

Guía metodológica para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico en los rangos de potencia entre los 10 kW a 100 kW, teniendo en cuenta los incentivos que contempla la ley colombiana

Karen Dayana Rodríguez González y Carlos Alberto Vásquez Serrano

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Electricista e Ingeniero Electrónico

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster en Potencia Eléctrica

Codirector

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

A Dios, por darnos paciencia y resiliencia durante la escritura de este trabajo.

A la empresa Ryctel S.A.S, por el apoyo, el conocimiento y la experiencia que ha aportado en el desarrollo de este trabajo.

Al profesor Jaime Barrero, por su apoyo y seguir creyendo en nosotros y en este trabajo de grado.

De Carlos Vásquez,

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A mis padres, por ser mi ejemplo de esfuerzo y amor.

A mis hermanas, por su compañía, alegría y palabras de aliento.

Y a mi pareja, por su paciencia, comprensión y motivación en cada etapa de este proceso.

Este logro también es de ustedes.

De Karen Rodriguez,

Agradezco profundamente a mi familia, cuyo apoyo constante ha sido fundamental en cada etapa de este proceso.

A mi mamá, gracias por confiar en mí. Tu paciencia y comprensión han sido una muestra de amor invaluable.

A mi hermana menor, por su cariño incondicional y por recordarme, con su forma de ser, la importancia de mantener la alegría incluso en los momentos difíciles.

A mis tías, por estar presentes de tantas formas.

A mis amigos, por ser mi red de apoyo incondicional.

Gracias a todas ustedes.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo General.....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Cuerpo del Trabajo.....	13
2.1 Marco Referencial.....	13
2.1.1 Marco Teórico	13
2.1.2 Marco Legal	18
2.1.3 Método.	19
2.1.4 Resultados.....	22
2.1.5 Discusión.....	32
3. Conclusiones.....	34
4. Recomendaciones	38
Referencias Bibliográficas	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Radiación Solar Incidente Promedio por Región	25
Tabla 2. Radiación Solar Incidente Promedio por Colombia, Santander y Bucaramanga.	26
Tabla 3. Presupuesto Sistema fotovoltaico 70kWp.	28
Tabla 4. Impacto Económico de Incentivos de la Ley 1715 (Incentivos)	29
Tabla 5. Resumen de Certificaciones Requeridas.....	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Pasos por seguir para dimensionar los sistemas fotovoltaicos descritos en la guía metodológica.....	21
Figura 2. Curvas de Demanda Diaria por Estrato Socioeconómico según electrificadora local (ESSA).....	22

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Guía metodológica

Apéndice B. Procedimiento simplificado de conexión 030 de 2018

Apéndice C. Procedimiento simplificado de conexión 002 de 2018

Glosario

Autogeneración: uso de la energía generada por el sistema fotovoltaico directamente en el lugar de instalación, reduciendo la compra de energía a la red y potencialmente permitiendo excedentes para venta o almacenamiento.

CAPEX: capex o gasto de capital, se refiere al dinero invertido de una empresa hacia bienes duraderos.

Dimensionamiento: proceso metodológico para determinar el número de módulos, inversores, área requerida, capacidad de baterías (si aplica) y conexión a red.

Eficiencia del Sistema: porcentaje que indica qué fracción de la radiación solar incidente se convierte en energía eléctrica útil, afectado por calidad de componentes, orientación, inclinación y condiciones ambientales.

Factor de Desempeño (PR): relación entre la energía realmente producida y la energía teórica esperada del sistema. Incluye pérdidas por temperatura, suciedad, cables, inversores, etc.

Irradiación Solar: cantidad de energía solar incidente sobre una superficie por unidad de área. Factor clave para estimar la generación de energía en cada región de Colombia.

Módulo Fotovoltaico: panel solar compuesto por celdas que transforman la radiación solar en energía eléctrica en corriente continua (CC).

Perfil de Consumo: análisis de la demanda eléctrica de un usuario (diaria, mensual, anual) para ajustar el tamaño del sistema FV a las necesidades reales de energía.

Potencia Instalada: capacidad nominal del sistema FV medida en kilovatios (kW).

Sistema Fotovoltaico (FV): conjunto de equipos que convierten la energía solar en electricidad mediante módulos solares, inversores, estructuras y sistemas de protección.

Resumen

Título: Guía metodológica para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico en los rangos de potencia entre los 10 kW a 100 kW, teniendo en cuenta los incentivos que contempla la ley colombiana. *

Autor: Carlos Alberto Vásquez Serrano y Karen Dayana Rodríguez González.**

Palabras Clave: FNCE, FNCER, FCE, fotovoltaico, incentivos, SFV, SIN, ZNI

Descripción: Los proyectos de sistemas fotovoltaicos (SFV) para obtener energía eléctrica en el país se han venido incrementando considerablemente. Este avance se debe principalmente al desarrollo de nuevas tecnologías, a los nuevos mercados de fuentes no convencionales de energía (FNCE) y, de manera especial, a los beneficios tributarios de la Ley 1715 del 2014, esto ha originado un entorno perfecto para el progreso de proyectos que aprovechan la energía solar. Ante este panorama, cada vez más empresas, industrias y comunidades recurren a la implementación de sistemas fotovoltaicos, no solo para reducir costos energéticos, sino también para contribuir a la transición energética y la disminución de emisiones contaminantes. Sin embargo, uno de los principales retos que enfrentan los usuarios y promotores de proyectos es garantizar un correcto dimensionamiento de los sistemas, ya que de este proceso depende la eficiencia y rentabilidad de la inversión. Por ello, es necesario desarrollar metodologías de dimensionamiento que sean técnicamente rigurosas y, al mismo tiempo, prácticas, para que puedan ser aplicadas por técnicos con distintos niveles de experiencia. La guía desarrollada en este proyecto ofrece dicha metodología, que integra aspectos técnicos y regulatorios, que podría potenciar los beneficios económicos para las empresas que quieran dedicarse al dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T). Jaime Guillermo Barrero Pérez. Magíster en Potencia Eléctrica. Codirector: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en Ingeniería.

Abstract

Title: Methodological guide for the sizing of a photovoltaic system in the power range from 10kW to 100kW, considering the incentives provided by Colombian law *

Author: Carlos Alberto Vásquez Serrano and Karen Dayana Rodríguez González **

Key Words: FNCE, FNCER, FCE, photovoltaic, incentives, SFV, SIN, ZNI

Description: Photovoltaic system (PV) projects for generating electricity in the country have been increasing considerably. This progress is mainly due to the development of new technologies, new markets for non-conventional energy sources (FNCE), and particularly the tax benefits of Law 1715 of 2014, which has created a perfect environment for the advancement of projects based on the use of solar energy. Given this scenario, more companies, industries, and communities are turning to the implementation of photovoltaic systems, not only to reduce energy costs but also to contribute to the energy transition and the reduction of polluting emissions. However, one of the main challenges facing users and project developers is ensuring the correct sizing of the systems, as the efficiency and profitability of the investment depend on this process. Therefore, it is necessary to develop sizing methodologies that are technically rigorous and, at the same time, practical, so that they can be applied by technicians with different levels of experience. The guide developed in this project offers such a methodology, which integrates technical and regulatory aspects, and could enhance the economic benefits for companies that want to engage in the sizing of photovoltaic systems.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering (E3T). Jaime Guillermo Barrero Pérez. MSc in Electrical Power Engineering. Codirector: María Alejandra Mantilla Villalobos. PhD in Engineering.

Introducción

La década pasada ha marcado un punto de inflexión en cómo se entendía y aprovechaba la energía. Lo que comenzó como una respuesta a la crisis ambiental se ha convertido en una oportunidad real para transformar nuestro modelo energético. Las tecnologías renovables han dejado de ser una curiosidad académica para posicionarse como alternativas serias frente a los combustibles tradicionales (IRENA, 2020). En Colombia, esto cobra especial relevancia dado su potencial solar y los compromisos adquiridos en el Plan de Energías Renovables 2019-2030.

La energía fotovoltaica funciona bajo un principio que, aunque conocido desde hace décadas, sigue siendo sorprendente por su simplicidad: cuando los rayos solares alcanzan una célula fotovoltaica, esta libera electrones que generan corriente eléctrica continua. Un inversor se encarga después de convertir esta corriente para que sea compatible con nuestras redes eléctricas domésticas e industriales (Díaz et al., 2018). El proceso parece directo, pero la realidad es más compleja.

Los módulos fotovoltaicos comerciales actuales presentan eficiencias que oscilan alrededor del 20% o menos. Esta limitación técnica obliga a ser muy precisos en el dimensionamiento de cualquier instalación, especialmente cuando se busca viabilidad económica. No obstante, en países como Colombia, donde la radiación solar es elevada durante la mayor parte del año, esta limitación puede mitigarse mediante un diseño adecuado.

Este trabajo se centra en el diseño de una metodología apropiada para dimensionar instalaciones fotovoltaicas de tamaño medio, específicamente aquellas que operan entre 10 kW y 100 kW de potencia. Además, analiza cómo el marco normativo colombiano y la industria local pueden facilitar el desarrollo de estos proyectos (Congreso de la República de Colombia, 2014). La pregunta central que orienta la investigación es: ¿de qué forma se puede diseñar y

dimensionar estos sistemas, considerando tanto las regulaciones locales como la maximización de beneficios económicos y ambientales?

La motivación detrás de este estudio surge de una necesidad práctica evidente. Ingenieros y empresas interesadas en desarrollar proyectos fotovoltaicos enfrentan un vacío de información práctica y metodológica que les permita tomar decisiones informadas (Castro & Pérez, 2019). Más allá del aspecto técnico, existe un componente social importante: cada instalación fotovoltaica que se implementa correctamente contribuye a reducir emisiones de gases de efecto invernadero y ayuda al país a cumplir sus compromisos climáticos internacionales.

El objetivo es crear una guía práctica que pueda adaptarse a diferentes situaciones y contextos, desde instalaciones comerciales hasta pequeñas plantas industriales.

Los resultados esperados incluyen no solo una mejor comprensión de los aspectos técnicos del diseño fotovoltaico, sino también una evaluación realista de las oportunidades y obstáculos que presenta el mercado colombiano para este tipo de tecnologías. En un país con tanto potencial solar como Colombia, contar con metodologías claras y probadas puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso de la transición energética.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Crear una guía metodológica que describa el procedimiento que podría seguir una empresa para dimensionar un sistema fotovoltaico en los rangos de potencia entre los 10 kW a 100 kW, teniendo en cuenta los incentivos que contempla la ley colombiana

1.2 Objetivos Específicos

1. Describir el procedimiento para la estimación de la demanda energética de un usuario que aspire a implementar un sistema fotovoltaico en los rangos de potencia entre los 10 kW a 100 kW.
2. Describir el procedimiento para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, en el rango de 10 kW a 100 kW, teniendo en cuenta la demanda energética del usuario.
3. Plantear los cálculos necesarios para determinar la energía proporcionada por el sistema fotovoltaico, analizando diferentes aspectos en cuanto a pérdidas, consumo del usuario y excedentes a inyectar a la red.
4. Determinar los incentivos que, bajo el marco legal y regulatorio vigente aplicable a la generación fotovoltaica en Colombia en el rango de 10 kW a 100 kW, favorecen a las empresas dedicadas al dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y a las que adquieren dicho producto.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

La fundamentación teórica, conceptual y legal que sustenta este trabajo sobre el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos de entre 10 kW y 100 kW en Colombia se apoya en una variedad de marcos de referencia que permiten comprender la evolución, el estado actual y el marco regulatorio del sector de energías renovables, específicamente de la energía solar fotovoltaica.

2.1.1 Marco Teórico

2.1.1.1 Fundamentos de la Tecnología Solar Fotovoltaica. La tecnología fotovoltaica solar opera bajo el principio de conversión directa de luz solar en energía eléctrica utilizando materiales semiconductores. Comprender su operación y usos requiere examinar detalladamente los mecanismos físicos que gobiernan estas células, además de los diversos modelos de paneles y elementos que conforman un sistema fotovoltaico integral.

Las células fotovoltaicas —conocidas también como células solares— transforman la luz en corriente eléctrica mediante el fenómeno fotovoltaico. Este proceso se inicia cuando los rayos solares impactan el material semiconductor, típicamente silicio, el cual capta los fotones y produce parejas electrón-hueco (Gao et al., 2019).

La estructura típica de una célula solar consiste en una unión p-n; en esta, los electrones libres y los huecos se separan gracias a un campo eléctrico interno, lo que da lugar a un flujo de corriente eléctrica cuando la célula se conecta a un circuito externo.

Este proceso puede sintetizarse en tres etapas fundamentales:

- Absorción de fotones: La célula captura la radiación solar, generando pares de electrones y huecos.
- Separación de cargas: El campo eléctrico interno en la unión p-n impulsa a los electrones hacia un lado y a los huecos hacia el otro, creando una diferencia de potencial.
- Generación de corriente: Al conectar la célula a una carga externa, los electrones fluyen, produciendo corriente eléctrica útil.

El rendimiento de una célula solar depende de múltiples factores, entre ellos la calidad del material semiconductor, la intensidad de la radiación solar, la temperatura ambiental y las pérdidas internas inherentes al sistema (Green et al., 2018).

Los módulos fotovoltaicos, por su parte, están compuestos por varias células solares conectadas en serie o paralelo y encapsuladas dentro de un marco protector. Existen diferentes tipos, clasificados principalmente según el material semiconductor y el proceso de fabricación:

- Módulos de silicio monocristalino: Fabricados a partir de un único cristal de silicio, estos módulos presentan alta eficiencia, que puede alcanzar entre el 22 % y el 24 %, además de un aspecto uniforme y negro. Son ideales para espacios limitados (Green et al., 2018).
- Módulos de silicio policristalino: Constituidos por múltiples cristales de silicio fundidos, ofrecen una eficiencia algo menor, alrededor del 19 % al 21 %, y se caracterizan por un color azulado moteado. Su costo es más accesible que el de los monocristalinos (Zhang et al., 2020).
- Módulos de silicio amorfo (a-Si): Emplean silicio en estado no cristalino, con eficiencias más bajas, entre el 10 % y el 12 %, pero con mejor rendimiento en condiciones de baja radiación y altas temperaturas. Se utilizan en aplicaciones de menor potencia (Gao et al., 2019).

- Módulos de perovskita: Tecnología emergente que promete alta eficiencia y bajo costo, aunque aún se encuentra en fase de investigación y desarrollo (Zhang et al., 2020).

Un sistema fotovoltaico completo integra diversos componentes que garantizan su funcionamiento óptimo y eficiencia:

- Módulos fotovoltaicos: Fuente primaria de generación de energía, convierten la radiación solar en electricidad de corriente continua (DC).

- Inversor: Transforma la corriente continua generada por los módulos en corriente alterna (AC), compatible con la red eléctrica o para uso en instalaciones autónomas.

- Sistema de montaje: Estructuras que sostienen y orientan los módulos para maximizar la captación solar.

- Sistema de seguimiento (opcional): Dispositivos que ajustan la inclinación y orientación de los módulos a lo largo del día y el año para optimizar la captación.

- Sistema de protección y control: Incluye elementos para protección contra sobretensiones, descargas atmosféricas, desconectores y sistemas de monitoreo que aseguran seguridad y eficiencia.

- Sistema de almacenamiento (opcional): Baterías que permiten almacenar energía para su uso en periodos sin radiación solar.

2.1.1.2 Modelos y Teorías de Dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos. Cuando se habla del dimensionamiento apropiado de una instalación fotovoltaica, no se refiere únicamente a otro procedimiento técnico dentro del proceso de diseño; se está abordando el elemento fundamental que garantiza su desempeño óptimo, viabilidad económica y durabilidad operacional. Para alcanzar este objetivo, los profesionales del sector emplean un conjunto diverso de aproximaciones metodológicas, modelos matemáticos y herramientas computacionales que incorporan parámetros críticos y facilitan la simulación del comportamiento del sistema bajo una amplia gama de condiciones operacionales variables. A continuación, se analizará los componentes esenciales que caracterizan este proceso técnico.

Inicialmente, es necesario evaluar la radiación solar disponible: el volumen de energía luminosa que alcanza la superficie de los paneles solares, medida en kWh/m²/día, determina el potencial energético base del conjunto. Esta radiación presenta comportamientos heterogéneos, variando conforme a la posición geográfica específica, los ángulos de inclinación y orientación de los paneles, así como las características climáticas locales, factores que requieren una evaluación técnica rigurosa (Kumar et al., 2022).

A continuación, se encuentra el perfil de demanda energética del cliente o la carga eléctrica que el sistema debe cubrir, factor que establece los requerimientos de capacidad del conjunto. Durante esta etapa, resulta indispensable realizar un análisis detallado de los comportamientos de consumo diarios y estacionales para lograr un dimensionamiento técnicamente sólido (Liu & Lu, 2019).

Igualmente, relevantes resultan las pérdidas inherentes al sistema, las cuales comprenden desde desviaciones en la orientación y ángulos óptimos, efectos de sombreado parcial o total, variaciones térmicas, resistencias eléctricas internas, hasta el deterioro gradual de módulos y

equipos auxiliares, incluyendo también las pérdidas asociadas a procesos de conversión y transmisión energética. La cuantificación precisa de estas pérdidas resulta crucial para establecer la capacidad real y operativa del sistema (Gao et al., 2019).

Por último, debe incorporarse el coeficiente de seguridad y reservas de diseño: la inclusión de márgenes operacionales para compensar fluctuaciones en la irradiación solar, imprecisiones en la estimación del consumo y eventuales fallas de equipos constituye un aspecto fundamental para asegurar la continuidad del abastecimiento eléctrico.

Respecto a las aproximaciones metodológicas para el dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas, pueden identificarse tres estrategias principales:

- I. Metodología basada en formulaciones empíricas y equilibrios energéticos: Esta aproximación calcula la capacidad requerida del sistema partiendo del consumo energético y la irradiación local disponible, incorporando estimaciones de pérdidas operacionales. Resulta particularmente efectiva durante las fases iniciales de conceptualización del proyecto (Green et al., 2018).
- II. Técnicas de simulación energética computacional: Estas metodologías utilizan registros históricos de irradiación, temperatura ambiente y patrones de consumo para proyectar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operacionales. Facilitan la optimización de parámetros como orientación, inclinación y dimensiones de los módulos, maximizando así la eficiencia global (Kumar et al., 2022).
- III. Modelos de caracterización de componentes: Estas herramientas integran especificaciones técnicas detalladas de módulos fotovoltaicos, inversores y demás elementos del sistema, ofreciendo estimaciones precisas del rendimiento integral.

Consideran efectos térmicos, fenómenos de sombreado y procesos de degradación, entre otros factores relevantes (Gao et al., 2019).

2.1.2 Marco Legal

Desarrollar proyectos solares fotovoltaicos implica adaptarse a leyes y normas que, aunque diferentes en cada lugar, apuntan a metas comunes. Básicamente buscan incentivar energías limpias, garantizar instalaciones seguras, mantener calidad y cuidar el ambiente. También facilitan que más empresas generen energía verde, acelerando la transición a un futuro sostenible, como explican García y Torres (2023) en su último trabajo.

Globalmente, instituciones como la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) crean estándares técnicos, como la norma IEC 62446-1, que fijan requisitos para inspeccionar, verificar y documentar proyectos fotovoltaicos. Estas pautas son claves para asegurar instalaciones eficientes y seguras, reduciendo riesgos y mejorando funcionamiento, afirma la IEC (2022).

En nuestro país, la Ley 1715 de 2014 y reglamentos asociados promueven energías limpias, simplificando trámites y dando incentivos a quienes venden excedentes de su energía solar, como explica el Ministerio de Minas y Energía (2020).

2.1.2.1 Marco legal en Colombia. Para impulsar la energía solar fotovoltaica en Colombia, es clave contar con un marco normativo integral que cubra todo el proceso, desde la generación hasta el consumo, adaptándose a las características y desafíos locales, pero tomando como referencia regulaciones internacionales.

La Ley 1715 de 2014, conocida como Ley de Energías Renovables, se creó para fomentar el uso de tecnologías limpias en el país a través de beneficios fiscales e incentivos para proyectos solares, como explica la CREG (2020).

Luego, en 2019, la Ley 1955 vino a reforzar estas regulaciones, poniendo metas claras para aumentar la participación de las energías renovables en la matriz energética del país y fomentando un uso más eficiente de la energía (Congreso de Colombia, 2019).

En el 2018 la CREG expide la resolución 030, en la que se regula la forma de comercializar energía a pequeña escala al sistema de distribución por parte de autogeneradores y generadores distribuidos, y en el 2021 se hace una actualización de esta en la resolución 002. Esta nueva regulación ajustó aspectos técnicos, procesos y las tarifas, con el objetivo de facilitar aún más la incorporación de proyectos de autoconsumo y generación de energía eléctrica en el país, así como promover la integración de energías renovables en la matriz energética. Además, en Colombia se siguen estándares tanto internacionales como nacionales, como las normas IEEE, RETIE y la NTC 2050, que aseguran que las instalaciones fotovoltaicas sean seguras, confiables y de buena calidad (ICONTEC, 2018).

Desde la planificación, el gobierno establece metas claras mediante el Plan Nacional de Desarrollo y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), que diseña estudios, incentivos y programas específicos para promover la energía solar, especialmente en zonas rurales y comunidades alejadas donde el acceso a la electricidad representa un desafío importante (Presidencia de Colombia, 2022; UPME, 2020)

2.1.3 Método.

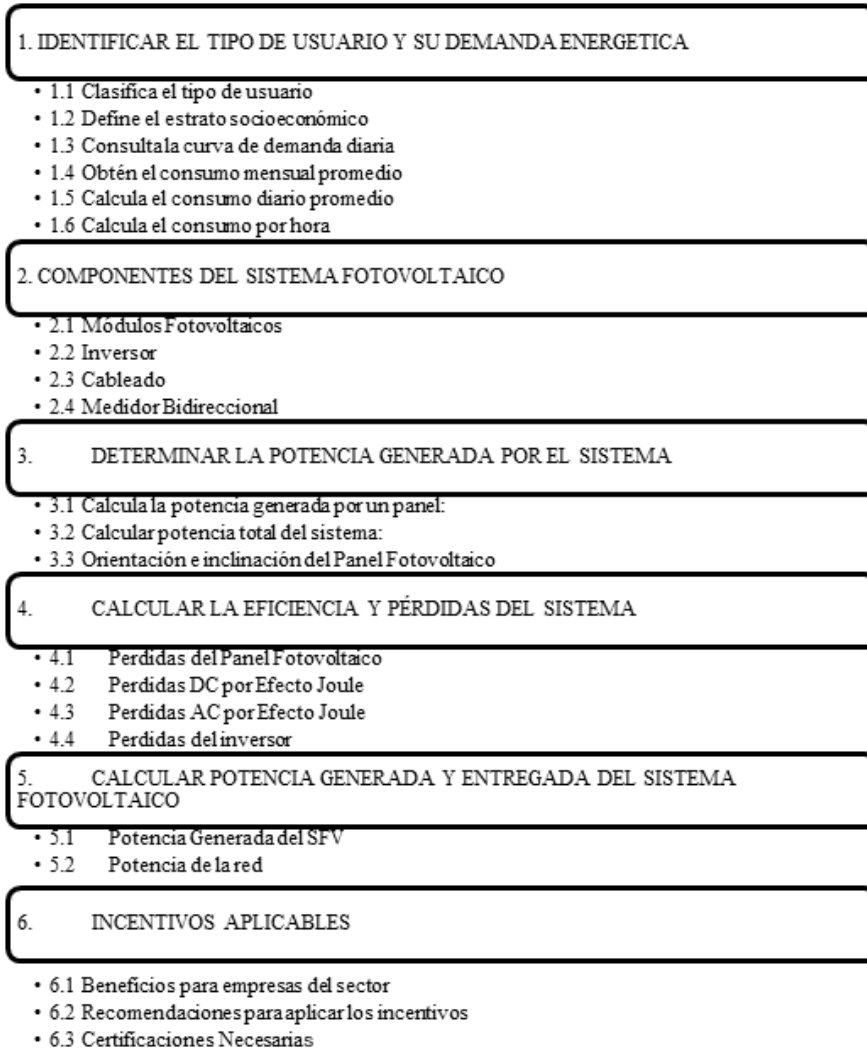
Para iniciar, se realizó una revisión exhaustiva de la normativa colombiana vigente relacionada con energías renovables, en particular la legislación que promueve el uso de sistemas fotovoltaicos y los incentivos asociados. La Ley 1715 de 2014 es la base legal que impulsa la integración de fuentes no convencionales de energía renovable, como la solar, al sistema energético nacional, estableciendo beneficios tributarios y facilidades para su adopción

(Ambiente Solar, 2024). Además, el Decreto 1073 de 2015 y sus adiciones recientes, como el Decreto 2025, reglamentan programas como Colombia Solar, que buscan fomentar la autogeneración de energía limpia en estratos socioeconómicos bajos, garantizando un marco legal claro y accesible para los usuarios (Ministerio de Minas y Energía, 2025; MinEnergía, 2025). Esta revisión normativa fue fundamental para asegurar que la guía no solo tuviera un enfoque técnico, sino que también estuviera alineada con el marco legal vigente, lo cual es clave para la viabilidad, financiamiento y sostenibilidad de los proyectos solares en el país (CREG 034, 2024).

Posteriormente, se estructuró la guía en etapas claras y progresivas que reflejan el proceso real de diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos (Ilustración 1). En la primera etapa, se identifica el tipo de usuario y su demanda energética, clasificando su perfil, estrato socioeconómico y analizando su curva de consumo diario, mensual y horario. La segunda etapa aborda los componentes del sistema fotovoltaico, detallando los módulos, el inversor, el cableado y el medidor bidireccional. En la tercera etapa, se determina la potencia generada por el sistema, calculando la potencia individual y total de los paneles, además de definir su orientación e inclinación óptimas. La cuarta etapa se centra en calcular la eficiencia y pérdidas, considerando las pérdidas en paneles, líneas DC y AC, y el inversor. En la quinta etapa se muestran las fórmulas teóricas para calcular la potencia generada por el sistema y la que se podría integrar a la red. Finalmente, en la última etapa se recopilan y analizan documentos legales sobre dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, incentivos fiscales y normativas aplicables en Colombia (Ley 1715 de 2014). Esta organización facilita la comprensión y aplicación práctica, evitando que el usuario se sienta abrumado por información técnica excesiva y promoviendo una

implementación exitosa. Estas etapas en la guía son definidos como seis (6) pasos y sus respectivos sub pasos por seguir para realizar un dimensionamiento de un sistema fotovoltaico.

Figura 1. Pasos por seguir para dimensionar los sistemas fotovoltaicos descritos en la guía metodológica.



Nota. Estos son los pasos que se encuentran en la guía metodológica.

2.1.4 Resultados.

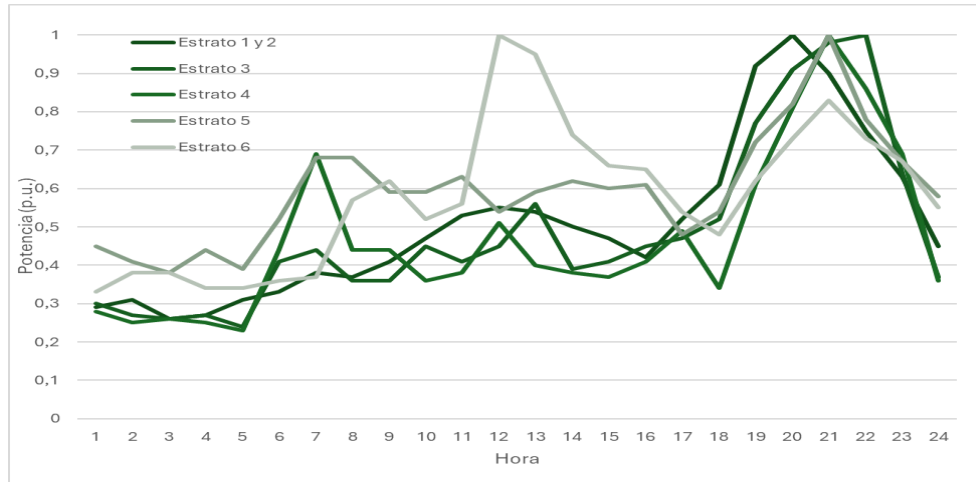
2.1.4.1 Análisis de Demanda Energética. El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico procura cubrir la demanda energética del usuario, durante el día. Por lo que en primera instancia debe conocerse dicho consumo, para ello puede observar el consumo energético de su factura de energía eléctrica más alto en los últimos seis meses o podría calcular consumo energético promedio recopilando las facturas de energía durante los últimos seis meses anteriores.

Después de obtener dicho valor se puede obtener el consumo diario equivalente, aplicando una metodología de conversión que consistió en dividir el valor de consumo mensual registrado entre los 30 días que conforman el mes promedio.

2.1.4.1.1 Curvas de Demanda Diaria. Para un adecuado análisis de la demanda de potencia de un determinado usuario fue necesario caracterizar dicho usuario, en cuanto a su nivel socioeconómico, y así poder estimar su consumo en potencia. En las normas técnicas del operador local deberán aparecer las curvas de demanda diaria, donde se puede observar cómo se distribuye el consumo energético mensual promedio entre los diferentes estratos de usuarios residenciales.

En la *Ilustración 2* se pueden apreciar las curvas de demanda diaria, que se refiere a la representación gráfica de cómo se distribuye el consumo eléctrico a lo largo de las 24 horas del día. Este consumo es un promedio de acuerdo con el estrato económico por el operador local, quien hace las mediciones del consumo energético a lo largo de un día.

Figura 2. Curvas de Demanda Diaria por Estrato Socioeconómico según electrificadora local (ESSA).



Nota. Se observa el consumo hora a hora según el estrato. Adaptado de Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (ESSA, 2021).

Las curvas muestran patrones típicos con picos de consumo matutinos (6:00-8:00 AM), del mediodía (12:00-1:00 PM) y vespertinos (6:00-9:00 PM). Estas pueden ser obtenidas de las normas técnicas de la electrificadora que aplique en la ubicación de donde sea desea realizar la instalación del sistema fotovoltaico.

La variable E_T corresponde a la energía total que se deriva de la curva normalizada proporcionada por el operador de red local.

A través del desarrollo de los cálculos correspondientes, se pudo establecer que la determinación de la potencia base (P_{base}) utilizando la relación matemática $P_{base} = E_{día}/E_T$ facilita el proceso de normalización de las curvas de demanda particulares de cada usuario analizado.

2.1.4.2 Espacio disponible y el recurso solar. Es necesario realizar un levantamiento físico del espacio en cubiertas, terrazas o áreas abiertas que el usuario disponga. Para ello se emplean herramientas como planos arquitectónicos, mediciones directas o incluso sistemas de información geográfica y aplicaciones de modelado 3D, que permiten estimar de manera precisa la superficie útil.

Es importante resaltar que no toda el área medida es aprovechable. Factores como sombras proyectadas por edificaciones, árboles, antenas u otros obstáculos reducen el espacio efectivo y, en consecuencia, deben ser considerados mediante estudios de soleamiento. Asimismo, se debe dejar una franja libre de seguridad para labores de mantenimiento y circulación del personal, lo que disminuye entre un 10 % y un 20 % la superficie inicialmente calculada.

La orientación de los módulos fotovoltaicos debe realizarse hacia el ecuador terrestre: sur geográfico en el hemisferio norte y norte geográfico en el hemisferio sur. Esta disposición se deriva de la trayectoria solar aparente y maximiza la captación de radiación directa a lo largo del día.

El ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos se determina principalmente en función de la latitud del sitio de instalación. Una práctica ampliamente documentada en la literatura consiste en igualar el ángulo de inclinación a la latitud geográfica, con el fin de maximizar la captación anual de radiación solar (Calabrò, 2013). En zonas cercanas al ecuador, donde el recorrido solar es más alto, se utilizan inclinaciones reducidas (aproximadamente entre 5° y 15°), mientras que en latitudes medias el valor óptimo suele coincidir con la latitud local.

2.1.4.2.1 Radiación Solar Incidente. La radiación solar en un sitio específico puede determinarse a partir de bases de datos meteorológicas y satelitales que incluyen variables como la irradiancia global horizontal (GHI), la irradiancia directa normal (DNI) y la irradiancia difusa.

A nivel internacional, una de las plataformas más utilizadas es el Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), desarrollado por el Joint Research Centre de la Comisión Europea. Este sistema permite consultar el recurso solar en cualquier ubicación mediante coordenadas geográficas o selección en mapa, y genera simulaciones del rendimiento energético de sistemas fotovoltaicos bajo diferentes configuraciones (Huld et al., 2012). La plataforma está disponible en: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) publica registros climatológicos que incluyen radiación solar y que pueden emplearse en estudios de recurso a nivel local. La información correspondiente a los datos de radiación solar registrados en las distintas regiones del territorio colombiano se ha consolidado en la Tabla 1.

Tabla 1. Radiación Solar Incidente Promedio por Región

Región	Radiación Promedio (kWh/m²/día)	Desviación Estándar (%)	HSP (horas)
Caribe	5.8	±0.8	5.8
Andina	4.7	±0.9	4.7
Pacífica	4.2	±1.1	4.2
Orinoquía	5.1	±0.7	5.1
Amazonía	4.5	±0.9	4.5

Nota. HSP horas solar pico. Adaptado de Atlas de Radiación Solar de Colombia (IDEAM, UPME, MinMinas, 2005).

Tabla 2. Radiación Solar Incidente Promedio por Colombia, Santander y Bucaramanga.

	Radiación Promedio (kWh/m²/día)	Desviación Estándar (%)	HSP (horas)	Fuente
Colombia	4.3	±6	4.3	Global Solar Atlas / Solargis
Santander	4.0	±6	4.0	Atlas solar nacional + Solargis
Bucaramanga	4.1	±7	4.1	PVGIS / Global Solar Atlas (coordenadas urbanas)

Nota. Las siglas (HSP) hacen referencia a las Horas Sol Pico equivalentes registradas en cada región. La información presentada refleja los valores promedio anuales que se determinaron mediante el análisis exhaustivo de los registros meteorológicos históricos recopilados durante una década de observaciones sistemáticas. Adaptado de World Bank Group, Global Solar Atlas (Solargis), 2025.

2.1.4.3 Energía generada.

2.1.4.3.1 Potencia Total del Sistema Fotovoltaico. Para determinar la potencia total que genera el sistema fotovoltaico, se empleó la expresión matemática.

$$P_{TOT} = N * P_{Gen}$$

En la cual N corresponde a la cantidad de paneles instalados y P_{Gen} equivale a la potencia que produce cada panel individual, por lo que la potencia total generada por un arreglo de paneles en un sistema fotovoltaicos es la multiplicación de la cantidad de paneles instalados por la potencia en watts que cada uno de ellos genere.

2.1.4.3.2 Pérdidas en el Sistema Fotovoltaico. Pérdidas del Panel Fotovoltaico: mediante los cálculos de las pérdidas que se presentan en los paneles fotovoltaicos, se tomaron en cuenta

tres parámetros fundamentales: la eficiencia nominal ($\eta\%$), la constante beta (β) y la variación de temperatura (ΔT).

Pérdidas por efecto Joule: Mediante los cálculos de las pérdidas por efecto Joule, se examinaron tanto las que ocurren en corriente continua como en corriente alterna, teniendo en cuenta las variaciones en los calibres de los conductores empleados y las diferentes distancias de instalación contempladas en el diseño.

Pérdidas en inversores: varían con el nivel de carga; los micro inversores son más eficientes a baja carga, mientras que inversores string y centrales lo son cerca de su potencia nominal.

2.1.4.3.3 Potencia Generada del Sistema Fotovoltaico. Para determinar la potencia neta que efectivamente produce el sistema fotovoltaico ($P_{Gen-SFV}$), se procedió a sustraer del valor de potencia total generada todas aquellas pérdidas que fueron identificadas y cuantificadas durante el análisis.

2.1.4.3.4 Balance Energético del Sistema. Para evaluar el equilibrio energético que se establece entre la generación y el consumo, se aplicó la expresión matemática $P_{grid} = P_{Gen-SFV} - P_{load}$ durante todo el proceso de análisis.

2.1.4.4 Análisis de incentivos. Partiendo de una estimación preliminar de precios para un sistema fotovoltaico con capacidad instalada de 70 kWp y un inversor central de 70 kW nominales, se elaboró un presupuesto detallado de los componentes principales y los costos asociados a la instalación. La selección de esta configuración se fundamenta en la correspondencia entre la potencia pico de los módulos y la capacidad del inversor, garantizando un dimensionamiento técnico adecuado que permita un rendimiento energético óptimo.

El presupuesto se estructuró considerando seis bloques fundamentales: paneles solares, inversor, estructuras, componentes eléctricos, instalación e ingeniería. Los equipos principales se cotizaron en una búsqueda rápida en internet, mientras que los demás bloques se contemplaron en un porcentaje con respecto a los equipos principales. (Horowitz, Ramasamy, Macknick, & Margolis, 2020).

Tabla 3. Presupuesto Sistema fotovoltaico 70kWp.

	Porcentaje con respecto a módulos	Cantidad	Precio unitario (COP)	Precio total (COP)
Paneles solares 620				
W	-	113	\$ 570.000,00	\$ 64.410.000,00
Inversor trifásico				
ON-GRID 70 kW	-	1	\$ 20.770.350,00	\$ 20.770.350,00
Estructura	25%	-	-	\$ 16.102.500,00
Componentes				
eléctricos	60%	-	-	\$ 38.646.000,00
Instalación	45%	-	-	\$ 28.984.500,00
Ingeniería	100%	-	-	\$ 64.410.000,00
TOTAL				\$ 233.323.350,00

Nota. Presupuesto con respecto a los paneles solares.

Teniendo en cuenta los incentivos relevantes de la Ley 1715 se puede considerar un total estimado de ahorro del presupuesto realizado en la tabla 3. Que contemplaría lo siguiente:

- Por renta deducción: **±35 millones COP**
- Por exención de aranceles/IVA: **±23 millones COP**
- Por depreciación acelerada / otros beneficios fiscales: **±3-5 millones COP** adicionales en los primeros años.

Para una estimación total de ahorro: $\pm 60-65$ millones COP. Lo que significa una recuperación del 30 % de la inversión inicial por la aplicación de la ley 1715.

2.1.4.4.1 Aplicación de Incentivos de la Ley 1715. Al examinar la implementación de los beneficios tributarios establecidos en la Ley 1715 de 2014, se evidenciaron ventajas económicas considerables para aquellos proyectos de autogeneración que se encuentran dentro del rango de capacidad entre 10 kW y 100 kW. En la Tabla 1 se ha documentado el impacto económico que genera cada uno de los incentivos contemplados en dicha normativa.

Tabla 4. Impacto Económico de Incentivos de la Ley 1715 (Incentivos)

	Descripción	Ahorro (% del CAPEX)	Tiempo de Aplicación
Deducción Renta	50% del valor invertido	50%	15 años
Exclusión IVA	0% IVA en equipos	19%	Inmediato
Exención			
Aranceles	0% aranceles importación	5-15%	Inmediato
Depreciación			
Acelerada	Hasta 33.33% anual	NA	Durante depreciación
Deducción Renta	50% del valor invertido	50%	15 años

Nota. Es importante mencionar que los porcentajes de ahorro experimentan variaciones que dependen de la configuración tributaria particular que maneja cada empresa, así como del país o región de procedencia de los equipos que se utilizan en la instalación del sistema fotovoltaico. Adaptado de Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

La deducción de renta es el mayor aporte económico que representa la Ley 1715 de 2014, ya que es un 50% del valor invertido. La exclusión del IVA evita que el proyecto aumente su valor final. La exención de aranceles hace que los equipos principales que en su mayoría no son fabricados en Colombia, cuenten con un mejor precio. La depreciación acelerada, aunque no represente un ahorro real en sumas finales, si ayuda a que las empresas tengan un flujo de caja mayor en los primeros años.

2.1.4.4.2 Certificaciones Requeridas. Durante la evaluación del proceso de certificación, se identificaron tanto los tiempos de tramitación como los costos asociados que caracterizan a cada modalidad de certificación que debe obtenerse.

Tabla 5. Resumen de Certificaciones Requeridas

	Entidad Emisora	Tiempo Promedio	Costo Aproximado	Vigencia
Beneficio Ambiental	MINAMBIENTE	30-45 días	\$500,000 \$1,200,000	- 5 años
Exclusión IVA	MINAMBIENTE/UPME	15-30 días	\$300,000 - \$800,000	Por proyecto
Exención Arancelaria	MINMINAS/DIAN	15 días	\$200,000 - \$500,000	Por importación
Proyecto FNCER	UPME	20-40 días	\$400,000 - \$900,000	Permanente
Beneficio Ambiental	MINAMBIENTE	30-45 días	\$500,000 \$1,200,000	- 5 años

Nota. En la estimación de costos se han contemplado tanto las tasas administrativas que cobran las entidades competentes como los honorarios por concepto de asesoría técnica especializada requerida para el proceso. Cabe señalar que los plazos de tramitación pueden experimentar variaciones dependiendo del grado de complejidad técnica que presente cada proyecto en particular. Adaptado de Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014.

2.1.4.4.3 Impacto Normativo y Económico (Ley 1715 de 2014). Los incentivos tributarios y financieros asociados representan ahorros significativos:

Exclusión de IVA (19%) y aranceles (5–15%): efecto inmediato en la reducción del CAPEX.

Deducción de renta (50%) y depreciación acelerada (hasta 33.33% anual): mejoran la rentabilidad en el mediano plazo. Los trámites de certificación, aunque generan costos y tiempos administrativos, son esenciales para acceder a dichos beneficios y asegurar la viabilidad legal del proyecto.

Los resultados demuestran que en Colombia existe un alto potencial técnico, económico y regulatorio para la implementación de sistemas fotovoltaicos residenciales y comerciales entre 10 kW y 100 kW. La caracterización detallada del consumo, sumada al aprovechamiento del recurso solar y al respaldo de la Ley 1715, garantiza no solo la sostenibilidad energética, sino también la viabilidad financiera de este tipo de proyectos, consolidando su relevancia dentro de la transición energética nacional. (Congreso de la República de Colombia, 2014)

2.1.5 *Discusión.*

2.1.5.1 Limitaciones y Validez de las Conclusiones. Al usar las curvas de demanda estándar que son proporcionadas por los operadores de red, aunque esto facilitó el trabajo, es probable que no se esté capturando la diversidad real en el consumo energético de cada usuario individual.

Esto indica que los hallazgos encontrados funcionan bien como una primera aproximación - son útiles para evaluar si un proyecto tiene sentido desde el punto de vista general. Sin embargo, si alguien quiere hacer ajustes más precisos o tomar decisiones finales de inversión, probablemente necesite realizar estudios más específicos sobre los patrones de consumo reales.

Al calcular las pérdidas por temperatura y tener en cuenta la información de radiación incidente, se tomaron datos en condiciones ambientales promedio, lo que significa que posiblemente se esté pasando por alto cuánto puede variar realmente el rendimiento del sistema a lo largo del año. En otras palabras, los cálculos realizados podrían estar siendo demasiado optimistas o pesimistas según la época y el lugar.

Esta simplificación puede ser problemática, especialmente en lugares donde el clima cambia drásticamente entre estaciones. Por ejemplo, un sistema que funciona bien en primavera podría tener un rendimiento muy diferente durante el verano intenso o el invierno frío, y nuestro análisis actual no refleja completamente estas fluctuaciones.

Lo que conlleva que las predicciones realizadas sobre cuánta energía va a generar el sistema pueden no ser tan precisas como se quisiera, particularmente en regiones donde el clima es muy variable. Para proyectos en estas zonas, sería recomendable hacer un análisis más detallado que considere los extremos climáticos, no solo los promedios.

2.1.5.2 Consecuencias Teóricas y Aplicaciones Prácticas. Los resultados obtenidos abren puertas interesantes en varios campos de estudio. Desde el punto de vista de la ingeniería energética, confirman algo importante: sí se pueden usar los modelos tradicionales para predecir cómo van a funcionar los paneles solares en climas tropicales, lo cual es una buena noticia.

Sin embargo, también se ha podido notar que hay espacio para mejorar. Específicamente, los modelos usados para calcular cuánta eficiencia podrían perderse por el calor no están capturando completamente lo que pasa en la realidad tropical.

Esta situación dice que los fundamentos teóricos están sólidos, pero es necesario afinar los detalles. Para futuros proyectos en regiones similares, esto da a entender que se puede confiar en el enfoque general, aunque valdría la pena invertir tiempo en desarrollar modelos térmicos más precisos para estas condiciones específicas.

Desde el punto de vista económico, los hallazgos encontrados confirman algo que muchos políticos esperaban: los incentivos tributarios sí funcionan para motivar a la gente y empresas a invertir en tecnologías limpias.

Desde la perspectiva de planificación energética, los resultados pintan un panorama prometedor: la energía solar distribuida - es decir, paneles solares en casas y empresas - puede jugar un papel importante en el futuro energético de Colombia. Los números sugieren que se podría estar hablando de una contribución realmente significativa al total de energía que produce el país.

2.1.5.3 Implicaciones para Futuras Investigaciones. Los resultados encontrados abren puertas para futuras investigaciones que podrían ayudar a entender mejor cómo se comportan los paneles solares en nuestro país. Una de las cosas más llamativas que se encontró es que cada región de Colombia tiene recursos solares diferentes.

Lo que indica que es necesario desarrollar herramientas de predicción mucho más inteligentes - modelos que entiendan que en un barrio específico las nubes llegan todos los días a una hora determinada, o que en una ciudad la brisa del mar cambia las condiciones cada tarde.

Aunque los incentivos del gobierno sí están funcionando para motivar la instalación de paneles solares, ahora surge una pregunta importante: ¿qué va a pasar en los próximos años? Es necesario estudios que acompañen durante varios años para saber si este impulso inicial se mantiene o no. Se quiere entender si estas políticas van a crear un cambio duradero o solo un entusiasmo temporal.

Sin embargo, este trabajo también ha mostrado algo importante: cambiar la forma en que Colombia genera su energía es mucho más complicado de lo que parece a primera vista. No es solo un problema de ingeniería, ni solo un tema económico, ni únicamente un asunto de políticas públicas. Es todo aquello junto.

3. Conclusiones

A lo largo de este proyecto, se buscó enfrentar un problema complejo, pero altamente relevante: ¿cómo determinar el tamaño ideal de sistemas de paneles solares para instalaciones medianas, específicamente aquellas entre 10 kW y 100 kW? Este rango es especialmente importante porque representa una oportunidad clave para diversificar las fuentes de energía en nuestro país.

Para lograrlo, se combinaron diferentes enfoques de trabajo. Primero, se revisó exhaustivamente lo que otros investigadores habían descubierto antes. Después, se analizaron casos reales de instalaciones que ya están funcionando en Colombia, lo que dio una perspectiva práctica muy valiosa. Finalmente, se desarrolló una guía práctica que pudiera orientar a profesionales en los cálculos necesarios, importantes a tener en cuenta a la hora de dimensionar sistemas fotovoltaicos, teniendo además en cuenta los beneficios que proporciona la ley colombiana.

El resultado fue lo que se buscaba desde el principio: una metodología que fuera tanto práctica como técnicamente sólida. Se buscaba lograr un resultado que facilitara la materialización de más instalaciones solares en Colombia. En la experiencia adquirida durante el desarrollo de este proyecto y la adquirida en la práctica empresarial en la empresa Ryctel S.A.S., se ha podido encontrar que tanto la guía diseñada como el presente documento constituyen un valioso aporte para el uso de metodologías específicas para el dimensionamiento de tamaño mediano de sistemas fotovoltaicos.

Con el conocimiento adquirido durante el desarrollo de este proyecto ha motivado a promover en las empresas del sector eléctrico la inversión en proyectos de diseño de sistemas fotovoltaicos, a raíz del abundante recurso solar disponible en Colombia y los beneficios económicos que podrían obtenerse de incentivos gubernamentales en su implementación.

Con el procedimiento que se ha desarrollado en este proyecto se puede determinar con mayor precisión cuánta energía necesita realmente cada usuario. Se ha analizado no solo cuánto consume en promedio, sino también cuándo consume más durante el día y cómo cambian estos patrones según la época del año.

Durante el desarrollo de la guía metodológica se ha descubierto que el enfoque propuesto podría ayudar en tres aspectos cruciales.

Primero, permite hacer una inversión inicial más inteligente. Segundo, maximiza los beneficios que el gobierno está ofreciendo, como las exenciones de impuestos y la depreciación acelerada - cosas que pueden representar ahorros significativos pero que muchos no aprovechan completamente. Tercero, da mucha más certeza sobre qué esperar del sistema solar una vez instalado, lo cual es fundamental para que tanto inversionistas como usuarios se sientan tranquilos con su decisión.

Uno de los logros más destacados de este trabajo es la creación de una guía metodológica útil tanto para ingenieros que inician su práctica profesional en energía solar, como para aquellos que ya tienen experiencia que buscan perfeccionar sus métodos de trabajo. Esta guía puede ser usada para verificar cálculos o explorar enfoques que quizá no se habían considerado previamente.

Sin embargo, es importante recalcar que lo que se hizo fue el desarrollo de una guía metodológica para orientar a profesionales del sector en el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos de mediano tamaño, maximizando la recuperación de la inversión monetaria; esta guía toca los aspectos más importantes a la hora de dimensionar sistemas fotovoltaicos de forma teórica, pero no se debe confundir con una herramienta de software que realiza el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

Al estandarizar la forma en que se hacen estos cálculos, se crea un lenguaje común en el sector. Lo que supone que será más fácil entrenar a nuevos profesionales, compartir experiencias entre colegas, y que los proyectos tengan una calidad más consistente independientemente de quién los diseñe.

Se considera que esta metodología puede marcar una diferencia real en comunidades locales y regionales. Especialmente en las zonas rurales y apartadas de Colombia, donde llevar fuentes convencionales de energía tiene un alto costo económico, tener una forma confiable de dimensionar sistemas solares podría cambiarle la vida a muchas familias y comunidades.

Y, por otro lado, cada sistema solar que se instale ayuda a reducir emisiones de carbono, y esta metodología es un aporte para que estos diseños se hagan de forma correcta, y asimismo se espera que esta herramienta sea consultada en futuros proyectos de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

En pocas palabras, lo que se hizo fue resolver un problema real que tenía el sector energético colombiano. Durante mucho tiempo, la industria solar ha estado atrapada entre dos extremos: o se hacían cálculos muy técnicos que sonaban perfectos en teoría, pero no funcionaban en la realidad, o se usaban métodos tan simplificados que los proyectos terminaban fallando.

La metodología planteada encuentra ese punto medio - mantiene el rigor técnico que los proyectos requieren, pero al mismo tiempo es algo que realmente se puede usar en el día a día, con las limitaciones y desafíos que enfrentan los profesionales en el campo.

Los resultados obtenidos se encuentran en línea con los objetivos planteados desde el inicio. Sin embargo, más allá de cumplir metas académicas, se busca contribuir a un propósito mayor: generar mayor confianza en la tecnología solar. Cuando las empresas observan que los proyectos funcionan según lo prometido y que los resultados coinciden con la realidad, aumenta la probabilidad de que más personas y organizaciones decidan adoptar esta tecnología.

4. Recomendaciones

Las recomendaciones derivadas de la presente investigación buscan fortalecer tanto el proceso de diseño como la implementación y gestión de sistemas fotovoltaicos en el rango de 10 kW a 100 kW, considerando el contexto técnico, normativo y económico colombiano. En primer lugar, es fundamental que cualquier proyecto inicie con un diagnóstico energético detallado, en el que se analicen minuciosamente los perfiles de consumo y las variaciones estacionales de la demanda. Este análisis permitirá ajustar el dimensionamiento del sistema a las necesidades reales del usuario, evitando así problemas de subdimensionamiento o sobredimensionamiento, que pueden afectar la viabilidad técnica y económica del proyecto. Además, la caracterización precisa de la radiación solar local, apoyada en herramientas como PVGIS^{††}, resulta esencial para seleccionar la ubicación, orientación e inclinación óptimas de los módulos fotovoltaicos, maximizando el aprovechamiento del recurso solar disponible y la eficiencia global del sistema.

La selección de componentes certificados y de alta calidad debe ser una prioridad, ya que no solo garantiza la seguridad y durabilidad de la instalación, sino que también facilita el acceso a incentivos y el cumplimiento de la normativa nacional. Es recomendable que todos los elementos del sistema, desde los paneles hasta los inversores y sistemas de monitoreo, cuenten con certificaciones reconocidas y provengan de proveedores acreditados. Asimismo, la incorporación de sistemas de monitoreo en tiempo real y la programación de mantenimientos preventivos periódicos permitirán detectar y corregir oportunamente cualquier anomalía, asegurando la continuidad y el óptimo desempeño del sistema durante toda su vida útil.

^{††} PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). (s. f.). Herramienta online de estimación de desempeño fotovoltaico. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en_joint-research-centre.ec.europa.eu

Desde la perspectiva normativa y económica, es indispensable que los desarrolladores y propietarios de sistemas fotovoltaicos conozcan y gestionen activamente los incentivos contemplados en la Ley 1715 de 2014, tales como la deducción de renta, la depreciación acelerada y la exención de IVA. Estos beneficios pueden mejorar notablemente la rentabilidad del proyecto, por lo que su correcta aplicación debe ser parte integral de la planificación. Igualmente, se debe cumplir rigurosamente con la regulación técnica y de conexión establecida por la CREG y otras autoridades, obteniendo todas las certificaciones y permisos requeridos antes de la puesta en marcha del sistema. Para la toma de decisiones, se recomienda realizar un análisis financiero detallado, empleando indicadores como el Costo Nivelado de Energía (LCOE), el periodo de recuperación de la inversión y la tasa interna de retorno, lo que permitirá comparar alternativas y seleccionar la opción más conveniente.

Además, se recomienda que las personas dedicadas a la instalación y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos tengan en cuenta que el sistema eléctrico actual fue diseñado pensando en un flujo de energía en una sola dirección: desde las grandes plantas generadoras hacia los consumidores. Con los paneles solares, esto cambia completamente, donde lo más recomendable sería instalar contadores de energía bidireccionales.

A los colegas especializados en el tema de diseño de sistemas fotovoltaicos se les invita a participar en la construcción de políticas en el país que favorezcan que dichos trámites, para que sean construidos por personas con conocimientos reales en el tema y de alguna forma fluya la tramitación de los debidos permisos y certificaciones requeridas.

Finalmente, se sugiere que la metodología desarrollada sea revisada y actualizada periódicamente, considerando los avances tecnológicos y los cambios en la regulación. La formación continua de los equipos técnicos y la exploración de nuevas soluciones, como la

integración con sistemas de almacenamiento y microrredes, contribuirán a maximizar los beneficios de la energía solar y a consolidar la transición hacia un modelo energético más sostenible y resiliente en Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Ambiente Solar. (2024, noviembre 7). Ambiente Solar. <https://ambientesolar.com.co/normatividad-energia-solar-colombia/>
- ANDI. (2019). ANDI. <https://www.andi.com.co/Uploads/CARTILLA-INCENTIVOS-TRIBUTARIOS-ENERGI%CC%81A-RENOVABLE.pdf>
- ANSI. (2017). American National Standards Institute.
- BOE. (2013). Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es>
- Calabrò, Emanuele, An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation, *Journal of Renewable Energy*, 2013, 307547, 12 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/307547>
- Castro, L., & Pérez, M. (2019). *Diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos*. Editorial Universidad Nacional.
- Chen, S., Zhang, H., & Li, Y. (2021). Recent advancements and future prospects of perovskite solar cells: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 226, 111071. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111071>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2017). Resolución CREG 095 de 2017: Condiciones técnicas y comerciales para la conexión y operación de sistemas de generación distribuida. <https://www.creg.gov.co>

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (n.d.). Resolución CREG 021 de 2020: Reglas para la participación de generadores de energía en el mercado de energía en Colombia. <https://www.creg.gov.co>

Comisión Electrotécnica Internacional. (2019). Comisión Electrotécnica Internacional. <https://www.iec.ch>

Congreso de Colombia. (2019). Ley 1955 de 2019: Reforma regulatoria para la promoción de energías renovables y eficiencia energética. Diario Oficial No. 51.448. <https://dapre.presidencia.gov.co>

Congreso de la República. (2014). Presidencia.gov.co.

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

Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715. Presidencia.gov.co: <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%201715%20DE%202014.pd>

CRE. (2019). Agencia Reguladora del Sector Eléctrico (CRE). <https://www.cre.gob.mx>

CREG. (2017). Comisión de Regulación de Energía y Gas. <https://www.creg.gov.co>

CREG. (2020). Comisión de Regulación de Energía y Gas. <https://www.creg.gov.co>

CREG. (2024). Comisión de Regulación de Energía y Gas. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/concepto_creg_0002401_2025.htm

Cuenca, A., Oña, C., Suquillo, I., & Miniguano, H. (2023). Metodología de Diseño de Sistemas Aislados de Energía Solar Fotovoltaica para Áreas Rurales en Ecuador. Revista Técnica "energía", 20(1), 43-51. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.537>

- Díaz, R., Morales, J., & Torres, P. (2018). Análisis técnico de sistemas fotovoltaicos. *Revista Energías Renovables*, 12(3), 45-59.
- Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (2021). Marco general norma urbana (NTG-02). Versión 01. ESSA. <https://www.essa.com.co/site/Portals/proveedores/ntg-02%20marco%20general%20norma%20urbana.pdf?ver=2025-05-12-171759-263>
- Espitia, C. (2017). Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia. *Revista Colombiana de Energías Renovables*, 23(3), 45-60.
- European Commission. (2024). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-photovoltaic-geographical-information-system_en
- Fuentes, O., & Romero, M. (2023). Procedimiento para el dimensionamiento de sistemas autónomos de generación de energía solar fotovoltaica. *Revista de Energías Renovables y Sostenibilidad*, 12(1), 78-89.
- Gao, Q., Wang, H., & Li, Y. (2019). Advances in photovoltaic cell technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.005>
- García, E., & Torres, J. (2023). Normativas y retos en proyectos solares fotovoltaicos para la generación distribuida. *Revista de Energías Renovables*.
- Givler, T. (2005). NREL's. Retrieved 6 13, 2025, from <https://www.nrel.gov>

- Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2018). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(7), 3-12. <https://doi.org/10.1002/pip.3010>
- Hernández, H. (2024). Metodología Basada en Opciones Reales para la Valoración de Proyectos de Instalaciones de Sistemas Fotovoltaicos en Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud. Universidad de la Costa, Barranquilla. <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/f33783a9-c337-4a0d-8829-f05dc64dd100/content>
- Horowitz, K., Ramasamy, V., Macknick, J., & Margolis, R. (2020). Capital costs for dual-use photovoltaic installations: 2020 benchmark for ground-mounted PV systems with pollinator-friendly vegetation, grazing, and crops (NREL/TP-6A20-77811). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77811.pdf>
- ICONTEC. (2018). NTC 2050: Instalaciones eléctricas de baja tensión — Requisitos para instalaciones fotovoltaicas. Bogotá, Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. IDEAM.
- IRENA. (2020). International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2020>
- ISO. (2018). International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/69426.html>

- Jiang, Z., Song, J., Li, L., Chen, W., & Wang, Z. (2021). Analisis Perangkat Lunak PVSYST, PVSOL dan HelioScope dalam Perancangan Sistem Energi Surya. <https://media.neliti.com/media/publications/349175-analisis-perangkat-lunak-pvsyst-pvsol-da-3b71451c.pdf>
- Khatib, T., Ma, X., & Zhang, C. (2018). Optimal design and energy analysis of a photovoltaic system considering environmental factors. *Renewable Energy*, 123, 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.035>
- Kumar, P., Sharma, S., & Singh, G. (2022). Recent trends and future prospects of photovoltaic systems integrated with energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112075. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112075>
- Liu, Y., & Lu, L. (2019). Modeling and optimization of solar photovoltaic systems considering site-specific conditions. *Energy Conversion and Management*, 198, 111-764. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111764>
- Liu, Y., Zhang, H., & Chen, Z. (2020). Cost reduction and efficiency improvement in photovoltaic technologies: A review. *Applied Energy*, 278, 115-666. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115666>
- López, P., García, M., & Hernández, R. (2020). Técnicas de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos: una revisión actualizada. *Revista de Energías Renovables*, 24(1), 45-58. <https://doi.org/10.1234/rer.2020.0123>
- Martínez, L., & Cristancho, L. (2021). Diseño de un sistema de energía solar fotovoltaico en las instalaciones del edificio "D" de las UTS. *Revista de Ingeniería y Tecnologías Energéticas*, 15(2), 110-125.

MINEM. (2019). Ministerio de Energía y Minas (MINEM). <http://www.gob.pe/minem>

MinEnergía. (2025, enero 1). MinEnergía. <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/minenerg%C3%ADa-firma-decreto-que-pone-en-marcha-el-programa-colombia-solar-para-generar-energ%C3%ADa-limpia-en-estratos-1-2-y-3/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Resolución 0549 de 2020: Por la cual se reglamenta el artículo 12 de la Ley 1715 de 2014. MINAMBIENTE.

Ministerio de Energía y Minas. (2020). Ministerio de Energía y Minas. <https://www.minenergia.gov.co>

Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto 1073 de 2015: Reglamento técnico y administrativo del sector eléctrico colombiano. <https://www.minminas.gov.co>

Ministerio de Minas y Energía. (2018). Plan Energético Nacional 2020-2050. Unidad de Planeación Minero Energética.

Ministerio de Minas y Energía. (2019). <https://www.minminas.gov.co>

Ministerio de Minas y Energía. (2025, febrero 28). Ministerio de Minas y Energía. https://www.minenergia.gov.co/documents/13280/2025-02-28_Decreto_Colombia_Solar.pdf

MINREL. (2016). Ministerio de relaciones exteriores. <https://www.minrel.gob.cl>

Naciones Unidas. (2015). Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

NREL. (2023). System Advisor Model (SAM). <https://sam.nrel.gov>

Pérez, J. (2019). Guía para el dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos conectados y aplicación de la resolución CREG 030 de 2018 para inyectar excedentes de energía a la red. *Revista Colombiana de Energía*, 29(4), 35-50.

Presidencia de Colombia. (2022). Presidencia de Colombia. <https://www.presidencia.gov.co>

pv-magazine-latam. (2025). pv-magazine-latam. <https://www.pv-magazine-latam.com/2025/02/18/establecen-en-colombia-nuevas-reglas-para-proyectos-de-generacion-con-conexion-al-sistema-interconectado-nacional/>

PVsystem. (2021). PVsystem software for PV system design and simulation: <https://www.pvsystem.com>

Rodríguez González, K. D., & Vásquez Serrano, C. A. (2025). Guía metodológica para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico en los rangos de potencia entre los 10 kW a 100 kW, teniendo en cuenta los incentivos que contempla la ley colombiana [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. https://drive.google.com/file/d/1N_jgv5o_FbyRDlxe8lAD2MEppdIHP4F4/view?usp=drive_link

Sánchez, A., & Gómez, L. (2020). Eficiencia y optimización en sistemas fotovoltaicos. *Revista Ingeniería Energética*, 25(2), 78-85.

SENER. (2021). Secretaría de Energía (SENER). <https://www.gob.mx/sener>

SENER. (2021). Secretaría de Energía (SENER).

UNFCCC. (2015). Naciones Unidas (UNFCCC). <https://unfccc.int>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2023). Planes y programas para la promoción de energías renovables en Colombia. <https://www.upme.gov.co>

UPME. (2014). Upme.gov.co. <https://www.upme.gov.co/energias-renovables>

UPME. (2020). Unidad de Planeación Minero Energética. <https://www.upme.gov.co>

UPME. (2023). Unidad de Planeación Minero Energética. <https://www.upme.gov.co>

Valentin Software. (2025, 6 13). PVSol. <https://www.valentin-software.com/en/products/pvsol>

Wang, Z., Li, Y., & Chen, J. (2021). High-efficiency photovoltaic devices: Advances and future outlook. *Advanced Materials*, 33(12), 2006-954. <https://doi.org/10.1002/adma.202006954>

World Bank Group. (2025). Global Solar Atlas (powered by Solargis). <https://globalsolaratlas.info>

Yajure-Ramírez, C., & Rojas-Aranguren, J. (2023). Metodología para la evaluación de desempeño de plantas solares fotovoltaicas a través del uso de la ciencia de datos. 35(1), 120-136. <https://doi.org/10.37815/rte.v35n1.1011>

Zhang, H., Liu, Y., & Li, Y. (2020). Perovskite solar cells: Opportunities and challenges. *Materials Today*, 39, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.01.018>