brillo solar.

Estos datos permiten proyectar un aprovechamiento eficiente de la radiación solar en esta zona urbana, lo cual hace viable la implementación de sistemas fotovoltaicos de pequeña y

mediana escala en viviendas de estratos uno y dos, como las que se encuentran en el sector estudiado.

### ***Tecnologías de Paneles Fotovoltaicos***

Los tipos de paneles solares fotovoltaicos más comúnmente comercializados y utilizados a nivel mundial son los paneles de silicio monocristalino y silicio policristalino. Ambos ofrecen soluciones eficientes para la generación de energía solar, aunque presentan diferencias en cuanto a su rendimiento, costos de producción, durabilidad y eficiencia frente a diferentes condiciones climáticas.

Para el presente proyecto, que tiene como objetivo suplir la demanda energética de viviendas de estratos 1 y 2 en el barrio Manrique Oriental, comuna 3 de Medellín, es fundamental seleccionar una tecnología que no solo garantice un adecuado nivel de generación, sino que además se adapte a las condiciones económicas, climáticas y espaciales del lugar.

A continuación, se presentan las principales características de cada tecnología:

#### **Tabla 1**

##### *Características de los Paneles Policristalinos*

Panel policristalino
Eficiencia media (15–17%).
Menor costo de fabricación.
Requieren mayor área para igual generación.
Sensibles a temperaturas elevadas, aunque tolerantes en zonas sin variaciones extremas.
Buena opción costo-beneficio para proyectos residenciales.

*Nota.* Características principales de paneles Policristalino. Adaptado de. Naturgy. (2024)

<https://www.naturgy.es/blog/hogar/diferencia-monocristalino-policristalino>

**Tabla 2**

*Características de los Paneles Monocristalinos.*

Panel monocristalino
Mayor eficiencia (17–22%).
Requieren menor área para producir la misma cantidad de energía.
Mejor rendimiento en condiciones de baja radiación.
Generalmente de mayor costo.
Mayor vida útil y estabilidad térmica.

*Nota.* Características principales de los paneles monocristalinos. Adaptado de. Naturgy. (2024)

<https://www.naturgy.es/blog/hogar/diferencia-monocristalino-policristalino>

### **Requisitos del Diseño del Sistema**

El diseño del prototipo del sistema está basado en el análisis del consumo energético de viviendas de estratos 1 y 2, siguiendo la Norma Técnica de la Electrificadora de Santander (ESSA) y el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050). A partir de la demanda máxima instalada, factores de demanda y diversidad, y el estudio de tres viviendas del barrio Manrique Oriental en Medellín, se definieron los parámetros para dimensionar el sistema fotovoltaico, asegurando su eficiencia, seguridad y adaptación a las condiciones reales de uso residencial.

#### ***Determinación del Consumo Máximo en Viviendas de Estratos 1 y 2, Conforme a la Norma Técnica para el Cálculo y Diseño de Sistemas de Distribución Eléctrica de la ESSA***

Inicialmente, y conforme a lo indicado en el artículo 220-37 del Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050), se realiza el cálculo del consumo pico en viviendas de estratos 1 y 2. Este cálculo tiene como finalidad determinar la demanda máxima total instalada por usuario, tomando como base los parámetros establecidos por la norma ESSA. Entre estos se incluyen el valor asignado al alumbrado general, el factor de demanda y el factor de diversidad. Estos

elementos permiten estimar de manera más precisa el consumo máximo que puede presentar una vivienda, facilitando así un diseño adecuado y eficiente de los sistemas de distribución eléctrica.

Para calcular la carga mínima instalada de acuerdo con la norma tomamos los siguientes valores:

$$\textit{Alumbrado general: } S_{Alumbrado} = 32 \text{ VA/m}^2$$

El promedio de una casa para estratos 1 y 2 es de  $50 \text{ m}^2$ , por lo tanto, se expresa de la siguiente forma:

$$\textit{Alumbrado general: } S_{Alumbrado} = 32 \text{ VA/m}^2 * 50 \text{ m}^2$$

$$\textit{Alumbrado general: } S_{Alumbrado} = \mathbf{1600 \text{ VA}}$$

La carga mínima para la lavadora y la plancha de acuerdo con la norma NTC 2050 es de:

$$1500 \text{ VA}$$

Por lo tanto, la carga mínima instalada  $S_I$  Corresponde a:

$$\textit{Carga mínima instalada: } S_I = 1600 \text{ VA} + 1500 \text{ VA} + 1500 \text{ VA}$$

$$S_I = \mathbf{4600 \text{ VA}}$$

La carga demandada para el sector residencial  $S_R$  Esta determinada por la siguiente ecuación matemática:

$$\textit{Carga sector residencial: } S_R = [S_M + (S_I - S_M) * F_d] * N$$

Con base a esto podemos asumir que la carga del aparato de mayor potencia es de  $S_M = 1500 \text{ VA}$  (suponiendo un electrodoméstico de alta potencia) y que el factor de demanda es de  $F_d = 50 \%$  (figura 3), además, como se trabajará con una sola vivienda, el número de usuarios será igual a  $N = 1$ . Teniendo en cuenta lo anterior podemos expresar la ecuación de la siguiente forma:

$$S_R = [1500 \text{ VA} + (4600 \text{ VA} - 1500 \text{ VA}) * 0.5] * 1$$

$$S_R = [1500 VA + 3100 VA * 0.5] * 1$$

$$S_R = [1500 VA + 1550 VA] * 1$$

$$\mathbf{S_R = 3050 VA}$$

Luego calculamos el factor de diversidad residencial  $F_{div\_res}$  Para los estratos 1 y 2 según la norma NTC 2050 de la siguiente forma:

$$\mathbf{Factor de diversidad res:} \quad F_{div\_res} = \frac{1}{0.2 + 0.8 * e^{\left(\frac{1-N}{6}\right)}}$$

$$F_{div\_res} = \frac{1}{0.2 + 0.8 * e^{\left(\frac{1-1}{6}\right)}}$$

$$\mathbf{F_{div\_res} = 1}$$

Las cargas de las áreas comunes residenciales son iguales a  $S_{ACR} = 0 VA$  si la vivienda no comparte áreas comunes, las cargas para el sector comercial son iguales a  $S_C = 0 VA$  si la vivienda es independiente.

$$\mathbf{Carga areas comunes com:} \quad \mathbf{S_{ACC} = 0 VA}$$

Ahora calculamos el factor de diversidad comercial  $F_{div\_com}$  Según la información obtenida en la figura 3 así:

$$\mathbf{Factor de diversidad com:} \quad F_{div\_com} = \frac{1}{0.2 + 0.8 * e^{\left(\frac{1-N}{4.5}\right)}}$$

$$F_{div\_com} = \frac{1}{0.2 + 0.8 * e^{\left(\frac{1-1}{4.5}\right)}}$$

$$\mathbf{F_{div\_com} = 1}$$

Por último, calculamos la demanda máxima total  $D_{max}$  Instalada por usuario teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente:

$$\mathbf{Demanda máxima total:} \quad D_{max} = \frac{S_R}{F_{div\_res}} + S_{ACR} + \frac{S_C}{F_{div\_com}} + S_{ACC}$$

$$D_{max} = \frac{3050 VA}{1} + 0 VA + \frac{0 VA_C}{1} + 0 VA$$

$$D_{max} = \frac{3050 VA}{1} + 0 VA + \frac{0 VA}{1} + 0 VA$$

$$\mathbf{D_{max} = 3050 VA}$$

Ahora realizamos la conversión del valor obtenido en unidades de  $VA$  a  $W$  asumiendo que el factor de potencia es igual a  $F_W = 0.8$ :

$$D_{max} = 3050 VA * 0.8$$

$$\mathbf{D_{max} = 2440 W}$$

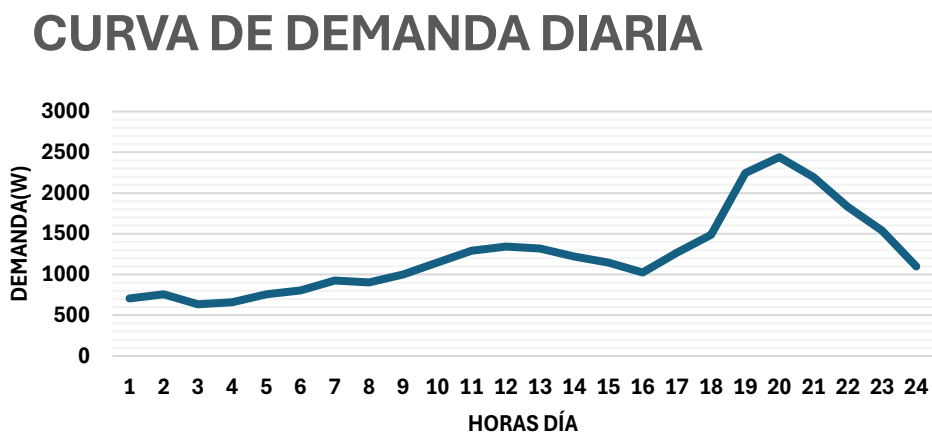
Con base en el resultado obtenido del cálculo de la demanda máxima instalada por usuario, y siguiendo los lineamientos de la curva de demanda diaria establecida en la norma técnica de la Electrificadora de Santander (ESSA), se procede a estimar el consumo energético horario correspondiente. Esta información permite visualizar el comportamiento del consumo a lo largo del día, facilitando así una adecuada planificación del sistema de generación y distribución eléctrica. La gráfica a continuación representa dicha distribución horaria del consumo energético por usuario.

**Tabla 3***Valores de Consumo por Horas para Viviendas de Estratos 1 y 2*

Hora	Demanda	Hora	Demanda
1	707,6	13	1317,6
2	756,4	14	1220
3	634,4	15	1146,8
4	658,8	16	1024,8
5	756,4	17	1268,8
6	805,2	18	1488,4
7	927,2	19	2244,8
8	902,8	20	2440
9	1000,4	21	2196
10	1146,8	22	1830
11	1293,2	23	1537,2
12	1342	24	1098

*Nota:* Consumo por horas para estratos 1 y 2. Tomado de. Código Eléctrico Colombiano NTC

2050. <https://osaic.com.co/wp-content/uploads/NTC-2050.pdf>

**Figura 73***Gráfica de la Curva de Demanda Diaria*

*Nota:* Curva de demanda diaria de acuerdo con datos tomado en campo. Adaptado de. Código Eléctrico Colombiano NTC 2050. <https://osaic.com.co/wp-content/uploads/NTC-2050.pdf>

### ***Especificaciones del Sistema Fotovoltaico Basados en el Análisis de Consumo en Hogares de Manrique Oriental para Cubrir el 100%***

Inicialmente se elaboró el cuadro de cargas con los datos de consumo en tiempo real considerando los tres modelos de vivienda ubicadas en la comuna 3 de Medellín, específicamente en el barrio Manrique Oriental, estas viviendas son representativas de hogares de estratos socioeconómicos 1 y 2, los cuales presentan características particulares en cuanto a patrones de consumo energético y acceso a recursos.

Con base en los análisis de las cargas eléctricas diarias tomadas de los tres hogares se establecieron los siguientes requisitos básicos para el diseño del sistema fotovoltaico:

**Capacidad de Generación de Energía Eléctrica.** El sistema deberá ser capaz de generar, como mínimo, 6967.6 Wh/día, según la lectura mínima registrada en las viviendas analizadas. Considerando un factor de pérdidas del sistema cercano al 20 % debido a efectos de eficiencia, temperatura, cableado e inversores, la capacidad bruta de generación requerida será de al menos 8361.12 Wh/día.

**Autonomía Energética al Día.** El sistema deberá garantizar una autonomía mínima de un día, asegurando el suministro de energía durante periodos de baja exposición a la radiación solar, como en días nublados.

**Baterías.** El banco de baterías deberá contar con una capacidad útil de operación de

8361.12 kw/h. Considerando una profundidad de descarga recomendada del 80 % (por ejemplo, para baterías de litio), la capacidad total requerida del banco sería de aproximadamente 10,451.4 kw/h.

$$capacidad\ util = \frac{consumo\ diario}{prof\ descarga} = \frac{8361.12}{0.8} = \mathbf{10,451.4kW/h}$$

**Tensión del Sistema.** El sistema operará a una tensión estándar de 12 V, sujeta al dimensionamiento final, con el objetivo de optimizar la eficiencia y garantizar la compatibilidad entre el inversor y el banco de baterías.

**Inversor.** El inversor seleccionado deberá ser capaz de suministrar una potencia continua de 2806 W, considerando el uso simultáneo de varios electrodomésticos de acuerdo con la curva de demanda diaria. Además, deberá soportar picos de arranque de carga, como los generados por la nevera, la licuadora o el ventilador, que podrían alcanzar hasta los 2806 W durante cortos periodos de tiempo y considerando un factor de seguridad del inversor del 25%.

$$potencia\ inversor = demanda\ pico * factor\ de\ seguridad$$

$$potencia\ inversor = 8361.12 * 1.25 = 2806W$$

**Escalabilidad y Mantenimiento.** El sistema está diseñado con componentes que faciliten su futura escalabilidad, tanto en capacidad de generación como de almacenamiento, según las necesidades del usuario. Se priorizan equipos de bajo mantenimiento y alta durabilidad, adecuados para ser utilizados en los entornos residenciales urbanos donde el acceso técnico inmediato pueda ser limitado.

### ***Cuadros de Cargas por Viviendas***

La casa 1 como se muestra en la tabla 4, está compuesta por una familia de tres integrantes: padre, madre e hijo. El padre trabaja fuera del hogar desde las 6:00 a.m. Hasta las

5:00 p.m., mientras que el hijo asiste al colegio de 6:30 a.m. A 1:00 p.m. Durante ese tiempo, la madre permanece en casa dedicada a labores domésticas, lo que implica un consumo moderado de energía durante el día, especialmente por el uso de electrodomésticos como licuadora, lavadora, computador y televisor. En las horas de la noche, la familia se reúne en el hogar, lo que genera un mayor consumo eléctrico por el uso simultáneo de ventiladores, iluminación, dispositivos electrónicos y electrodomésticos, justificando un mayor consumo en la noche ya que toda la familia se encuentra en el hogar.

**Tabla 4**

*Información de Consumo por Horas en la Casa 1*

Electrodomésticos Casa 1	Cantidad	Potencia (W)	Horas de uso al día	Horas de uso noche	Consumo Día (Wh/día)	Consumo Mensual (kwh)
Televisor	1	148,5	3	2	742,5	22,3
Ventilador (techo/piso)	2	89,8	2	4	538,8	16,2
Plancha para cabello	1	60,8	0,2	0,1	18,2	0,5
Secador de cabello	1	757,9	0,1	0,1	151,6	4,5
Nevera	1	105,1	12,00	12	2522,4	75,7
Lavadora	1	1154	1	0	1154,0	34,6
Equipo de sonido	1	45,8	1,5	0,5	91,6	2,7
Licuadora	1	202,4	0,1	0	20,2	0,6
Computador portátil	2	98,6	3	1	394,4	11,8
Horno o freidora de aire	1	1130	0,4	0,1	565,0	17,0
Olla arrocera	1	186,8	0,5	0,16	123,3	3,7
Cargador de celular	3	71,1	3	3	426,6	12,8
Iluminaria	5	36,5	2	4	219,0	6,6
Total	21	4087,3			6967,6	209,0

*Nota.* Valores tomados en campo para la casa uno.

Como se muestra en la tabla 5 la casa 2 está conformada por una familia de cuatro personas: padre, madre y dos hijos. Tanto el padre como la madre trabajan fuera del hogar desde las 7:00 a.m. Hasta las 5:30 p.m., mientras que los hijos asisten al colegio de 6:30 a.m. A 1:00 p.m. Esto hace que la vivienda permanezca desocupada gran parte del día, especialmente en las tardes. Aquí el consumo energético se concentra principalmente en las mañanas, cuando se preparan para sus actividades, y en las noches, cuando todos regresan al hogar. Durante estas horas, se hace uso de los electrodomésticos de cocina, iluminación, televisión, ventiladores y computadores para las tareas y el entretenimiento. Por lo tanto, esta vivienda presenta un consumo energético bajo durante las horas laborales y escolares, y un uso mayor en las noches.

**Tabla 5**

*Información de Consumo por Horas en la Casa 2*

Electrodomésticos Casa 2	Cantidad	Potencia (W)	Horas de uso al día	Horas de uso noche	Consumo Día (Wh/día)	Consumo Mensual (kwh)
Televisor	1	48,0	1,0	3,0	192,0	5,8
Ventilador (techo/piso)	1	60,8	1,0	4,0	304,0	9,1
Plancha para cabello	1	57,8	0,2	0,3	28,9	0,9
Secador de cabello	1	1157,0	0,1	0,2	347,1	10,4
Nevera	1	195,3	12,0	12,0	4687,2	140,6
Lavadora	1	744,5	0,5	0,5	744,5	22,3
Equipo de sonido	1	68,0	0,3	0,7	68,0	2,0
Licuadora	1	221,3	0,1	0,1	33,2	1,0
Computador portátil	1	74,1	0,5	1,5	148,2	4,4
Horno o freidora de aire	1	1085,0	0,2	0,2	434,0	13,0
Olla arrocera	1	743,7	0,5	0,5	743,7	22,3
Cargador de celular	2	29,0	2,0	5,0	203,0	6,1
Iluminaria	3	48,3	1,0	5,0	289,8	8,7

Electrodomésticos Casa 2	Cantidad	Potencia (W)	Horas de uso al día	Horas de uso noche	Consumo Día (Wh/día)	Consumo Mensual (kwh)
Total	16	4532,8	19		8223,6	246,7

*Nota:* Valores tomados en campo para la casa dos.

Como se muestra en la tabla 7, la casa 3 está conformada por cuatro integrantes: padre, madre, hija y la abuela paterna. El padre trabaja fuera del hogar desde las 6:00 a.m. Hasta las 5:00 p.m., mientras que la madre lo hace desde las 7:00 a.m. Hasta las 4:00 p.m., y la hija asiste al colegio desde las 7:00 a.m. Hasta la 1:30 p.m. La abuela permanece en casa durante todo el día, realizando labores domésticas, lo que garantiza una ocupación constante en el hogar. Esto implica un consumo moderado de la energía durante el día por el uso frecuente de electrodomésticos como la licuadora, el televisor, el ventilador y el computador. En la noche, el consumo eléctrico aumenta considerablemente debido a la presencia completa de la familia, que hace uso simultáneo de iluminación, ventiladores, televisores, cargadores y otros dispositivos electrónicos.

**Tabla 6***Información de Consumo por Horas en la Casa 3*

Electrodomésticos Casa 3	Cantidad	Potencia (W)	Horas de uso al día	Horas de uso noche	Consumo Día (Wh/día)	Consumo Mensual (kwh)
Televisor	2	217,0	4	2	1302,0	39,1
Ventilador (techo/piso)	2	121,6	1	3	486,4	14,6
Plancha para cabello	1	42,9	0,2	0,1	12,9	0,4
Secador de cabello	1	1143,0	0,1	0,1	228,6	6,9
Nevera	1	178,9	12,00	12	4293,6	128,8
Lavadora	1	747,5	1	0	747,5	22,4
Equipo de sonido	1	143,1	1	0,5	214,7	6,4
Licuadora	1	170,5	0,15	0,05	34,1	1,0
Computador portátil	2	181,8	2,5	1,5	727,2	21,8
Horno o freidora de aire	1	1082,0	1	0,5	1623,0	48,7
Olla arrocera	1	232,3	0,7	0,3	232,3	7,0
Cargador de celular	4	63,6	2	3	318,0	9,5
Iluminaria	5	50,5	2	4,5	328,3	9,8
Total	23	4374,7			10548,5	316,5

*Nota:* Valores tomados en campo para la casa tres.

La información obtenida sobre el consumo de energía de los electrodomésticos en los hogares fue de vital ayuda para realizar el diseño del sistema solar fotovoltaico. En este caso, se analizan hogares típicos de estrato 1 o 2 en Medellín, con un consumo moderado para la casa uno. La carga diaria estimada asciende a 6967,6 Wh/día, lo que representa un consumo energético razonable, posiblemente asociado al uso de tecnologías de bajo consumo, como bombillos LED.

La base de consumo se concentra principalmente en la iluminación, la refrigeración constante proporcionada por la nevera, y el uso de equipos de entretenimiento y tecnología, como televisores, computadores y electrodomésticos de cocina y cuidado personal. Este patrón de consumo refleja un estilo de vida representativo de un hogar con recursos limitados, pero que logra cubrir sus necesidades básicas mediante tecnologías eficientes.

El consumo más alto se genera por la nevera, con un total de 2522,4 Wh/día, lo que representa aproximadamente el 36,2 % del total de la carga diaria en esta vivienda. Al ser un electrodoméstico esencial, es comprensible que sea el principal responsable del consumo energético del hogar.

$$\text{porcentaje} = \frac{\text{consumo de nevera}}{\text{consumo total diario}} * 100$$

$$\text{porcentaje} = \frac{2522.4}{6967.6} * 100 = 36,21\%$$

El uso nocturno también es relevante, especialmente considerando equipos como ventiladores, iluminación, cargadores de celular, y el televisor. Sumando los tiempos de funcionamiento nocturno de estos aparatos, se tiene un total acumulado de 26,96 horas de funcionamiento nocturno diario entre los distintos dispositivos, lo cual da cuenta de una vida activa en horas de la noche, posiblemente debido a las dinámicas familiares y laborales que caracterizan a estos hogares.

### ***Especificaciones del Prototipo de Estación Fotovoltaica Propuesto para las Viviendas***

Como punto de partida para el desarrollo del prototipo de sistema fotovoltaico, se realizó un análisis detallado de los consumos eléctricos en tiempo real de tres viviendas ubicadas en la comuna 3 de Medellín, específicamente en el barrio Manrique Oriental. Estas residencias fueron seleccionadas por ser representativas de hogares pertenecientes a los estratos socioeconómicos 1

y 2, los cuales presentan condiciones particulares en cuanto al acceso a recursos energéticos y hábitos de consumo diarios.

Es importante destacar que el presente proyecto de prototipo de estación fotovoltaica ha sido completamente autofinanciado por los autores, sin apoyo económico externo. Debido a esta limitación presupuestal, el diseño del prototipo de sistema fotovoltaico no busca suplir el total del consumo eléctrico de una vivienda tipo, sino que está enfocado en cubrir aproximadamente el 9.15% de dicho consumo. Esta decisión permite demostrar la viabilidad técnica del sistema a pequeña escala, priorizando el abastecimiento de las cargas esenciales y sentando las bases para una posible expansión futura.

Con base en los análisis de las cargas eléctricas diarias tomadas de los tres hogares, se establecieron los siguientes requisitos básicos para el diseño del prototipo de sistema fotovoltaico:

El prototipo de estación fotovoltaica está conformado por una estructura metálica fabricada en acero al carbón, diseñada para alojar y proteger los principales componentes del sistema de conversión energética: panel solar, controlador de carga, batería, inversor, breakers, cableado, tomacorriente y ventiladores. Esta estructura incluye un soporte articulado en la parte superior que permite orientar el panel solar de forma manual según la posición del sol a lo largo del día, mejorando así la captación de radiación solar.

En el interior del chasis se encuentran instaladas la batería, el inversor, el sistema de ventilación y la distribución del cableado, esto con el fin de garantizar una operación segura y eficiente. La estructura cuenta con una puerta de acceso frontal que facilita el mantenimiento y monitoreo del sistema. Sobre esta puerta se dispone de una ventana de visualización que permite

al usuario verificar desde afuera el estado de carga a través de la pantalla del controlador de carga.

Adicionalmente, en la parte inferior de la puerta se instaló una salida de corriente alterna mediante un tomacorriente convencional, desde el cual se suministra el porcentaje de carga eléctrica destinado a cubrir parte del consumo de la vivienda. El sistema está diseñado para permitir el desmonte del panel solar, con la posibilidad de ser reubicado hasta cinco metros de distancia de la estructura principal, adaptándose así a las condiciones del entorno, por último, el chasis incluye ruedas giratorias con freno, lo que facilita su transporte y reubicación por parte del usuario de manera segura.

### ***Cálculos Matemáticos***

El prototipo de sistema solar fotovoltaico cuenta con las siguientes especificaciones:

Panel solar policristalino: 150 Wp.

Controlador de carga PWM: 20 A.

Batería sellada: 12 V – 12 Ah.

Inversor: 300 W.

Horas de sol pico promedio diario (Medellín): 5 h.

Energía que Puede Entregar el Panel Solar.

Según la información anterior, la energía eléctrica bruta que puede entregar el panel solar fotovoltaico bajo buenas condiciones es de:

$$E_{generada} = Potencia\ del\ pane * Horas\ sol\ pico$$

$$E_{generada} = 150\ W * 5h$$

$$E_{generada} = 750\ Wh/dia$$

Pero se debe tener en cuenta las pérdidas provenientes del controlador de carga PWM, el inversor, el cableado y la batería, para lo cual se estima un rendimiento de aproximadamente del 85 %:

$$E_{util} = 750wh * 0,85$$

$$\mathbf{E_{util} = 637,5Wh/dia}$$

Energía Máxima que se Puede Almacenar en la Batería.

Teniendo en cuenta las características técnicas y el diseño de la batería, se establece una potencia almacenada de:

$$E_{bateria} = 12V * 12Ah$$

$$\mathbf{E_{bateria} = 144Wh}$$

Según las recomendaciones del fabricante, una batería sellada no se debe descargar a más del 50% de su capacidad, por lo tanto, la energía útil de la batería es de:

$$E_{util\ bateria} = 144Wh * 0,5$$

$$\mathbf{E_{util\ bateria} = 72Wh}$$

Con base a este resultado podemos determinar que el sistema genera más energía de la que la batería puede almacenar, por lo que es útil para cargas en tiempo real durante el día.

### ***Porcentaje de Cobertura Sobre el Consumo de la Vivienda 1***

Consumo energético total de la vivienda:

$$Consumummo\ total_{c1} = 6967,6\ Wh/dia$$

Porcentaje que cubrirá el prototipo de estación fotovoltaica:

$$Porcentaje_{c1} = \left( \frac{637,5\ Wh/d}{6967,6\ Wh/d} \right) * 100$$

$$\mathbf{Porcentaje_{c1} = 9,15\ \%}$$

El sistema puede abastecer parcialmente a electrodomésticos de bajo consumo durante el día, como portátiles, iluminación, ventiladores y cargadores de celular, maximizando su aprovechamiento si se concentran los usos en horario solar. En la noche, la batería es limitada y solo puede cubrir necesidades muy básicas como iluminar una habitación con una bombilla por un par de horas o cargar un celular. El sistema actual no puede alimentar electrodomésticos de alto consumo como la nevera, lavadora, horno, secador o plancha de cabello, en base a esto se analizó la forma para usar el prototipo de manera adecuada:

Uso de electrodomésticos con energía solar diurna (637,5 Wh):

Licuadaora, televisor, olla arrocera, plancha para cabello y computador portátil: Se conecta la licuadaora con un consumo de 202,4 W durante 10 minutos, el televisor con un consumo de 148,5 W durante 2 horas, la olla arrocera con un consumo de 186,8 W durante 30 minutos, la plancha para cabello con un consumo de 60,8 W durante 12 minutos y el computador portátil con un consumo de 98,6 W durante 1 hora para obtener un consumo total durante el día de 521,4 Wh.

Uso de electrodomésticos durante la noche con la batería (72 Wh):

Iluminación y computador portátil: Sabiendo que cada bombilla consume 7,2 W se conectan 2 durante 1,5 horas para un consumo de 21,9 Wh y al mismo tiempo se conecta un computador portátil que tiene un consumo de 49,3 W durante 1 hora para un consumo de 49,3 Wh, esta combinación nos da como resultado un consumo total de 71,2 Wh.

### ***Porcentaje de Cobertura Sobre el Consumo de la Vivienda 2***

Consumo energético total de la vivienda:

$$\text{Consumo total}_{c2} = 8223,6 \text{ Wh/dia}$$

Porcentaje que cubrirá el prototipo de estación fotovoltaica:

$$\text{Porcentaje}_{c2} = \left( \frac{637,5 \text{ Wh/d}}{8223,6 \text{ Wh/d}} \right) * 100$$

$$\text{Porcentaje}_{c2} = 7,75 \%$$

El sistema puede abastecer parcialmente a electrodomésticos de bajo consumo durante el día, como iluminación, cargadores de celular, ventiladores y portátiles, siempre que se concentre el uso en las horas de mayor radiación solar. Sin embargo, durante la noche, la batería resulta limitada y solo puede cubrir necesidades esenciales, como mantener encendida una bombilla durante algunas horas o cargar un celular. Debido a la diferencia entre la capacidad del sistema y el nivel de consumo de la vivienda (8223,6 Wh/día), no es posible alimentar electrodomésticos de alto consumo como la nevera, la lavadora, el horno, el secador o la plancha para el cabello. En base a esto, analizó la forma para usar el prototipo de manera adecuada:

Uso de electrodomésticos con energía solar diurna (637,5 Wh):

Televisor, ventilador de piso, olla arrocera y cargador de celular: Se conecta un televisor de 48W por un tiempo de 1 hora, un ventilador de piso que consume 60,8 W por 1 hora, una olla arrocera de 743,7 W por 30 minutos y dos cargadores de celular que consumen 29W durante 1 hora y media para un consumo total de 524,2 Wh.

Uso de electrodomésticos durante la noche con la batería (72 Wh):

Iluminación y cargador de celular: Como la capacidad energética en la noche es más baja el sistema alimenta 2 bombillos de 9,66W durante 2 horas y dos cargadores de celular que consumen 29 W durante 1 hora para un consumo total de 67,64 Wh.

### ***Porcentaje de Cobertura Sobre el Consumo de la Vivienda 3***

Consumo energético total de la vivienda:

$$\text{Consumo total}_{c3} = 10548,5 \text{ Wh/dia}$$

Porcentaje que cubrirá el prototipo de estación fotovoltaica:

$$\text{Porcentaje}_{c3} = \left( \frac{637,5 \text{ Wh/d}}{10548,5 \text{ Wh/d}} \right) * 100$$

$$\text{Porcentaje}_{c3} = 6 \%$$

El sistema tiene una capacidad muy limitada frente al consumo total de esta vivienda (10.548,5 Wh/día). Por ello, su uso debe centrarse exclusivamente en electrodomésticos de bajo consumo durante las horas solares, como bombillos LED, ventiladores pequeños, cargadores de celular o equipos portátiles. Durante la noche, la batería solo alcanza para cubrir necesidades muy básicas, como encender una bombilla por unas pocas horas o recargar dispositivos móviles. No es viable utilizar el sistema para alimentar electrodomésticos de alto consumo como neveras, lavadoras, hornos, secadores o planchas. Por esta razón, se analiza la estrategia adecuada para un uso racional del prototipo y maximizar su aporte energético.

Uso de electrodomésticos con energía solar diurna (637,5 Wh):

Televisor, equipo de sonido, licuadora y computador portátil: Para el suministro diurno en la casa tres se conecta un televisor por 2 horas que consume 325Wh, un equipo de sonido por 1 hora para un consumo de 143,1Wh, una licuadora por 9 minutos con un consumo de 25,57Wh y un computador portátil por 1 hora para un consumo de 90,9Wh. Estos dispositivos generan un consumo total de 584,57Wh.

Uso de electrodomésticos durante la noche con la batería (72 Wh):

Iluminación y cargadores de celular: Para el consumo nocturno se conectan dos bombillos durante 2 horas generando un consumo de 40,4Wh y dos cargadores de celular durante 1 hora con un consumo de 31,8Wh para un consumo total de 72,2Wh.

### **Proyecciones para el Diseño del Prototipo de la Estación Fotovoltaica**

Es importante presentar el diseño del prototipo de la estación fotovoltaica, describiendo la selección y dimensionamiento de sus componentes principales: panel solar, inversor, controlador de carga, batería y sistema de protección. El diseño se basa en las condiciones

meteorológicas de la zona de tal forma que se logre aprovechar la mayor parte de la energía solar para transformarla en energía eléctrica, además el sistema busca garantizar un funcionamiento seguro, eficiente y adaptable a las necesidades del usuario.

### ***Potencia del Panel Solar del Sistema***

Como se muestra en la figura 10 y la tabla 7, para el presente proyecto se seleccionó un panel solar policristalino de 150 Wp (vatios pico). Esta potencia representa la capacidad máxima de generación del panel bajo condiciones estándar de prueba (STC), que incluyen una irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup> y temperatura de 25°C.

Potencia total del sistema = 150 Wp, ya que el sistema cuenta con un solo panel en esta fase de prototipo.

### **Figura 82**

#### *Fotografía del Panel Solar*



*Nota.* Fotografía panel solar usado para el prototipo.

**Tabla 7***Ficha Técnica del Panel Solar*

Especificaciones	Valor
Potencia máxima (Pmax)	150 W
Tolerancia de potencia	0 ~ +5 W
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	18.40 V
Corriente a máxima potencia (Imp)	8.15 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	22.51 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8.78 A
NOCT (Temperatura nominal de operación)	45 °C ± 2 °C
Peso	15.0 kg
Dimensiones	1500 x 680 x 30 mm
Voltaje máximo del sistema	1500 V
Capacidad máxima del fusible	20 A
Tipo de celdas	Policristalino
Clase de aplicación	A
Condiciones estándar de prueba (STC)	AM=1.5, E=1000 W/m <sup>2</sup> , Tc=25 °C

*Nota:* Características del panel solar utilizado para el prototipo. Tomado de. Celsia, (2018).

<https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son>

El panel solar fotovoltaico SLTH-150WP-36 está diseñado para convertir la energía solar en electricidad mediante el uso de celdas solares policristalinas. Tiene una potencia máxima de 150 W y opera de forma eficiente bajo las condiciones estándar de prueba con una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>. Su estructura es robusta y sus dimensiones son: (1500 x 680 x 30 mm) lo que lo hace ideal para instalaciones residenciales, rurales o proyectos educativos. Su salida eléctrica es apta para los sistemas de 12V o 24V dependiendo del arreglo y puede alimentar pequeñas cargas eléctricas o cargar baterías solares.

### ***Irradiación Solar Sobre el Prototipo***

De acuerdo con los datos obtenidos del IDEAM, la irradiación promedio en Medellín (zona del proyecto) es de aproximadamente 5.23 kWh/m<sup>2</sup>/día. Este valor permite estimar la energía diaria generada por el panel con la siguiente fórmula:

$$Energía\ diaria \approx Potencia\ del\ panel \times Irradiación \times Eficiencia\ del\ sistema$$

Asumiendo una eficiencia del sistema del 80% (por pérdidas térmicas, del controlador, del inversor y cableado):

$$Energía\ diaria \approx 150\ W \times 5.23\ h \times 0.8 \approx 627.6\ Wh/día$$

### ***Capacidad de Generación Energética y Porcentaje de Cobertura del Panel Solar***

Con base en las mediciones reales de consumo eléctrico diario en la vivienda uno, el consumo total estimado es de 6967,6 Wh/día. Al utilizar un panel solar de 150 Wp, considerando una irradiación promedio de 5,23 h/día y una eficiencia del sistema del 80%, se obtiene una generación diaria de aproximadamente 627,6 Wh/día. Esto equivale a cubrir cerca del 9.15% de la demanda energética diaria de la vivienda.

### ***Selección del Inversor***

Como se muestra en la figura 11 y en la tabla 8 el inversor seleccionado tiene una capacidad de 300 W y una entrada de 12 V. Este componente es adecuado para cargas básicas como iluminación LED, pequeños electrodomésticos, ventiladores o sistemas de monitoreo. Sin embargo, si se incrementa la demanda (más cargas o electrodomésticos) a futuro, será necesario considerar inversores de mayor capacidad.

## Figura 91

### Fotografía del Inversor



*Nota.* Fotografía del inversor usado en el prototipo.

## Tabla 8

### Ficha Técnica del Inversor

Parámetro	Especificación
Marca	CZELE
Modelo	INVC300W-12
Tipo de inversor	Onda sinusoidal modificada
Potencia nominal	300 W
Potencia máxima (pico)	600 W
Voltaje de entrada (DC)	12 V
Voltaje de salida (AC)	110 V
Frecuencia de salida	60 Hz
Certificaciones	CE, FCC, rohs
Fabricación	China
Aplicaciones comunes	Electrónica de consumo, sistemas solares, autos.

*Nota.* Características del inversor usado para el prototipo. Tomado de. González, (2023).

<https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>

### ***Selección del Controlador de Carga***

Como se muestra en la figura 12 y en la tabla 9, el controlador de carga seleccionado y sus características el cual se encarga de regular la energía que proviene del panel solar antes de almacenarla en la batería, protegiéndola contra sobrecarga, sobre descarga y otros daños. Su función principal es la de optimizar el proceso de carga, asegurando que la batería reciba el voltaje y la corriente adecuados según su estado de carga. Existen diferentes tipos, como PWM (modulación por ancho de pulso) y MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) para este proyecto se utilizó un controlador PWM. Este controlador integra protecciones contra cortocircuitos, inversión de polaridad y monitoreo del sistema, permitiendo realizar una gestión segura y eficiente del prototipo del sistema fotovoltaico.

### **Figura 100**

*Fotografía del Controlador de Carga*



*Nota.* Fotografía del controlador de carga usado en el prototipo.

**Tabla 9***Ficha Técnica del Controlador de Carga*

Parámetro	Especificación
Modelo	YJSS-20A
Voltaje de batería	12V / 24V autoajustable
Corriente de carga máxima	20 A
Entrada solar máxima	< 41 V
Voltaje de igualdad	14.2 V
Voltaje de flotación	13.7 V (ajustable de 12.7 V a 15 V)
Voltaje de parada de descarga	10.7 V (ajustable de 9 V a 11.3 V)
Voltaje de reconexión	12.6 V (ajustable de 11.5 V a 13.5 V)
Corriente de espera	< 10 mA
Salida USB	5V / 2A máx (ideal para cargar móviles, etc.)
Temperatura de operación	-35 °C a 60 °C

*Nota:* Características del controlador de carga usado en el prototipo. Tomado de. JYINS Electric Technology Co Ltd, (s.f.). <https://www.risinenergy.com/uploads/Datasheet-of-PWM-Solar-Charge-Controller.pdf>

***Selección de la Batería***

Como se muestra en la figura 13 y la tabla 10 las características técnicas de la batería Netion HXD12-12 (12V 12Ah) la cual se utilizó como almacenador de energía, permitiendo hacer uso de la electricidad cuando no hay luz solar. Durante el día, los paneles solares convierten la energía solar en electricidad que es regulada por el controlador de carga y enviada a la batería para su almacenamiento. Esta batería de ciclo profundo está diseñada para soportar descargas y recargas frecuentes, proporciona una fuente confiable de energía durante la noche o en días nublados. Su tecnología sellada (VRLA) la hace segura, libre de mantenimiento y

adecuada para ser utilizada en instalaciones domésticas o portátiles, ayudando a mantener la continuidad del suministro energético en el proyecto propuesto.

### Figura 109

#### Fotografía de la Batería



*Nota.* Fotografía de la batería usada en el prototipo.

### Tabla 10

#### Ficha Técnica de la Batería

Parámetro	Especificación
Modelo	HXD12-12
Tipo	Batería de ácido de plomo sellada (VRLA)
Voltaje nominal	12 V
Capacidad nominal	12 Ah (a 20 horas)
Uso Cíclico	14.5 – 15.0 V (a 25 °C)
Uso Ocasional (Stand-by)	13.6 – 13.8 V (a 25 °C)
Tecnología	Ciclo Profundo
Tipo de carga recomendada	Regulada por voltaje (controlador de carga)
Certificaciones	ISO 14001, CE, Pb, UL (MH45805)
Advertencias	No sobrecargar >15 VDC, evitar descargas <9VDC

*Nota.* Características de la bacteria usada en el prototipo. Tomado de. UPS Battery Center, (s.f.).

<https://www.upsbatterycenter.com/weida-hxd12-12-12v-12ah-f1-battery>

### ***Conexión del Sistema***

El sistema está conectado de la siguiente manera:

El panel solar (150 Wp, 12V) se conecta al breaker de protección en continua de 20A y a su vez va conectado al controlador de carga PWM (20A, 12V), el cual regula y administra la energía proveniente del sol.

La batería (12V, 12Ah), encargada de almacenar la energía para su uso durante la noche o en días nublados, se conecta al segundo breaker de continua que también va conectado al controlador para gestionar tanto el proceso de carga como el de descarga, asegurando una operación segura y eficiente.

El inversor (300W, 12V), cuya función es convertir la corriente continua (DC) almacenada en la batería en corriente alterna (AC), se conecta al segundo breaker que a su vez se conecta directamente a la batería. De esta forma, el inversor transforma los 12V DC en una salida de 110V AC apta para alimentar los dispositivos del hogar.

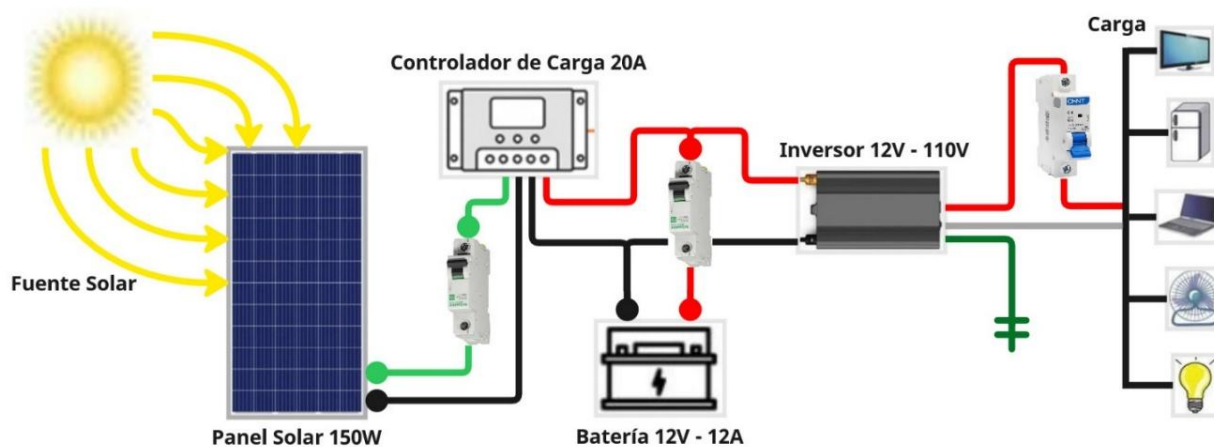
### ***Esquema de Conexión del Prototipo de Estación Fotovoltaica***

En la figura 14 podemos observar el esquema que representa el diseño del sistema fotovoltaico para el proyecto conformado por un panel solar de 150W, un controlador de carga de 20A, una batería de 12V - 12Ah, un inversor de 12V a 110V, dos breaker de continua de 20A y uno en alterna de 20A, que alimenta las cargas de los electrodomésticos y los dispositivos electrónicos en las viviendas de los estratos 1 y 2. El funcionamiento inicia cuando el panel solar convierte la energía solar en electricidad (corriente continua) y la envía al controlador de carga. Este controlador regula el flujo de energía para evitar sobrecargas y proteger la batería, permitiendo una carga segura y eficiente de 12V. A su vez, el controlador impide que la batería se descargue por debajo de los niveles críticos, prolongando su vida útil.

Una vez almacenada la energía en la batería, el inversor transforma la corriente continua (DC) de 12V en corriente alterna (AC) de 110V a través de las líneas fase, neutro y tierra respectivamente que llegan al tomacorriente instalado en la puerta de la estructura que garantizan la salida de energía eléctrica lo que la hace adecuada para alimentar los electrodomésticos del hogar. El sistema también incluye una conexión de puesta a tierra para la protección contra descargas eléctricas según lo que establece la norma NTC 2050. Este tipo de configuración se puede observar en aplicaciones residenciales o rurales sin acceso a la red eléctrica, ya que permite por medio de la energía solar alimentar con suministro eléctrico los equipos básicos con energía renovable, promoviendo el ahorro energético y la sostenibilidad ambiental.

### Figura 118

*Esquema de Conexión del Prototipo de Estación Fotovoltaica*



*Nota.* Diseño del circuito del prototipo de estación fotovoltaica.

### *Prototipo de Estación Fotovoltaica Ensamblado y Funcional*

El prototipo de estación fotovoltaica está diseñado para ser utilizado con el panel solar fijado al chasis mediante cuatro tornillos, distribuidos en pares a cada lado. No obstante, se

contempla la posibilidad de que el usuario pueda desmontar dicho panel con el fin de reubicarlo a una distancia de hasta cinco metros, correspondiente a la longitud máxima del cable suministrado. Esta flexibilidad permite optimizar la captación solar en función del espacio disponible y las condiciones de ubicación del sistema.

Para poner en marcha el prototipo, el usuario debe seguir un procedimiento específico. En primer lugar, debe posicionar el panel solar en el ángulo adecuado según la hora del día, con el propósito de aprovechar al máximo la radiación solar disponible. Luego se debe encender el sistema activando el breaker de corriente continua (DC) para poner en funcionamiento tanto el sistema de ventilación como el controlador de carga.

Posteriormente el usuario debe encender el inversor mediante el interruptor rojo ubicado en el interior de la estructura del prototipo. Por último, se debe activar el breaker de corriente alterna (AC), permitiendo así el suministro de energía eléctrica a las cargas del hogar. Este proceso garantiza un arranque seguro y eficiente del sistema, asegurando el correcto funcionamiento de cada componente en el orden establecido.

### **Figura 127**

*Fotografías del Proceso de Construcción del Prototipo*



*Nota.* Fotografía donde se evidencia el proceso de construcción del prototipo.

**Figura 136**

*Fotografías del Proceso de Pintura del Chasis del Prototipo*



**Figura 145**

*Fotografía del Prototipo de Estación Fotovoltaica Terminado*



*Nota.* Fotografía del prototipo completamente armado y funcional.

**Figura 154**

*Fotografía del Sistema Fotovoltaico Operando*



En esta sección se examinan los datos obtenidos durante la implementación y prueba del prototipo de estación fotovoltaica. Se presentan los valores de consumo energético de las viviendas de referencia, la capacidad de generación del sistema y el impacto en términos de ahorro energético y económico. El análisis permite contrastar los resultados con los objetivos planteados inicialmente, identificar fortalezas y limitaciones del prototipo, y valorar su viabilidad técnica y social en el contexto de las comunidades objeto de estudio.

### **Análisis y Proyecciones de Ahorro de Energía Eléctrica en las Viviendas**

Para estimar el potencial de ahorro energético que el prototipo de estación fotovoltaica implementado puede suministrar, fue necesario revisar el histórico del consumo y el costo de la energía en las tres viviendas donde se realizaron las pruebas y hallar un promedio de consumo para cada vivienda.

El análisis permitió establecer el impacto del sistema fotovoltaico en términos de porcentaje de cobertura del consumo eléctrico mensual de cada vivienda. Para ello, se tomaron

como referencia los parámetros del sistema instalado, cuya potencia pico es de 150 Wp, con un promedio de 5,23 horas solares diarias y un rendimiento global estimado del 80 %. Bajo estas condiciones, la producción energética alcanza aproximadamente 0,628 kWh/día, lo que equivale a 18,83 kWh/mes.

Al comparar esta generación con los consumos registrados en las viviendas, se obtuvieron los siguientes resultados:

Vivienda 1: consumo de 105 kWh/mes, con una cobertura aproximada del 17,93 %.

Vivienda 2: consumo de 82 kWh/mes, con una cobertura aproximada del 22,96 %.

Vivienda 3: consumo de 56 kWh/mes, con una cobertura aproximada del 33,62 %.

Estos resultados evidencian que, con el sistema actual, la Vivienda 3 alcanza un ahorro cercano a un tercio de su consumo mensual, mientras que las Viviendas 1 y 2 logran porcentajes de cobertura menores, aunque igualmente significativos en la reducción de sus pagos mensuales.

La implementación del sistema fotovoltaico representa un aporte importante a la disminución del consumo energético convencional y, mediante la ampliación de la potencia instalada, sería posible alcanzar un nivel de cobertura más homogéneo entre las tres viviendas.

### **Variación Costo (KW)**

Como complemento del análisis anterior, se evaluó el impacto económico de la generación fotovoltaica sobre el costo mensual de la energía en cada vivienda. Para ello, se calculó el valor monetario equivalente a los 18,83 kWh/mes generados por el sistema, utilizando el costo unitario del kWh en cada vivienda.

Vivienda 1: costo mensual de \$50.277,56, con una cobertura aproximada del 17,93 %.

Vivienda 2: costo mensual de \$40.724,24, con una cobertura aproximada del 22,96 %.

Vivienda 3: costo mensual de \$25.905,82, con una cobertura aproximada del 33,62 %.

De acuerdo con estos valores, se observa que el sistema fotovoltaico permitiría reducir el costo mensual en aproximadamente 17.93% en la Vivienda 1, 22.96% en la Vivienda 2 y 33.62% en la Vivienda 3. Esta reducción equivale a un ahorro porcentual idéntico al calculado en el apartado anterior 8.1, ya que la facturación se encuentra directamente asociada al consumo en kWh.

### **Pruebas en Campo**

En este apartado se describen las evaluaciones realizadas al prototipo de estación fotovoltaica en condiciones reales de operación. Las pruebas en campo permitieron medir variables como la generación diaria de energía, el comportamiento de los equipos instalados y la capacidad del sistema para suplir parcialmente la demanda de las viviendas seleccionadas. Estos ensayos constituyen la base para valorar el desempeño técnico del prototipo y analizar su potencial de implementación en entornos residenciales de estratos 1 y 2 en Medellín.

#### ***Pruebas de Consumo Eléctrico en la Vivienda 1***

Para la fase de pruebas en campo, el prototipo de estación fotovoltaica se instaló y se puso en funcionamiento en la Vivienda 1 durante una jornada comprendida de entre las 05:00 a.m. Hasta las 06:00 p.m. Donde a su vez se realizó el posicionamiento del panel al ángulo necesario utilizando una aplicación móvil para aprovechar al máximo la captación de irradiación solar. En este periodo, se conectaron de forma simultánea los siguientes dispositivos: licuadora, televisor, olla arrocera, plancha para cabello, computador portátil e iluminación.

Cabe resaltar que el consumo total diario de la vivienda es de 6967,6 Wh/día, y que el prototipo está diseñado para cubrir aproximadamente el 9,15 % de dicho consumo, equivalente a 627,1 Wh/día. Durante la prueba, se realizaron registros de las variables de voltaje, corriente, potencia y forma de la señal senoidal en alterna cada hora correspondiente al consumo de los

electrodomésticos conectados, con el propósito de evaluar la eficiencia energética del sistema y determinar los puntos de máxima y mínima generación eléctrica a lo largo del día.

Posteriormente, los datos recopilados fueron consolidados en la tabla de pruebas para su posterior análisis, lo que permitió una visualización más clara y gráfica de los resultados obtenidos, facilitando así el análisis del desempeño del prototipo en condiciones reales de uso.

**Tabla 11**

*Tabla de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 1*

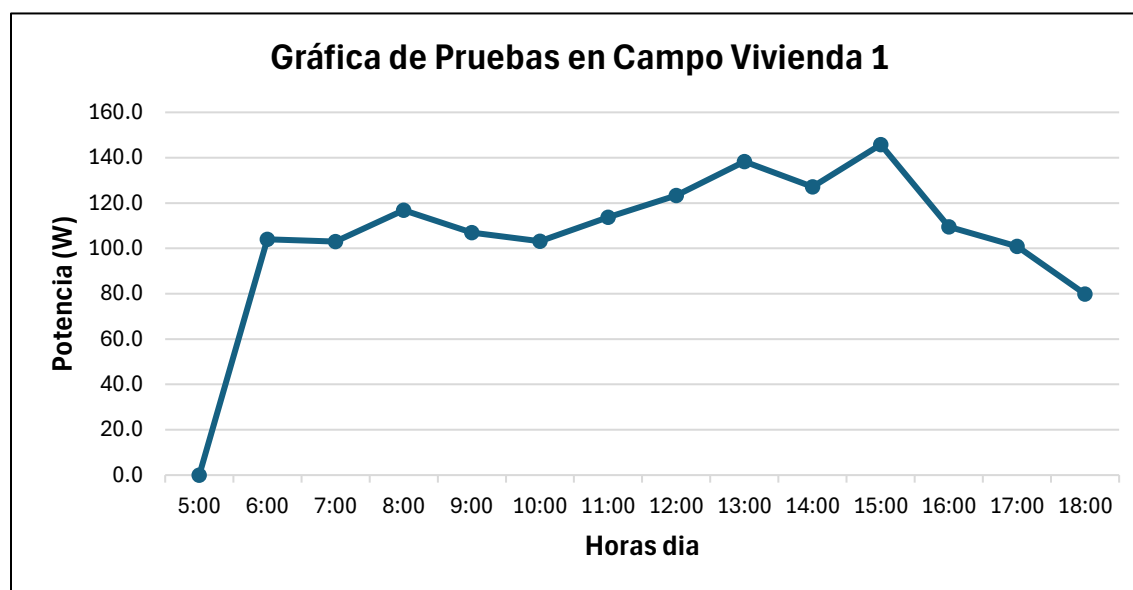
Vivienda 1							
Hora s día	Angulo de inclinación (°)	Voltaje (VAC) Multímetro	Voltaje (VDC) Multímetro	Voltaje (VAC) Medidor	Corrient e (IAC) Medidor	Potencia (W) Calculada	Potencia (W) Medidor
5:00	Menos 58° (122°)	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
6:00	Menos 58° (122°)	123,4	13,7	123,7	0,92	113,9	104,0
7:00	Menos 58° (122°)	124,2	12,5	123,8	0,84	103,7	103,0
8:00	Menos 58° (122°)	124,5	12,4	124,2	1,07	133,7	116,8
9:00	Menos 47° (133°)	123,9	15,1	123,7	0,92	114,5	106,9
10:00	Menos 32° (148°)	124,4	13,2	123,6	0,90	112,1	103,1
11:00	Menos 18° (162°)	123,8	13,1	123,5	0,91	113,2	113,8
12:00	0°	123,6	13,6	123,4	1,22	150,9	123,4
13:00	15°	123,7	15,6	123,4	1,16	143,0	138,3
14:00	29°	120,1	11,6	122,9	1,02	122,5	127,2

Vivienda 1							
15:00	43°	119,3	11,3	119,8	1,15	137,2	145,8
16:00	57°	119,2	11,2	114,6	0,94	111,9	109,5
17:00	57°	123,2	12,1	123,1	0,72	89,1	100,9
18:00	57°	123,4	13,8	123,2	0,57	69,8	79,9

*Nota.* Datos reales tomados en campo para la vivienda uno.

### Figura 163

*Gráfica de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 1*



*Nota.* Diseño de grafica basada en datos reales tomados en campo para la vivienda uno.

Durante el desarrollo de las pruebas en campo realizadas en la Vivienda 1, se evaluó de forma ordenada el consumo de los diferentes dispositivos mencionados anteriormente con el objetivo de verificar la estabilidad operativa del prototipo en función de la radiación solar disponible a lo largo del día. Los resultados nos muestran que no es viable la conexión simultánea de electrodomésticos de alto consumo, como la olla arrocera, la licuadora y la plancha para el cabello, debido a que su demanda energética excede la potencia máxima generada por la estación fotovoltaica. En contraste, se comprobó un desempeño estable al

alimentar las cargas de menor consumo, tales como la iluminación, cargadores de teléfonos móviles y computadores portátiles.

Para la validación experimental, los dispositivos se conectaron en intervalos de una hora, registrando los parámetros eléctricos clave: voltaje en corriente continua (VDC) a la entrada del controlador de carga, voltaje en corriente alterna (VAC) a la salida del inversor, corriente en alterna (IAC) y potencia (W) tanto calculada como medida con el medidor de consumo. Estos valores tienen relación directa con el ángulo de inclinación del panel solar y la radiación incidente, lo cual permitió analizar el comportamiento dinámico del sistema a lo largo del día.

La tabla 11 y la figura 19 representan los resultados obtenidos en donde se observa que el prototipo alcanza su máxima potencia cercana a las horas del mediodía (entre las 12:00 y 15:00 p.m.), donde la inclinación de los módulos favorece la captación de radiación solar, registrando potencias superiores a los 140 W. En horas tempranas de la mañana (antes de las 7:00 a.m.) y al final de la tarde (después de las 17:00 p.m.), la potencia disponible disminuye significativamente, lo que restringe el uso de cargas mayores a 100 W.

### ***Pruebas de Consumo Eléctrico en la Vivienda 2***

En la ejecución de las pruebas en campo, el prototipo de estación fotovoltaica se implementó en la Vivienda 2 y fue operado de forma continua desde las 05:00 a.m. Hasta las 06:00 p.m. Durante toda la jornada se inclinó el panel solar en el ángulo óptimo haciendo uso una aplicación móvil, con el fin de optimizar la captación de irradiación solar y maximizar la generación de energía durante el día.

Durante las pruebas se conectaron simultáneamente los siguientes equipos: televisor, ventilador de piso, computador portátil, dos bombillas de iluminación y cargador de celular. Esta vivienda presenta un consumo energético diario estimado de 8223,6 Wh/día de acuerdo con las

mediciones realizadas, de los cuales el prototipo está en la capacidad de cubrir alrededor del 7,75%, que equivalen a 637,33 Wh/día.

A lo largo de la jornada se realizaron mediciones cada hora de los valores de voltaje, corriente, potencia y forma de onda de la señal en alterna correspondiente al consumo de los equipos conectados. Por último, la información recolectada se organizó en la tabla de pruebas, para facilitar el análisis del comportamiento del prototipo en condiciones reales de operación.

**Tabla 12**

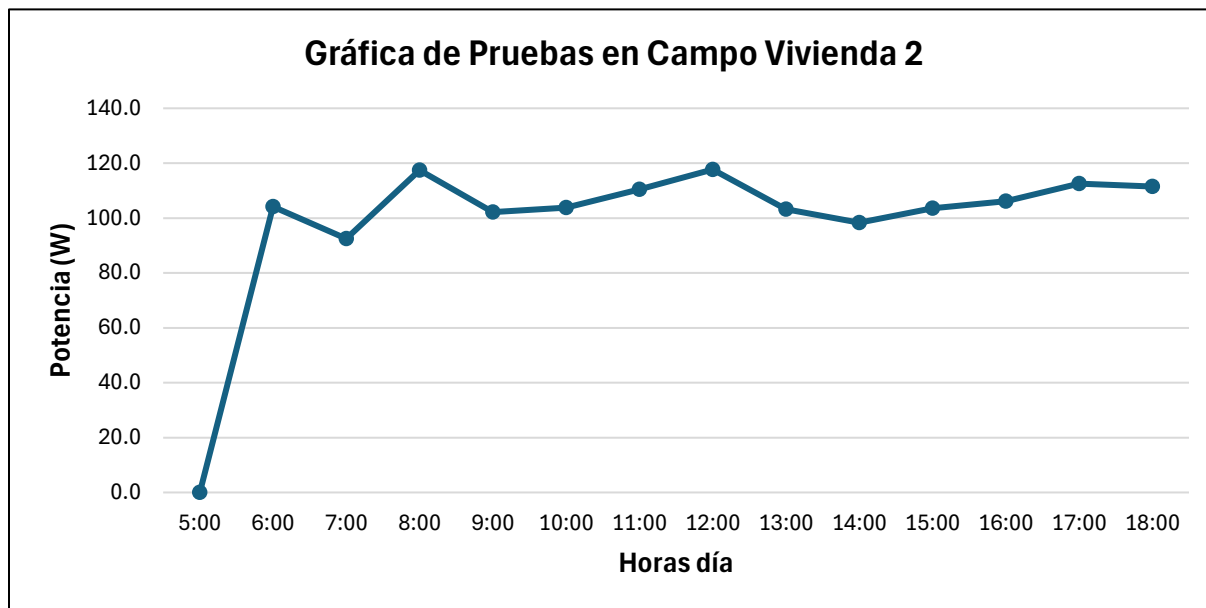
*Tabla de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 2*

Vivienda 2							
Horas día	Angulo de inclinación (°)	Voltaje (VAC) Multímetro o	Voltaje (VDC) Multímetro	Voltaje (VAC) Medidor	Corriente (IAC) Medidor	Potencia (W) Calculada	Potencia (W) Medidor
5:00	Menos 58° (122°)	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
6:00	Menos 58° (122°)	123,4	13,7	122,9	0,91	112,0	104,1
7:00	Menos 58° (122°)	123,3	13,5	122,9	0,89	109,6	92,5
8:00	Menos 58° (122°)	124,4	12,1	124,4	0,91	113,3	117,4
9:00	Menos 47° (133°)	124,4	12,0	124,5	0,79	98,8	102,2
10:00	Menos 32° (148°)	124,9	11,9	124,4	0,82	102,5	103,8
11:00	Menos 18° (162°)	124,9	11,8	124,2	0,88	110,4	110,4
12:00	0°	123,5	16,0	122,9	1,08	133,3	117,7
13:00	15°	123,5	13,4	123,1	0,92	114,1	103,2
14:00	29°	123,8	13,1	123,2	0,94	116,2	98,3
15:00	43°	124,0	12,7	128,5	0,88	109,0	103,6
16:00	57°	123,7	12,9	123,3	0,83	102,9	106,1
17:00	57°	123,9	12,8	123,4	0,92	113,4	112,5
18:00	57°	123,8	12,8	123,4	0,89	109,6	111,5

*Nota.* Datos reales tomados en campo para la vivienda dos.

**Figura 172**

*Gráfica de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 2*



*Nota.* Diseño de grafica basada en datos reales tomados en campo para la vivienda dos.

En el caso de la Vivienda 2, las pruebas en campo se orientaron a evaluar el comportamiento del prototipo al alimentar un conjunto de cargas compuesta por televisor (32”), ventilador de piso, olla arrocera, computador portátil, dos bombillas de iluminación y dos cargadores de celular. Los resultados experimentales demostraron que el sistema no logró soportar el funcionamiento simultáneo del ventilador ni de la olla arrocera, dado que ambos dispositivos presentan un consumo que sobrepasa la capacidad de generación del prototipo. No obstante, el sistema operó de manera estable al suministrar energía al televisor, las bombillas de iluminación y el cargador de celular, cargas de menor demanda energética que se mantuvieron dentro de los márgenes de potencia generada.

Los registros experimentales se realizaron cada hora, midiendo parámetros como voltaje en corriente continua (VDC) de entrada al controlador de carga, voltaje en corriente alterna

(VAC) a la salida del inversor, corriente en alterna (IAC), y potencia tanto calculada como registrada por el medidor de consumo. La tabla 12 y la figura 20 presentan los resultados obtenidos. Se observa que, a diferencia de la Vivienda 1, el comportamiento de la potencia se mantuvo más estable a lo largo del día, con valores cercanos a los 100 W en la mayor parte de la jornada y picos cercanos a 120 W alrededor de las 8:00 a.m. Y 12:00 p.m. Sin embargo, estas condiciones no fueron suficientes para garantizar el uso de electrodomésticos de mayor exigencia como el ventilador y la olla arrocera.

### ***Pruebas de Consumo Eléctrico en la Vivienda 3***

Para las pruebas de validación en campo de esta vivienda se utilizó la misma metodología de las viviendas anteriores en donde el prototipo de estación fotovoltaica se instaló en y se puso en operación continua desde las 05:00 a.m. Hasta las 06:00 p.m. Previo al inicio de la prueba, se realizó el ajuste de la inclinación del panel solar utilizando cada hora teniendo en cuenta el movimiento del sol durante el día con una aplicación móvil, asegurando así siempre obtener la orientación más adecuada para maximizar la captación de irradiación solar durante toda la jornada.

En este caso se conectaron de forma simultánea los siguientes aparatos eléctricos: televisor, equipo de sonido, licuadora, computador portátil, dos bombillas de iluminación y dos cargadores de celular, el consumo energético diario estimado para esta vivienda es de 10548,5 Wh/día, de los cuales el prototipo de estación fotovoltaica puede suministrar aproximadamente un 6 %, equivalente a 632,91 Wh/día.

Durante el desarrollo de las pruebas se realizaron las mediciones por hora de voltaje, corriente, potencia y forma de onda en alterna, relacionadas al consumo de los equipos conectados, los datos obtenidos fueron analizados y organizados en la tabla de pruebas para

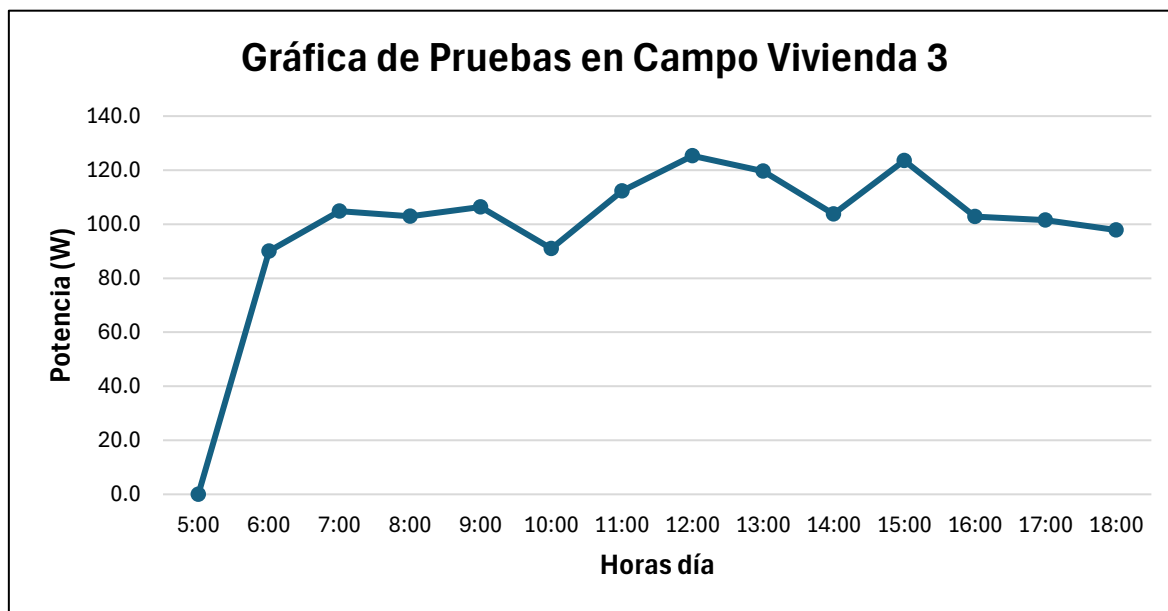
facilitar la representación gráfica de los resultados y el análisis detallado del comportamiento del prototipo.

**Tabla 13**

*Tabla de Valores de Pruebas en Campo para la Vivienda 3*

<b>Vivienda 3</b>							
<b>Horas día</b>	<b>Angulo de inclinación (°)</b>	<b>Voltaje (VAC) Multímetro</b>	<b>Voltaje (VDC) Multímetro</b>	<b>Voltaje (VAC) Medido</b>	<b>Corriente (IAC) Medidor</b>	<b>Potencia (W) Calculada</b>	<b>Potencia (W) Medidor</b>
5:00	Menos 58° (122°)	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
6:00	Menos 58° (122°)	124,4	12,4	123,7	0,80	99,8	90,0
7:00	Menos 58° (122°)	124,7	12,2	124,3	0,72	90,2	104,8
8:00	Menos 58° (122°)	124,5	12,1	124,2	0,71	88,5	102,9
9:00	Menos 47° (133°)	123,4	12,9	122,9	0,68	84,0	106,3
10:00	Menos 32° (148°)	124,6	12,1	124,3	0,63	79,0	91,0
11:00	Menos 18° (162°)	123,3	12,9	124,0	0,89	109,2	112,3
12:00	0°	124,9	11,9	124,0	0,92	115,0	125,3
13:00	15°	125,0	11,8	124,4	0,88	110,1	119,6
14:00	29°	124,1	11,8	124,3	0,93	115,9	103,7
15:00	43°	124,9	11,8	124,5	0,80	99,7	123,5
16:00	57°	125,0	11,7	124,4	0,88	110,5	102,8
17:00	57°	124,9	11,7	124,5	0,91	113,9	101,5
18:00	57°	124,7	11,7	123,0	0,68	84,2	97,8

*Nota.* Datos reales tomados en campo para la vivienda tres.

**Figura 181***Gráfica de Pruebas en Campo*

*Nota.* Diseño de grafica basada en datos reales tomados en campo para la vivienda tres.

### **Análisis del Comportamiento del Prototipo de Estación Fotovoltaica**

En la Vivienda 3, las pruebas en campo se realizaron conectando un conjunto de cargas compuesto por televisor, equipo de sonido, licuadora, computador portátil, dos bombillas de iluminación y dos cargadores de celular. Los resultados demostraron que el sistema no logró soportar el funcionamiento del televisor debido a que se trataba de un equipo de gran tamaño (más de 50 pulgadas) con alta demanda energética ni de la licuadora, cuyo consumo sobrepasó la capacidad de generación del prototipo. Sin embargo, la estación fotovoltaica operó de manera estable al alimentar las cargas de menor potencia, tales como el equipo de sonido (con volumen moderado), el computador portátil, las bombillas de iluminación y los cargadores de celular, garantizando un suministro continuo durante la mayor parte de la jornada.

El registro experimental se llevó a cabo de forma horaria, midiendo los parámetros eléctricos de voltaje en corriente continua (VDC) a la entrada del controlador de carga, voltaje en corriente alterna (VAC) a la salida del inversor, corriente alterna (IAC) y potencia (W) tanto calculada como medida por el medidor de consumo. La tabla 13 y la figura 21 muestran el comportamiento del sistema. Se evidenció que la potencia alcanzó valores máximos cercanos a los 125 W alrededor del mediodía (12:00 p.m. - 15:00 p.m.), mientras que en horas de la mañana (antes de las 9:00 a.m.) Y al finalizar la tarde (después de las 17:00 p.m.) La capacidad de generación disminuyó, restringiendo aún más la posibilidad de conectar equipos de mayor demanda.

### **Videos de Testimonios y Funcionamiento General del Prototipo de Estación Fotovoltaica**

Con el fin de mostrar las opiniones de las familias donde se realizaron las pruebas y visualizar el comportamiento general del prototipo de estación fotovoltaica, se recomiendan los siguientes recursos audiovisuales:

**Tabla 14***Recursos Audiovisuales de Testimonios Realizados en las Viviendas*

<https://www.youtube.com/watch?v=uplIjD5mPJ0>



<https://www.youtube.com/watch?v=-KBaL4->

[aJR0](#)

*Nota.* Se realizan videos de testimonios y explicación detallada del prototipo de estación fotovoltaica.

## Conclusiones

Las pruebas en campo realizadas en las tres viviendas permitieron validar la capacidad operativa del prototipo de estación fotovoltaica en condiciones reales de radiación solar en donde se evidenció que, si bien el sistema garantiza el suministro de energía para cargas de baja demanda, presenta limitaciones al intentar alimentar dispositivos de alto consumo.

En la vivienda 1, se comprobó que el prototipo no soporta el uso de la olla arrocera, la licuadora y la plancha para cabello, pero mantiene un desempeño estable con iluminación, cargadores de celular y computador portátil.

En la vivienda 2, se observó un comportamiento más uniforme de la potencia generada durante el día. Sin embargo, tampoco fue posible conectar el ventilador ni la olla arrocera, siendo las cargas menores como el televisor 32", iluminación y cargador de celular las que se pudieron mantener sin inconvenientes.

En la vivienda 3, el sistema no logró soportar la operación de un televisor de gran formato (más de 50") ni de la licuadora, aunque sí garantizó el funcionamiento estable de cargas menores como equipo de sonido con volumen moderado, computador portátil, bombillas de iluminación y cargadores de celular.

De manera general, el comportamiento de la potencia máxima se registró en el rango comprendido entre las 12:00 p.m. Y las 15:00 p.m. Horas, alcanzando valores entre los 120 y 145 W dependiendo de la vivienda y de las condiciones de inclinación del panel solar. En contraste, durante las primeras horas de la mañana y al finalizar la tarde, la potencia disponible se redujo significativamente, restringiendo aún más la conexión de electrodomésticos de mayor consumo.

Los resultados experimentales confirman que el dimensionamiento del prototipo es adecuado para suplir las necesidades básicas de energía eléctrica en viviendas, pero no para la operación continua de electrodomésticos de alta potencia.

## Recomendaciones

Se recomienda aumentar la capacidad instalada de más paneles solares y del banco de baterías, con el fin de ampliar el rango de operación y garantizar el uso de dispositivos de mayor consumo en períodos críticos de radiación.

Implementar un sistema de priorización de cargas que permita asegurar el suministro continuo de energía a equipos esenciales (iluminación, comunicación, refrigeración ligera), restringiendo automáticamente el uso de electrodomésticos de alto consumo cuando la potencia generada sea insuficiente.

Integrar un sistema de monitoreo digital con registro de variables eléctricas (tensión, corriente, potencia y estado de baterías) para optimizar el análisis de desempeño y detectar posibles sobrecargas en la operación.

Instalar un sistema de ajuste automático de la inclinación de los paneles solares en base a la posición geográfica y la hora actual, de manera que se maximice la captación de radiación en diferentes franjas horarias y estaciones del año.

Considerar el diseño modular del prototipo, que permita adicionar paneles y baterías según las necesidades de cada vivienda, garantizando la flexibilidad y eficiencia en la inversión.

Incorporar dispositivos de protección más robustos contra sobre corrientes, sobrecargas y descargas profundas en el sistema de almacenamiento, lo que aumentará la vida útil de los componentes y la seguridad de la instalación.

### Referencias Bibliográficas

- Agencia Internacional de Energía. (2019). *World energy outlook 2019*.  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Agencia Internacional de Energías Renovables. (2020, junio). *Conclusiones principales: Costos de generación de energía renovable en 2019*. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA\\_Costs\\_2019\\_ES.PDF](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Costs_2019_ES.PDF)
- Ardila, W. (2025, agosto 20). *Proyecto de grado aplicado - Prototipo de estación fotovoltaica - UNAD* [video]. <https://www.youtube.com/watch?v=uplIjD5mPJ0>
- Aristizábal, C. E., & González, J. L. (2022). Energía solar fotovoltaica en instituciones educativas: caso de estudio ITM campus Robledo. *Semestre Económico*, 24(57), 30–57.  
[https://www.researchgate.net/publication/365143702\\_Energia\\_solar\\_fotovoltaica\\_en\\_instituciones\\_educativas\\_caso\\_de\\_estudio\\_ITM\\_campus\\_Robledo](https://www.researchgate.net/publication/365143702_Energia_solar_fotovoltaica_en_instituciones_educativas_caso_de_estudio_ITM_campus_Robledo)
- Autosolar. (2021). *La energía solar en Colombia en 2021*. <https://autosolar.co/energia-solar/la-energia-solar-en-colombia-en-2021>
- Breve reseña histórica y puesta al día de las células solares. (n.d.). *Breve reseña histórica y puesta al día de las células solares*. <https://1library.co/article/breve-rese%C3%b1a-hist%C3%b3rica-puesta-d%C3%ada-c%C3%a9lulas-solares.zww396gz>
- Celsia. (n.d.). *Paneles solares: ¿Cómo funcionan y qué son?* <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2015). *Resolución 024 de 2015: Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y se dictan otras disposiciones*.  
[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0024\\_2015.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0024_2015.htm)

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2018). *Resolución CREG 030 de 2018: Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.*

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0030\\_2018.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0030_2018.htm)

Congreso de Colombia. (2001). *Ley 697 de 2001: Uso racional y eficiente de la energía.*

<https://www.anla.gov.co/eureka/normatividad/leyes/2084-ley-697-de-2001-uso-racional-y-eficiente-de-la-energia>

Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014: Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.*

<https://www.anla.gov.co/07rediseureka2024/normativa/leyes/ley-1715-de-2014-integracion-de-las-energias-renovables-no-convencionales-al-sistema-energetico-nacional>

Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014: Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?I=57353>

El País. (2023, noviembre 26). *Comunidades energéticas: Una forma de resistir como consumidores.* <https://elpais.com/america-futura/2023-11-26/comunidades-energeticas-una-forma-de-resistir-como-consumidores.html>

Electricistas A&M. (2025). *Beneficios de energía solar residencial: Ahorro para su hogar.*

<https://electricistasaym.com/beneficios-energia-solar-residencial>

Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (n.d.). *Norma Técnica ESSA.*

<https://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Norma%20tecnica/Norma%20T%C3%a9cnica%20ESSA.pdf>

Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2025). *Tarifas de energía 2025*. EPM.

<https://www.epm.com.co/clientesyusuarios/energia/tarifas-energia>

Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2025). *Tarifas de energía eléctrica vigentes*.

<https://www.epm.com.co/site>

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2021, 16 de febrero). *Tarifas y costo de energía eléctrica – mercado regulado: febrero de 2021*.

[https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/documentos/documentos-de-tarifas-a%C3%B1os-anteriores-energia/2021/Publicacion\\_Tarifas\\_Energia\\_16\\_febrero\\_2021.pdf](https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/documentos/documentos-de-tarifas-a%C3%B1os-anteriores-energia/2021/Publicacion_Tarifas_Energia_16_febrero_2021.pdf)

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2021, 17 de noviembre). *Tarifas y costo de energía eléctrica – mercado regulado: noviembre de 2021*.

[https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/documentos/documentos-de-tarifas-años-anteriores-energia/2021/Publicacion\\_Tarifas\\_Energia\\_17\\_noviembre\\_2021.pdf](https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/documentos/documentos-de-tarifas-años-anteriores-energia/2021/Publicacion_Tarifas_Energia_17_noviembre_2021.pdf)

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2023, 16 de marzo). *Tarifas y costo de energía eléctrica – mercado regulado: marzo de 2023*. <https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/energia/tarifas-energia/publicaciontarifasmarzo162023.pdf>

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2025, 16 de enero). *Tarifas y costo de energía eléctrica – mercado regulado, enero de 2025*. <https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/energia/tarifas-energia/publicacion-tarifas-enero-16-2025-ant-om.pdf>

Empresas Públicas de Medellín. (2023). *En el barrio El Salvador de Medellín nace la primera comunidad energética de Colombia*. <https://www.epm.com.co/institucional/sala-de->

prensa/noticias-y-novedades/en-el-barrio-el-salvador-de-medellin-nace-la-primera-comunidad-e

Endesa. (n.d.). *Los grandes inventos de la historia de la energía solar*.

<https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/historia-de-la-energia-solar>

Enel X. (n.d.). *¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona?*

<https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>

Energía Solar 1. (2021). *Captación de energía solar*. <https://energiasolar1.com/blog/captacion-de-energia-solar>

Energytheory. (2024). *Panel solar monocristalino vs. policristalino: teoría energética*.

<https://energytheory.com/es/Panel-solar-monocristalino-vs.-policristalino/>

Factor Energía. (n.d.). *Historia de la energía solar*.

<https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/energia-solar>

García Quintero, A. M. (2020, 8 de agosto). Radiación solar en Colombia. *Insolar Colombia*.

<https://www.insolar.com.co/radiacion-solar-en-colombia>

Hogarsense. (n.d.). *Historia de la energía fotovoltaica*. <https://www.hogarsense.es/energia-solar/historia-energia-solar-fotovoltaica>

Iberdrola. (n.d.). *Historia de la energía solar*. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica/historia-energia-solar>

Iberdrola. (n.d.). *Radiación solar: Qué es y cómo se produce*.

<https://www.iberdrola.com/compromiso-social/radiacion-solar>

ICEX España Exportación e Inversiones. (2022). *Ficha sector solar 2022*.

<https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/020/documentos/2022/12/anexos/Ficha%20Sector%20Solar%202022.docx>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (1998). *NTC 2050:*

*Código Eléctrico Colombiano*. <https://osaic.com.co/wp-content/uploads/NTC-2050.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2007). *NTC 5549:*

*Sistemas fotovoltaicos (FV) terrestres generadores de potencia - Guía general*.

<https://library.co/document/y623gl7z-norma-tecnica-colombiana.html>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). *NTC 5710:*

*Protección contra sobretensiones en sistemas fotovoltaicos*.

<https://www.phoenixcontact.com/es-co/tecnologias/proteccion-sobretensiones->

[tecnologia/fundamentos-proteccion-sobretensiones](https://www.phoenixcontact.com/es-co/tecnologias/proteccion-sobretensiones-)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*.

[https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/temas/tiempo-y-](https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/temas/tiempo-y-clima/documentos/atlas/ATLAS%2BRADIACION%2BSOLAR%2BUV%2BY%2BOZO)

[clima/documentos/atlas/ATLAS%2BRADIACION%2BSOLAR%2BUV%2BY%2BOZO](https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/temas/tiempo-y-clima/documentos/atlas/ATLAS%2BRADIACION%2BSOLAR%2BUV%2BY%2BOZO)  
[NO%2BDE%2BCOLOMBIA.pdf](https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/temas/tiempo-y-clima/documentos/atlas/ATLAS%2BRADIACION%2BSOLAR%2BUV%2BY%2BOZO)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). *Promedio mensual de la radiación global acumulada* [PDF]. IDEAM.

[https://bart.ideam.gov.co/indicosestemas/ind/clima/hm/HM\\_radiacion\\_global\\_acumulada.pdf](https://bart.ideam.gov.co/indicosestemas/ind/clima/hm/HM_radiacion_global_acumulada.pdf)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2025). *Brillo solar*.

[https://bart.ideam.gov.co/indicosestemas/ind/clima/hm/HM\\_brillo\\_solar.pdf](https://bart.ideam.gov.co/indicosestemas/ind/clima/hm/HM_brillo_solar.pdf)

International Energy Agency. (2021). *World energy outlook 2021*.

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>

JYINS Electric Technology Co., Ltd. (s. f.). *YJSS series solar charge controller datasheet [Ficha técnica]*. Risin Energy. <https://www.risinenergy.com/uploads/Datasheet-of-PWM-Solar-Charge-Controller.pdf>

LGCY Power. (n.d.). *Top quality residential solar panels*. <https://www.lgcypower.com/shining-a-light-on-solar-pioneers-alexandre-edmond-becquerel>

Megawatt.es. (2024, septiembre). *Avances en la eficiencia de placas solares*.

<https://megawatt.es/mejoras-en-la-eficiencia-de-placas-solares>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Resolución 1283 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 de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014*.

<https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-1283-de-2016/>

Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Resolución 90708 de 2013: Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE*.

[https://www.minenergia.gov.co/documents/3822/22726-](https://www.minenergia.gov.co/documents/3822/22726-Resolucion_9_0708_de_agosto_30_de_2013_expedicion_RETIE_2013.pdf)

[Resolucion\\_9\\_0708\\_de\\_agosto\\_30\\_de\\_2013\\_expedicion\\_RETIE\\_2013.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/3822/22726-Resolucion_9_0708_de_agosto_30_de_2013_expedicion_RETIE_2013.pdf)

Ministerio de Minas y Energía. (2014). *Decreto 2469 de 2014: Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración*.

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/decreto\\_2469\\_2014.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/decreto_2469_2014.htm)

Ministerio de Minas y Energía. (2014). *Decreto 2492 de 2014: Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda.*

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/decreto\\_2492\\_2014.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/decreto_2492_2014.htm)

Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Decreto 1623 de 2015: Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?I=66410>

Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Decreto 2143 de 2015: Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, Decreto 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?I=64682>

Muñoz, M. (2025, septiembre 7). *Opiniones de los usuarios de viviendas frente al uso del prototipo de estación fotovoltaica* [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=-KBaL4-aJR0>

Naturgy. (2024). *Diferencia entre monocristalino y policristalino.*

<https://www.naturgy.es/blog/hogar/diferencia-monocristalino-policristalino>

OPS Colombia. (2025). *Mapeo solar de Colombia: Descubre el potencial de tu ciudad.*

<https://www.opscolombia.com/blog/mapeo-solar-de-colombia>

Portafolio. (2024, octubre). *Así han crecido las tarifas de energía en los últimos años en Colombia.* <https://www.portafolio.co/energia/asi-han-crecido-las-tarifas-de-energia-en-los-ultimos-anos-en-colombia-625485>

PV Education. (n.d.). *First photovoltaic devices*.

<https://www.pveducation.org/pvcdrrom/manufacturing-si-cells/first-photovoltaic-devices>

Repsol. (n.d.). *¿Qué es el efecto fotovoltaico?* <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/que-es-el-efecto-fotovoltaico>

Revista Ecoguía. (2019). *El Paso, la planta solar más grande de Colombia*.

<https://www.revistaecoguia.com/econegocios/3049-el-paso-la-planta-solar-mas-grande-de-colombia>

Revista Tecnológica ESPOL. (2024). Evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica. *Revista Tecnológica ESPOL*, 37(2), 1–15.

<https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/download/1158/801/6745>

Rivera Velásquez, L. Y. (2022). La energía solar: La solución para los hogares en Colombia.

*Episteme. Revista de Divulgación en Estudios Socioterritoriales*, 14(2), 1–15.

<https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/episteme/article/download/8381/7735/2288>

9

Rodríguez, M., Mieles, G., Pérez, E., Vélez, A., Filgueiras, M., & Vilaragut, M. (2024).

Generación distribuida potenciada con las redes inteligentes. *DYNA*, 91(233), 1–10.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/112264/92886>

Solarprofit. (n.d.). *Un joven francés: Descubridor del efecto fotovoltaico*.

<https://solarprofit.es/es/blog/descubrimiento-efecto-fotovoltaico>

Sotysolar. (n.d.). *Inversores solares: ¿Qué son?, ¿qué tipos hay?* <https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>

Tutiempo.net. (2024). *Radiación solar en Medellín (Colombia)*.

<https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/colombia/medellin.html>

Tutiempo.net. (n.d.). *Radiación solar en Medellín*. <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/medellin.html>

Un poco de ciencia, por favor. (2022, agosto 9). *Los orígenes de la energía solar fotovoltaica*. <https://unpocodecienciaporfavor.com/2022/08/09/los-origenes-de-la-energia-solar-fotovoltaica-2/>

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2015). *Resolución 0281 de 2015: Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala*. [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_upme\\_0281\\_2015.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0281_2015.htm)

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2015). *Primer atlas hidroenergético revela gran potencial en Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2017). *Plan de expansión de referencia generación – transmisión 2017-2031*. [https://www1.upme.gov.co/Energia\\_electrica/Plan\\_Preliminar\\_Expansion\\_RGT\\_2017\\_2031.pdf](https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Plan_Preliminar_Expansion_RGT_2017_2031.pdf)

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2018). *Informe de gestión 2018*. [https://www1.upme.gov.co/informesgestion/Informe\\_de\\_gestion\\_2018\\_19092018.pdf](https://www1.upme.gov.co/informesgestion/Informe_de_gestion_2018_19092018.pdf)

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2022). *Informe de avance de proyectos de generación – septiembre 2022*. [https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento\\_proyectos\\_generacion/Informe\\_Avance\\_proyectos\\_Generacion\\_Septiembre2022.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento_proyectos_generacion/Informe_Avance_proyectos_Generacion_Septiembre2022.pdf)

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2024). *Plan energético nacional 2024–2054:*

*Infraestructura energética (Tomo I).*

[https://docs.upme.gov.co/demandayeficiencia/Documents/PEN\\_2024\\_2054/PDF5\\_PE\\_Infraestructura\\_Energetica\\_Publicacion\\_Tomo\\_I.pdf](https://docs.upme.gov.co/demandayeficiencia/Documents/PEN_2024_2054/PDF5_PE_Infraestructura_Energetica_Publicacion_Tomo_I.pdf)

Universidad Nacional de Colombia. (n.d.). *Variabilidad espacial y temporal de la radiación*

*solar en Colombia 1997–2019*. Repositorio digital de la Universidad Nacional de

Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83296>

UPS Battery Center. (s.f.). *Weida HXD12-12 12V 12Ah replacement battery*.

<https://www.upsbatterycenter.com/weida-hxd12-12-12v-12ah-f1-battery>

## Apéndices

### Apéndice A

#### *Registro Fotográfico*

#### **Figura 190**

#### *Prueba de Funcionamiento de la Batería, Inversor y Medidor de Consumo*



*Nota.* Pruebas de funcionamiento con los componentes de forma libre.

#### **Figura 199**

#### *Inclinación del Panel Solar en Horas de la Mañana*



*Nota.* Pruebas en campo en horas de la mañana.

**Figura 208**

*Inclinación del Panel Solar en Horas de la Tarde*



*Nota.* Pruebas en campo en horas de la tarde.

**Figura 217**

*Inclinación del Panel Solar a Puesta de Sol*



*Nota.* Pruebas en campo cuando el sol se oculta.

**Figura 226**

*Forma de la Onda de la Señal Senoidal Modificada*



*Nota.* Medición de la forma de onda de la señal senoidal generada por el inversor.

**Figura 233**

*Medición de los Grados de Inclinación del Panel Solar Durante el Día*



*Nota.* Medición de los ángulos de inclinación donde hay mejor captación solar.

**Figura 28**

*Mediciones de las Diferentes Variables Electricas Tomadas en Campo*



*Nota.* Evidencias de las mediciones tomadas en campo de las variables eléctricas.