

Herramienta computacional para la evaluación del potencial solar en zonas rurales:
aplicación al departamento de Santander

Miguel Ángel Arias Pimiento y Diego Andrés Ramírez Corredor

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Gabriel Ordóñez Plata

Doctor Ingeniero Industrial, área Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi familia, el verdadero motor detrás de cada paso que di en este camino.

A mis padres, Javier y Mireya, por ser mi base firme, mi refugio y mi impulso. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por enseñarme que el esfuerzo constante y el amor profundo son capaces de sostener cualquier sueño. Su apoyo no fue solo material, fue emocional, espiritual y cotidiano. Cada logro que hoy celebro es también suyo.

A mis hermanos, Javier y Laura, por estar conmigo en cada etapa, especialmente en los momentos más difíciles. Su compañía fue abrigo en los días de incertidumbre, y su alegría, luz en los momentos de cansancio. Me sostuvieron con palabras, con gestos, con presencia. Este logro también les pertenece.

A mi tía Isolina, que me quiso como a un hijo y que, aunque ya no está físicamente con nosotros, vive en mí. A mi tío Miguel, por compartir ese afecto y por estar ahí con generosidad y cercanía. A sus hijos, mis primos Santiago y Daniela, que más que primos han sido hermanos para mí. Su apoyo incondicional, su compañía y su confianza han sido fundamentales en este proceso. Gracias por estar siempre. Los cuatro han sido parte esencial de mi camino, y este logro también les pertenece.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme las herramientas académicas y humanas para crecer como profesional y como persona.

A mis docentes, por su guía, exigencia y paciencia. En especial al director de este trabajo, Gabriel Ordóñez, por su orientación clara y su confianza en mi criterio técnico.

A mis compañeros de carrera Aurelio y César, que más que compañeros se han convertido en mis mejores amigos. Gracias por compartir conocimientos, por ayudarme a aprender, por estar presentes en cada etapa de este camino académico.

A Sebastián, por estar ahí cuando más lo necesitaba. Su apoyo, su disposición y su compañía marcaron una diferencia en los momentos más duros.

A Silvia, por su valioso aporte profesional desde la psicología. Gracias por ayudarme a abrir mi visión, por enriquecer este trabajo con tu perspectiva humana y por mostrarme que el conocimiento también se construye desde el interior.

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Marco de referencia del trabajo de grado.....	14
2.1 Pobreza energética	14
2.2 Pobreza multidimensional.....	17
2.2.1 Significado y relación con pobreza energética	17
2.2.2 Análisis de pobreza multidimensional	17
2.3 Necesidades básicas insatisfechas (NBI)	18
2.4 Comunidades energéticas.....	19
2.5 VBA: Visual Basic for Applications.....	20
3. Potencial energético solar en Santander.....	21
3.1 Potencial energético solar	21
3.2 Términos claves	21
3.3 Criterio de selección de municipios.....	22
3.4 Datos recolectados mediante Zuhpower	22
3.4.1 Municipio El Carmen de Chucurí	23
3.4.2 Municipio de Macaravita	25
3.4.3 Municipio de Puerto Wilches.....	26

4. Desarrollo técnico de Zuhepower	27
4.1 Metodología de desarrollo	28
4.1.1 Análisis de requerimientos.....	28
4.1.2 Diseño del software.....	28
4.1.3 Implementación.....	28
4.2 Características principales	29
4.2.1 Interfaz de usuario.....	29
4.2.2 Documentación	29
4.2.3 Datos solares	30
4.2.4 Datos de demanda	30
4.2.5 Procesamiento	31
4.2.6 Cerrar	32
4.3 Funciones principales.....	32
4.3.1 Cálculos de demanda	32
4.3.2 Obtención del ángulo óptimo y pérdidas por inclinación	34
4.3.3 Cálculos de la generación de energía eléctrica y del número de paneles fotovoltaicos requeridos.....	36
5. Modelo de construcción de una comunidad energética	37
5.1 Estudio de viabilidad de la zona	37
5.2 Cálculo de la demanda energética.....	38

5.3 Determinación del número de paneles necesarios	38
5.3.1 MPPT	39
5.4 Inversores	40
5.5 Baterías	40
5.6 Cables.....	41
5.7 DPS	42
5.8 Interruptores automáticos (“Breakers”)	42
6. Aspecto social	43
6.1 Calidad de vida	44
6.2 Acceso equitativo.....	45
6.3 Cohesión social	45
7. Conclusiones y recomendaciones	46
7.1 Conclusiones	46
7.2 Recomendaciones	48
Referencias bibliográficas.....	51

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Pobreza energética nivel nacional datos IMPE</i>	15
Tabla 2 <i>Pobreza energética de Santander datos IMPE</i>	16
Tabla 3 <i>Municipios con mayores porcentajes de pobreza multidimensional</i>	17
Tabla 4 <i>Municipios y criterios de selección</i>	22
Tabla 5 <i>Clasificación de la HSP para la base de datos</i>	23
Tabla 6 <i>Datos HSP Carmen de Chucuri con Zuhepower</i>	24
Tabla 7 <i>Datos HSP Macaravita con Zuhepower</i>	25
Tabla 8 <i>Datos HSP puerto Wilches con Zuhepower</i>	26
Tabla 9 <i>Efectos de los tipos de conexiones de paneles fotovoltaicos</i>	39
Tabla 10 <i>Efectos de tensión, corriente y potencia en el MPPT</i>	39

Lista de figuras

Figura 1 <i>Parámetros principales y subparametros específicos</i>	15
Figura 2 <i>Interfaz de documentación</i>	30
Figura 3 <i>Interfaz de los datos de radiación solar</i>	30
Figura 4 <i>Interfaz de los datos de la demanda</i>	31
Figura 5 <i>Interfaz de procesamiento de datos</i>	31

Resumen

Título: Herramienta computacional para la evaluación del potencial solar en zonas rurales: aplicación al departamento de Santander *

Autores: Miguel Angel Arias Pimiento, Diego Andrés Ramírez Corredor **

Palabras Clave: Herramienta computacional, comunidad energética, sostenibilidad, pobreza energética, Zuhepower.

Descripción: En Colombia persisten altos índices de pobreza energética, especialmente en las zonas rurales. Para contribuir a solucionar esta problemática, este trabajo de grado se centra en el análisis del potencial energético de varias zonas rurales del departamento de Santander. Como resultado, se desarrolló una herramienta computacional (denominada Zuhepower) diseñada para facilitar la toma de decisiones sobre alternativas de comunidades energéticas. Esta herramienta procesa datos solares de plataformas como NASA POWER y PVGIS, estructurando la información para un acceso rápido. Además, de organizar los datos del potencial solar regional, permite calcular la demanda de consumo y estimar la generación energética proyectada con la información de un panel solar específico.

Al implementar este modelo, los usuarios disponen de un sistema integral que facilita el acceso a información clave, optimizando la gestión de sus recursos y la adquisición de equipos para sistemas fotovoltaicos. El objetivo final de esta iniciativa es reducir la pobreza energética a través de un análisis eficiente y la promoción de alternativas sostenibles en la región.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Gabriel Ordóñez Plata. Doctor Ingeniero Industrial, área Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Computational tool for the evaluation of solar potential in rural areas: application to the department of Santander. *

Author(s): Miguel Angel Arias Pimiento, Diego Andrés Ramírez Corredor**

Key Words: Computational tool, energy communities, sustainability, energy poverty, Zuhepower.

Description: In Colombia, high levels of energy poverty persist, especially in rural areas. To help address this issue, this undergraduate thesis focuses on analyzing the energy potential of several rural zones in the department of Santander.

As a result, a computational tool (called Zuhepower) was developed to support decision-making regarding energy community alternatives. This tool processes solar data from platforms such as NASA POWER and PVGIS, structuring the information for quick access. In addition to organizing regional solar potential data, it allows users to calculate consumption demand and estimate projected energy generation based on the specifications of a given solar panel.

By implementing this model, users have access to an integrated system that facilitates access to key information, optimizing the management of their resources and the acquisition of equipment for photovoltaic systems. The ultimate goal of this initiative is to reduce energy poverty through efficient analysis and the promotion of sustainable alternatives in the region.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: Gabriel Ordóñez Plata, PhD in Industrial Engineering, Electrical Engineering Area.

Introducción

La transición energética y la promoción de comunidades energéticas son pilares para alcanzar la equidad social, la sostenibilidad ambiental y el empoderamiento de los usuarios. Sin embargo, en Colombia, y particularmente en las zonas rurales de Santander, aún persisten desafíos significativos, como la pobreza energética, la pobreza multidimensional y las necesidades básicas insatisfechas, que limitan el desarrollo integral y el crecimiento económico de las familias.

En este contexto, el trabajo de grado presenta el programa Zuhepower. Esta herramienta, desarrollada en Visual Basic para Aplicaciones (VBA), realiza un análisis detallado de los datos de irradiación solar del lugar estudiado, proporcionando información clave para evaluar la viabilidad de sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, el trabajo incluye recomendaciones técnicas para la selección adecuada de equipos y el cumplimiento de la normativa vigente. Aunque el estudio se centra en Santander, el objetivo principal es sentar las bases para un modelo replicable en otras regiones del país, contribuyendo así a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y acelerando la transición energética nacional.

Con relación a la organización del documento, el Capítulo 1 presenta los objetivos: general y específicos y en el Capítulo 2 se realiza una descripción de los términos de referencia del trabajo de grado como: pobreza energética, pobreza multidimensional, comunidades energéticas y el programa Visual Basic for Applications (VBA).

El Capítulo 3 presenta la elaboración de la base de datos sobre la irradiación solar en algunos municipios de Santander, utilizando herramientas de la página NASA Power y el programa Zuhepower.

Por otra parte, en este Capítulo 4 se describe el desarrollo del programa Zuhepower, que permite: la organización de datos solares, el cálculo del ángulo óptimo de inclinación, la potencia demandada diaria efectiva, el cálculo de la potencia generada por un panel y el número de paneles solares necesarios para cubrir la demanda de energía establecida.

Los capítulos 5 y 6 resumen los pasos requeridos para la creación de una comunidad energética y los diferentes desafíos sociales a resolver para mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas zonas rurales.

Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones del trabajo de grado y algunas recomendaciones para la posible continuidad de trabajos de grado en esta temática.

1. Objetivos

En este capítulo se establecen el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo de grado.

1.1 Objetivo general

Diseñar una herramienta computacional para evaluar la viabilidad de la generación con energía solar en zonas rurales del departamento de Santander.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis de la pobreza energética y su impacto en las comunidades rurales de Santander.
- Crear una base de datos de irradiación solar para evaluar el potencial fotovoltaico de los municipios seleccionados por su necesidad energética.
- Desarrollar una herramienta computacional para el análisis de la prefactibilidad de implementación de sistemas solares fotovoltaicos considerando la posibilidad de creación de comunidades energéticas.

2. Marco de referencia del trabajo de grado

En este capítulo se introduce el concepto de pobreza energética, comenzando con su definición y un análisis de la situación que enfrenta Colombia en este ámbito. También se revisa el concepto de necesidades básicas insatisfechas (NBI), para finalizar con la definición de comunidades energéticas y su importancia en la reducción de la pobreza energética lo cual constituye la base del problema que se propone resolver para la región de Santander. Al final del capítulo se hace una breve descripción programa Visual Basic for Applications (VBA) plataforma utilizada para desarrollar la herramienta computacional.

2.1 Pobreza energética

Este término no puede atribuirse a un creador en específico, ya que describe una situación que afecta a una o más personas. Sin embargo, es importante destacar a la investigadora Brenda Boardman, quien abordó este tema en su libro *Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth* (1991) [1]. En esta obra, la pobreza energética se define como la incapacidad de un hogar para mantener una temperatura adecuada debido a la falta de ingresos monetarios y a la ineficiencia energética. Con el paso del tiempo, y considerando el contexto socioeconómico de cada región del mundo, el concepto de pobreza energética ha ido evolucionado [1]. Hoy en día, se entiende como la privación de servicios energéticos de calidad, los cuales son esenciales para satisfacer las necesidades básicas humanas, como la iluminación, la cocción y refrigeración de alimentos y el acondicionamiento térmico de lugares para lograr el confort de las personas.

Para entender el impacto de la pobreza energética en el país se requiere analizar los datos y estadísticas de fuentes privadas y oficiales como el IMPE (índice multidimensional de pobreza energética) la cual es una iniciativa creada por Promigas.

El IMPE organiza los parámetros en forma jerárquica. Tiene 4 parámetros principales y cada uno se desglosa en subparámetros específicos, esta información se encuentra en el documento *Índice Multidimensional de pobreza energética* [5]. La Figura 1 presenta los parámetros considerados para valorar el IMPE.

Figura 1

Parámetros principales y subparametros específicos.



Tomado de (IMPE, 2022, pág. 9)

Teniendo en cuenta los parámetros de evaluación del IMPE, se tiene que en el país el porcentaje de pobreza energética en los años 2022 y 2023 son los presentados en la Tabla 1.

Tabla 1

Pobreza energética nivel nacional datos IMPE

Año	Porcentaje de pobreza energética	Número de personas en pobreza energética	Población total de Colombia
2022	16,9%	8,7 millones	51,9 millones
2023	16,1%	8,4 millones	52,2 millones

En la Tabla 1 se observa una mejora del 4,12%, lo que significa que aproximadamente 360.900 personas lograron dejar de ser pobres energéticos. En el año 2023, la composición de la

pobreza energética se distribuyó de la siguiente manera: el 34% relacionado con el acceso y calidad de la energía eléctrica, 24,9% vinculado a la vivienda funcional y liberadora de tiempo, junto con el 33,5% que corresponda aprender y comunicarse y por último el 4,9% corresponde al territorio equipado para el bienestar.

Para obtener información sobre pobreza energética en el departamento de Santander, el IMPE dispone de un documento titulado “*Fichas Departamentales IMPE*” que contiene datos específicos para cada departamento de Colombia [5]. En la Tabla 2 se presentan los datos del departamento de Santander.

Tabla 2

Pobreza energética de Santander datos IMPE

Año	Porcentaje de pobreza energética	Número de personas en pobreza energética	Población total de Santander
2022	11,3%	263.779	2.334.336
2023	11%	258.812	2.346.113

Tomado de IMPE, 2022

Entre los años 2022 y 2023 se observa una reducción relativa del 1,88% en el número de personas en situación de pobreza energética. Esto equivale a que, para el año 2023, 4.967 personas lograron salir de esta condición en comparación con el año 2022. La composición de la pobreza energética de Santander en el año 2023 fue del 34,1% relacionado con el acceso y calidad de la energía eléctrica, 29,9% vinculado a la vivienda funcional y liberadora de tiempo, 34% corresponde a aprender y comunicarse; y el 2% corresponde al territorio equipado para el bienestar. De esta forma el departamento de Santander está en los indicadores de pobreza por debajo de la media nacional.

2.2 Pobreza multidimensional

En este apartado se aborda el tema de pobreza multidimensional, que considera: las necesidades básicas insatisfechas, la relación con la pobreza energética y el análisis de los datos de pobreza multidimensional en Colombia y Santander, utilizando como base la información del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [2].

2.2.1 Significado y relación con pobreza energética

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la pobreza multidimensional se define como una medida que evalúa las privaciones que enfrentan los hogares en cinco dimensiones y quince indicadores claves [2]. Estas dimensiones incluyen: educación, salud, trabajo, condiciones de la niñez y juventud, y acceso a servicios públicos y vivienda. La pobreza energética agrava las carencias medidas por la pobreza multidimensional por la limitación del acceso de servicios básicos esenciales para el bienestar.

2.2.2 Análisis de pobreza multidimensional

Utilizando los datos proporcionados por el DANE y la herramienta del Geovisor disponible en su página oficial, es posible analizar la situación de pobreza multidimensional tanto a nivel nacional como en los municipios del departamento de Santander. Esta herramienta permite ver las privaciones que se presentan múltiples hogares de los municipios de Santander.

Tabla 3

Municipios con mayores porcentajes de pobreza multidimensional en Santander

Municipios	Porcentaje de pobreza multidimensional (%)
Florián	56
El Peñón	57,8
Carmen de Chucurí	58,9

Gámbita	51,1
Jordán Sube	53,7
Coromoro	53,6
Onzaga	55,1
Macaravita	50,3
Santa Bárbara	53,8
Guaca	60,3
Carcasí	60,8
Colombia	12,1

La Tabla 3 presenta los municipios del departamento de Santander con el mayor porcentaje de pobreza multidimensional, todos ellos con índices que superan el 50%. Este análisis resalta las áreas más afectadas y proporciona información para enfocar esfuerzos en la reducción de dichas privaciones. Respecto a la pobreza multidimensional a nivel nacional, esta se sitúa en un 12,1%. Sin embargo, al desglosar por áreas, se evidencia que en las zonas urbanas el porcentaje es del 8,3%, mientras que en las zonas rurales asciende al 25,1%, lo que representa una diferencia de 16,8 puntos porcentuales. Esto refleja claramente que la mayor parte de la pobreza multidimensional se concentra en las zonas rurales.

2.3 Necesidades básicas insatisfechas (NBI)

Otro aspecto a considerar está relacionado con las necesidades básicas insatisfechas, que permiten establecer un indicador para medir la pobreza en base a la falta del acceso a algunos servicios o recursos esenciales que garantizan la calidad de vida como: la calidad de vivienda y su infraestructura, disponibilidad de servicios básicos (agua potable, energía eléctrica, acueducto), acceso a educación y condiciones económicas del hogar. Según los datos del DANE [2], los municipios de Santander con el mayor porcentaje de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) son: Carmen de Chucurí, con un 43%; Puerto Wilches, con un 32%; y Florián, con un 31%.

Como dato relevante extraído del proyecto de grado titulado “Propuesta de una metodología para caracterizar la pobreza energética en la región de Santander”, realizado por Olarte & Cruz, 2023, se identifica que el municipio con la menor cobertura del servicio eléctrico en el departamento de Santander es Macaravita, con un índice de cobertura del 92,41% [9].

2.4 Comunidades energéticas

Como una alternativa para mitigar los problemas de pobreza, se proponen la creación de comunidades energéticas constituidas por personas, entidades o usuarios que colaboran para generar, gestionar y consumir energía de manera eficiente y sostenible. Este modelo busca fomentar la participación activa de la comunidad en el manejo de recursos energéticos, aprovechar fuentes renovables, y promover beneficios sociales, económicos y ambientales, alineándose con los principios de sostenibilidad, inclusión y equidad.

En el contexto colombiano, las comunidades energéticas están definidas por el Artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 y el Decreto 2236 de 2023, en el marco del Plan Nacional de desarrollo 2023-2026. Estos documentos definen a las “comunidades energéticas como agrupaciones de usuarios o potenciales usuarios energéticos que generan, comercializan y/o usan energía de manera eficiente, utilizando fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) y combustibles renovables” [11].

Adicionalmente, la Resolución 40137 de 2024, emitida por el Ministerio de Minas y Energía, complementa esta definición al incluir criterios específicos para focalizar y priorizar las comunidades energéticas [8]. Esta normativa enfatiza aspectos como la pobreza energética, dirigida a comunidades con acceso limitado o nulo a servicios energéticos; la equidad de género, promoviendo la inclusión y participación de las mujeres en proyectos energéticos; y los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET) y Zonas Más Afectadas por el Conflicto (ZOMAC),

regiones identificadas por el gobierno como prioritarias para el desarrollo debido a su afectación por el conflicto armado y la pobreza.

2.5 VBA: Visual Basic for Applications

Visual Basic for Applications (VBA) es un lenguaje de programación integrado en Microsoft Excel y otras aplicaciones de Office, la herramienta fue diseñado para automatizar tareas o conjunto de tareas y mejorar la funcionalidad de las hojas de cálculo. Su uso ha sido ampliamente extendido en el ámbito de la ingeniería y la gestión de datos debido a su capacidad para optimizar procesos repetitivos y analizar grandes volúmenes de información de manera eficiente.

VBA fue seleccionado como la plataforma de programación debido a sus múltiples ventajas. Entre los aspectos positivos que respaldan esta elección, se destacan:

- Integración con Excel: Al estar integrado en el Excel la herramienta permite trabajar directamente con datos estructurados, facilitando la realización de cálculos y análisis sin necesidad de software adicional.
- Automatización de procesos: Reduce el tiempo en la ejecución de tareas repetitivas, mejorando la eficiencia.
- Facilidad de uso y accesibilidad: la consola de programación es amigable para realizar el código y comprensible para quienes tienen bases de programación, lo que permite su implementación sin necesidad de herramientas avanzadas.
- Flexibilidad en cálculos personalizados: Posibilita la creación de algoritmos adaptados a las necesidades específicas del usuario, lo cual permite realizar modificaciones de acuerdo a los requerimientos del usuario.

3. Potencial energético solar en Santander

En el capítulo anterior, se abordaron temas relacionados con la pobreza energética, la pobreza multidimensional y las necesidades básicas insatisfechas, con el propósito de comprender el problema que debe ser resuelto en el departamento de Santander. En este capítulo, se llevará a cabo la elaboración de una base de datos sobre la irradiación solar en algunos municipios de Santander, utilizando herramientas de la página NASA Power y el programa Zuhepower, desarrollado por los autores del trabajo de grado. El objetivo es analizar la viabilidad de la generación de energía solar en estos municipios.

3.1 Potencial energético solar

El potencial energético solar se refiere a la capacidad de un lugar para aprovechar la energía del sol mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos o tecnología térmica. Este potencial depende de factores como la radiación solar, el ángulo óptimo de incidencia, la altitud, la latitud y las condiciones climáticas del lugar, tales como la temperatura, la humedad, la nubosidad y las precipitaciones, entre otras.

3.2 Términos claves

Se abordarán sucintamente los significados de los términos: hora solar pico, irradiación y ángulo óptimo, utilizados en el desarrollo de este documento.

- ***Hora solar pico:*** La Hora Solar Pico o HSP es el tiempo equivalente durante el cual la radiación solar alcanza una intensidad de 1 kW/m^2 en un día.
- ***Ángulo óptimo:*** El ángulo óptimo es la inclinación ideal que debe tener el panel fotovoltaico para garantizar la máxima captación de energía solar.
- ***Irradiación:*** La irradiación es la cantidad total de energía solar que incide en una superficie en un periodo de tiempo específico (horas, días, etc..).

3.3 Criterio de selección de municipios

Para la selección de los municipios analizados en este estudio, se consideran los datos de DANE en el Capítulo 2 de este documento donde se trata la pobreza multidimensional y las necesidades básicas insatisfechas [2].

Tabla 4

Municipios seleccionados y criterios para su selección

Municipio	Criterio
Macaravita	Cobertura de servicio eléctrico, pobreza multidimensional
Puerto Wilches	NBI
Carmen de Chucurí	NBI, pobreza multidimensional

Tomado de DANE, 2024.

En la Tabla 4 se presentan los tres municipios seleccionados y los criterios de selección que se cumplen. Macaravita fue seleccionado por ser el municipio con menor cobertura del servicio eléctrico y por su alto índice de pobreza multidimensional. El municipio de Puerto Wilches fue seleccionado debido a que presenta uno de los tres peores índices de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI). Por último, el municipio de Carmen de Chucurí fue incluido al tener el peor índice de NBI y el tercer peor índice de pobreza multidimensional. Adicionalmente, estos tres municipios se encuentran ubicados en diferentes pisos térmicos.

3.4 Datos recolectados mediante Zuhepower

Para realizar el análisis de la información, se utilizó el software Zuhepower con el fin de generar una base de datos específica para los tres municipios seleccionados: Macaravita, Puerto Wilches y Carmen de Chucurí. Este programa permite analizar información solar relevante, seleccionando 15 puntos aleatorios en cada municipio como muestra representativa.

A través de los datos de NASA POWER y del procesamiento de datos en Zuhepower, se obtuvieron tres variables principales para cada punto, hora solar pico, la hora solar pico cuando se tiene en cuenta las pérdidas por inclinación, el valor del ángulo óptimo y el valor de la latitud de cada punto.

Se establece una clasificación de la hora solar pico con el objetivo de determinar si el parámetro es bajo, medio o alto. Esto permite evaluar con menor incertidumbre la viabilidad de la generación de energía mediante paneles solares fotovoltaicos en cada uno de los municipios.

En la Tabla 5 se presentan los valores establecidos de la hora solar pico para realizar la clasificación de la radiación solar. Para obtener estos valores se consideró: la radiación solar media en Colombia, umbral de eficiencia de paneles solares y el ángulo óptimo.

Tabla 5

Clasificación de la HSP para la base de datos

HSP	Clasificación
< 3	Baja
3 a 5	Media
>5	Alta

3.4.1 Municipio El Carmen de Chucurí

El municipio de El Carmen de Chucurí, ubicado en el departamento de Santander, se encuentra en una zona montañosa a una altitud media de aproximadamente 500 metros sobre el nivel del mar (msnm). Según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), El Carmen de Chucurí presenta una temperatura media anual de 24,1 °C, una humedad relativa moderada y una precipitación anual significativa debido a su ubicación en una región de alta pluviosidad [4].

Tabla 6*Datos HSP Carmen de Chucuri con Zuhepower*

HSP Carmen de Chucuri				
Lugar	HSP promedio	HSP con pérdidas de inclinación	Ang Optimo (°)	Latitud (°)
1	5,0625	5,00175	8,2018	6,5244
2	5,0625	5,00175	8,2046	6,5285
3	5,0625	5,00175	8,2239	6,5565
4	5,0625	5,00175	8,2352	6,5728
5	5,0625	5,00175	8,2423	6,5831
6	5,0625	5,00175	8,2446	6,5865
7	5,0625	5,00175	8,2498	6,594
8	5,0625	5,00175	8,272	6,6261
9	5,0625	5,00175	8,2771	6,6336
10	5,0625	5,00175	8,272	6,6261
11	5,0625	5,00175	8,2729	6,6274
12	5,0625	5,00175	8,2738	6,6288
13	5,0625	5,00175	8,2752	6,6308
14	5,0625	5,00175	8,3034	6,6717
15	5,0625	5,00175	8,3054	6,6745

En la Tabla 6 se presentan los valores de Horas Sol Pico (HSP) promedio para el municipio analizado. Este valor, independientemente de las variaciones geográficas dentro del área, se mantiene constante en 5,0625 kWh/m²/día, lo que, según la clasificación establecida en la Tabla 5 del documento, corresponde a una categoría alta.

Al considerar las pérdidas por inclinación, el valor ajustado de HSP es de 5,00175 kWh/m²/día, manteniéndose igualmente en la categoría alta según la misma clasificación.

Adicionalmente, se observa que el rango de variación de HSP dentro del municipio va desde un mínimo de 4,8 kWh/m²/día hasta un máximo de 5,32 kWh/m²/día, lo que reafirma la consistencia del recurso solar disponible y su potencial para aplicaciones fotovoltaicas.

3.4.2 Municipio de Macaravita

El municipio de Macaravita, ubicado en el departamento de Santander, se encuentra en una región montañosa a una altitud media de 2270 metros sobre el nivel del mar (msnm). Según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el DANE, Macaravita registra una temperatura media anual aproximada de 15,5 °C, una humedad relativa moderada y una precipitación anual variable debido a su topografía [4].

Tabla 7

Datos HSP Macaravita con Zuhepower

HSP Macaravita				
Lugar	HSP promedio	HSP con pérdidas de inclinación	Ang Óptimo (°)	Latitud (°)
1	4,41583	4,362843	8,1461	6,4437
2	4,41583	4,362843	8,1429	6,4391
3	4,41583	4,362843	8,1515	6,4515
4	4,41583	4,362843	8,1533	6,4541
5	4,41583	4,362843	8,1496	6,4488
6	4,41583	4,362843	8,1591	6,4625
7	4,41583	4,362843	8,1575	6,4602
8	4,41583	4,362843	8,1661	6,4727
9	4,41583	4,362843	8,1631	6,4684
10	4,41583	4,362843	8,167	6,474
11	4,41583	4,362843	8,1726	6,4821
12	4,41583	4,362843	8,1706	6,4792

13	4,41583	4,362843	8,1728	6,4824
14	4,41583	4,362843	8,1792	6,4916
15	4,41583	4,362843	8,1753	6,486

En la Tabla 7 se presentan los valores de Horas Sol Pico (HSP) promedio. El valor registrado es de 4,415 kWh/m²/día, lo que, según la clasificación establecida en la Tabla 5 del documento, corresponde a una categoría media.

Al incorporar las pérdidas por inclinación, el HSP ajustado disminuye ligeramente a 4,362 kWh/m²/día, manteniéndose dentro de la misma categoría media.

El rango de variación observado en esta zona va desde un mínimo de 4,01 kWh/m²/día hasta un máximo de 5,03 kWh/m²/día, lo que indica una disponibilidad solar moderada, con potencial aprovechable para sistemas fotovoltaicos bien dimensionados.

3.4.3 Municipio de Puerto Wilches

El municipio de Puerto Wilches, ubicado en el departamento de Santander, se encuentra a orillas del río Magdalena, a una altitud media de 65 metros sobre el nivel del mar (msnm). Según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Puerto Wilches registra una temperatura media anual de 28,8 °C, una humedad relativa anual del 77,8 % y una precipitación total anual de 2.871,1 [mm] [4].

Tabla 8

Datos HSP puerto Wilches con Zuhepower

HSP Puerto Wilches				
Lugar	HSP promedio	HSP con pérdidas de inclinación	Ang Óptimo (°)	Latitud (°)
1	5,0716	5,0108	8,6875	7,2284

2	5,0716	5,0108	8,7053	7,2542
3	5,0716	5,0108	8,7326	7,2937
4	5,0716	5,0108	8,7401	7,3046
5	5,0716	5,0108	8,7618	7,336
6	5,0716	5,0108	8,7787	7,3605
7	5,0716	5,0108	8,8031	7,3959
8	5,0716	5,0108	8,8153	7,4136
9	5,0716	5,0108	8,8436	7,4545
10	5,0716	5,0108	8,8727	7,4967
11	5,0716	5,0108	8,8764	7,5021
12	5,0716	5,0108	8,931	7,5824
13	5,0716	5,0108	8,9412	7,596
14	5,0716	5,0108	8,9525	7,6124
15	5,0716	5,0108	8,9647	7,6301

En la Tabla 8 se presentan los valores de Horas Sol Pico (HSP) promedio. El valor registrado es de 5,0716 kWh/m²/día, lo que, según la clasificación establecida en la Tabla 5 del documento, corresponde a una categoría alta.

Al considerar las pérdidas por inclinación, el HSP ajustado se reduce a 5,0108 kWh/m²/día, manteniéndose dentro de la misma categoría alta.

El rango de variación en esta zona va desde un mínimo de 4,55 kWh/m²/día hasta un máximo de 5,54 kWh/m²/día, lo que evidencia una disponibilidad solar favorable y estable para el aprovechamiento energético mediante sistemas fotovoltaicos.

4. Desarrollo técnico de Zuhepower

En este capítulo se describen el desarrollo, las características y la aplicación del programa Zuhepower, diseñado para: la organización de datos solares, el cálculo del ángulo óptimo de

inclinación, la potencia demandada diaria efectiva, el cálculo de la potencia generada por un panel y el número de paneles solares necesarios para cubrir la demanda de energía establecida. Además, proporciona al usuario los datos obtenidos de forma organizada. Este programa forma parte del trabajo de grado y se adjunta como Anexo 3, junto con un video explicativo sobre su uso en el Anexo 4.

El programa facilita el ingreso de los datos, la organización, el cálculo y entrega de los resultados al usuario. Además, se busca que sea un programa que no demande demasiados recursos de los equipos, y que sirva como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la generación de energía solar.

4.1 Metodología de desarrollo

El desarrollo de Zuhepower se llevó a cabo siguiendo tres etapas principales, cada una de ellas diseñada para garantizar la funcionalidad, accesibilidad y eficiencia del programa.

4.1.1 Análisis de requerimientos

Se realizó una identificación de las necesidades del usuario final para determinar las funcionalidades clave que debía incluir el programa. En esta etapa, se definieron aspectos como el ingreso de datos solares, el cálculo de parámetros y la presentación de los resultados.

4.1.2 Diseño del software

El programa se estructuró mediante una interfaz gráfica intuitiva y amigable que facilita la interacción del usuario con las diferentes funcionalidades. Además, se diseñó un algoritmo de uso sencillo, para la realización de los cálculos necesarios con rapidez y precisión.

4.1.3 Implementación

La programación de ZuhePower se desarrolló utilizando la aplicación VBA (Visual Basic for Applications), un lenguaje integrado en Microsoft Excel que permite la creación de macros para gestionar tareas complejas y garantizar una experiencia fluida del usuario. Esta etapa incluyó la validación de los cálculos y pruebas en diversos escenarios para garantizar la fiabilidad del programa.

4.2 Características principales

En este apartado se describirán, de forma general, las interfaces del programa. Para una explicación más detallada, se puede consultar el Anexo1. ElementosSFV, donde se incluye un video que muestra el funcionamiento completo del programa.

4.2.1 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario se compone de 5 botones principales los cuales ejecutan tareas definidas.

4.2.2 Documentación

Al realizar clic en este botón, se despliega una subinterfaz que se componen con tres bonotes:

4.2.2.1 PVGIS. Redirige al usuario a la página oficial de PVGIS para descargar los datos necesarios de irradiación solar.

4.2.2.2 NASA POWER. Redirige al usuario a la página oficial de NasaPower para descargar los datos necesarios de irradiación solar.

4.2.2.3 Manual. Abre un archivo o guía para el usuario, diseñado para explicar el proceso de descarga de datos desde las páginas de NASA POWER y PVGIS. Este manual ha sido creado específicamente por los autores del trabajo de grado. La Figura 2 presenta la interfaz del

programa para la obtención de los datos de radiación solar de dos plataformas ampliamente utilizadas.

Figura 2

Interfaz de documentación.



Nota: Creación propia

4.2.3 Datos solares

Abre una interfaz donde el usuario debe cargar los datos previamente descargados de las páginas de PVGIS o Nasa Power. La Figura 3 muestra esta interfaz

Figura 3

Interfaz de los datos de radiación solar



Nota: Creación propia

4.2.4 Datos de demanda

Esta opción permite al usuario acceder a una interfaz donde podrá ingresar los detalles de los elementos electrónicos con los que cuenta su hogar, con esta información el programa estima

la demanda diaria efectiva, facilitando la planificación energética. La Figura 4 presenta esta interfaz.

Figura 4

Interfaz de los datos de la demanda.

ID	Elemento	Cantidad	Potencia	horas uso	dias uso	potencia semana
----	----------	----------	----------	-----------	----------	-----------------

Energia por dia: (Wh/dia) Energia por mes: (Wh/mes)

AGREGAR Modificar elemento Eliminar elemento

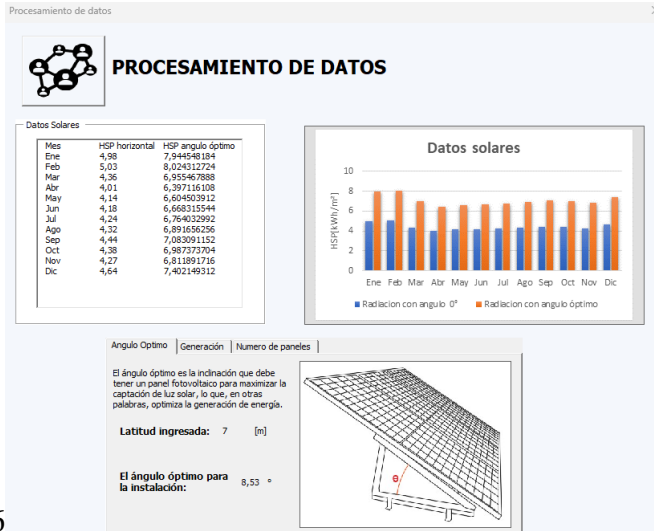
Nota: Creación propia

4.2.5 Procesamiento

En la interfaz de procesamiento el programa muestra la tabla de HSP calculadas por cada mes del año, un gráfico donde se compara la HSP a cero grados y con ángulo óptimo, entrega cual es el valor del ángulo óptimo para el panel fotovoltaico. Si el usuario tiene el dato de potencia pico del panel que utilizará, se podría calcular la capacidad aproximada de generación y cuantos paneles serían necesarios para cubrir la demanda. La Figura 5 presenta la interfaz de procesamiento de datos.

Figura 5

Interfaz de procesamiento de datos.



6

Nota: Creación propia

4.2.6 Cerrar

Como su nombre lo indica la única función de este botón es cerrar el programa para finalizar todos los procesos.

4.3 Funciones principales

A continuación, se agruparán las fórmulas con las que cuenta Zuhepower para realizar el diseño de un sistema fotovoltaico.

4.3.1 Cálculos de demanda

El cálculo de la energía demandada es requerido para garantizar una cobertura completa y óptima, dependiendo de las necesidades del usuario y de la potencia disponible para la generación fotovoltaica.

Para iniciar, se calculará la energía demandada por día, considerando la ecuación adecuada según las características de los electrodomésticos, su cantidad y el tiempo de uso. Este enfoque se fundamenta en los criterios establecidos por Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021) [12], quienes presentan una metodología específica para el diseño de sistemas fotovoltaicos autónomos.

$$E_{demandada_dia} = ndo * P_{objeto} * Hu \quad [1]$$

ndo =numero de objetos

P_{objeto} =potencia unitaria del objeto en W

Hu =horas de uso

Si se desea calcular la energía demandada en un rango más amplio de tiempo, se puede comenzar utilizando un período de una semana. La variación con respecto a la Ecuación 1 radica en la inclusión de la variable correspondiente a los días de uso.

$$E_{demandada_semanal} = ndo * P_{objeto} * Hu * Du \quad [2]$$

Du = días de uso del objeto

ndo =numero de objetos

P_{objeto} =potencia unitaria del objeto

Hu =horas de uso

Si se requiere calcular la energía demandada en periodos más amplios, como mensual o anual, se deberá ajustar la ecuación incluyendo el número de semanas para el cálculo mensual y el número de meses para el cálculo anual, considerando los días de uso en cada caso.

$$E_{demandada_mes} = E_{demandada_semanal} * numero\ de\ semanas \quad [3]$$

$$E_{demandada_año} = E_{demandada_mes} * 12 \quad [4]$$

La energía demandada corresponde a la cantidad total de energía que un sistema requiere para su operación. Sin embargo, es importante considerar las pérdidas ocasionadas por diversos factores que pueden disminuir la energía disponible para uso efectivo. Por lo tanto, a continuación, se procederá a calcular la energía efectiva, ajustando el valor de la energía demandada según dichas pérdidas, como se muestra en la Ecuación 5. Este cálculo se fundamenta en la metodología presentada por Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021, p. 6) [12], donde se establecen los criterios para ajustar la demanda energética en función de las pérdidas del sistema.

$$E_{demanda_{efectiva_{dia}}} = \frac{Energia_{dc} + \frac{Energia_{ac}}{0.9}}{0.8} \quad [5]$$

Los factores: 0,9, que representa la eficiencia del inversor y compensa una pérdida del 10 % en la conversión de DC a AC; y 0,8, que corresponde a la eficiencia del banco de baterías, considerando pérdidas del 20 % en los ciclos de carga y descarga.

La energía demandada diaria está compuesta por dos elementos: uno en corriente continua (DC) y otro en corriente alterna (AC). Sin embargo, para efectos prácticos, la mayoría de los dispositivos eléctricos funcionan con corriente alterna (AC). Por esta razón, se elimina de la ecuación la variable correspondiente a la Energía en DC.

Como resultado, la energía de demanda efectiva diaria se calcula de la siguiente forma:

$$E_{demanda_{efectiva_{dia}}} = \frac{\frac{Energia_{ac}}{0.9}}{0.8} = \frac{Energia_{ac}}{0.8 \times 0.9} = \frac{Energia_{ac}}{0,72} \quad [6]$$

4.3.2 Obtención del ángulo óptimo y pérdidas por inclinación

Para optimizar la captación solar es necesario aplicar un ajuste adecuado en la inclinación de los módulos fotovoltaicos. Este paso permite maximizar la radiación incidente sobre la superficie activa. Por ello, en la siguiente sección se aborda la obtención del ángulo óptimo de inclinación y el análisis de las pérdidas derivadas de desviaciones respecto al ángulo ideal.

- Cálculo del ángulo óptimo

El valor del ángulo óptimo en grados para la inclinación de un panel solar es un parámetro requerido para maximizar la captación de la energía solar. Este ángulo depende exclusivamente de la latitud de la zona en estudio, lo que permite determinar la inclinación más eficiente para la instalación de los módulos fotovoltaicos. Según Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021, p. 43) [12], la ecuación presentada en dicho texto coincide con la Ecuación 7 de este trabajo de grado, proporcionando el procedimiento para determinar el ángulo óptimo de inclinación.

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \times \theta \quad [7]$$

β_{opt} =Ángulo óptimo

θ =Latitud

El valor 0,69 representa un coeficiente de ajuste derivado de estudios sobre la trayectoria solar en distintas latitudes, reflejando cómo varía la altura solar media anual. Por su parte, el término constante 3,7 compensa la inclinación mínima necesaria en zonas cercanas al ecuador, donde el sol incide casi verticalmente.

- Cálculo de pérdidas de potencia por inclinación

Las pérdidas de potencia por inclinación ocurren cuando un panel solar no está en el ángulo óptimo para captar radiación, reduciendo su eficiencia energética. Este efecto es más notable en instalaciones con inclinaciones fijas, donde las variaciones estacionales afectan la producción de energía. Las ecuaciones de Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021, p. 45) [12] con relación a pérdidas de potencia por inclinación del panel fotovoltaico se muestran en las ecuaciones 8 y 9 de este proyecto de grado.

$$Perdidas[\%] = 100 * [1,2 * 10^{-4} * (\beta - \varphi + 10)^2 + 3,5 * 10^{-5} * \alpha^2] \quad [8]$$

Para $15^\circ < \beta < 90^\circ$

$$Perdidas[\%] = 100 * [1,2 * 10^{-4} * (\beta - \varphi + 10)^2] \quad [9]$$

Para $15^\circ < \beta$

β =Ángulo de inclinación en grados sexagesimales.

φ =Es la latitud en grados sexagesimales.

α =Es el ángulo del azimut en grados sexagesimales.

El azimut es el ángulo medido en el plano horizontal entre la dirección de referencia (generalmente el norte verdadero) y la dirección de un objeto, como un panel solar. Se expresa en

grados, de 0° a 360°. La fórmula [9] estima las pérdidas porcentuales por inclinación en sistemas solares fotovoltaicos, considerando únicamente el ángulo de inclinación del panel (β) y la latitud del lugar (φ). Se aplica cuando el sistema está correctamente orientado en dirección óptima, es decir, hacia el ecuador desde la ubicación del observador. En el hemisferio norte, esto corresponde a una orientación hacia el sur verdadero; en el hemisferio sur, hacia el norte verdadero. La fórmula [8] estima las pérdidas porcentuales en sistemas solares fotovoltaicos considerando tanto el ángulo de inclinación (β), la latitud (φ) como el ángulo de azimut (α). Es especialmente útil en zonas alejadas del ecuador, donde los ángulos de inclinación óptimos suelen ser mayores a 15°.

4.3.3 Cálculos de la generación de energía eléctrica y del número de paneles fotovoltaicos requeridos

Si el usuario dispone de información de las características del panel fotovoltaico que utilizará en su proyecto, es adecuado realizar la estimación de la energía que este panel podría generar. Para ello, se requiere el valor de las Horas Sol Pico (HSP), tomando el valor más bajo para considerar el peor de los escenarios, junto con la potencia pico del panel. Según Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021, p.174) [12], con la Ecuación 10 se estima la potencia generada por panel.

$$P_g = HSP_{min} \times W_p \quad [10]$$

P_g =Potencia generada por panel

HSP_{min} =hora solar pico más baja

W_p =Potencia pico del panel fotovoltaico

Para estimar la potencia necesaria del sistema, se consideró la metodología propuesta por el canal Solar-Navi [13]. Se ajustó la ecuación inicial donde el consumo energético diario

incorpora un factor de seguridad del 20%. Este factor garantiza una cobertura robusta de la demanda y compensa posibles variaciones o futuras necesidades (ver Ecuación 11).

$$Wp_{demanda_{efectiva_{dia}}} = \frac{E_{demanda_{efectiva_{dia}} \times 1,2}{HSP} \quad [11]$$

$Wp_{demanda_{efectiva_{dia}}$ =Potencia demandada efectiva por día

$E_{demanda_{efectiva_{dia}}$ =Energía demandada efectiva por día

HSP =Hora solar pico más baja

En el trabajo de Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021, p. 166) [12], se muestra la ecuación para calcular la cantidad de paneles fotovoltaicos necesarios para cubrir la potencia demandada efectiva diaria. La ecuación presentada en dicho texto es la Ecuación 12, aunque en una forma más simplificada, ya que no considera las pérdidas en el sistema. Este enfoque proporciona una estimación inicial de los módulos requeridos sin incorporar factores como eficiencia, temperatura o degradación de los paneles.

$$Numero\ de\ paneles = \frac{Wp_{demanda_{efectiva_{dia}}}{Wp} \quad [12]$$

$Wp_{demanda_{efectiva_{dia}}$ =Potencia demandada efectiva por día

Wp =Potencia pico del panel fotovoltaico

5. Modelo de construcción de una comunidad energética

En este capítulo se presentan los pasos requeridos para la creación de una comunidad energética basada en generación solar fotovoltaica, incluyendo las recomendaciones para la selección de los dispositivos y la normativa que los regula.

5.1 Estudio de viabilidad de la zona

El primer paso en un proyecto fotovoltaico es evaluar la viabilidad de la zona para generar energía a partir de la energía solar. Para ello, se debe determinar la Hora Solar Pico (HSP). En este

análisis, se emplea la herramienta Zuhepower, la cual proporciona los datos de HSP tanto para un ángulo de cero grados como para el ángulo óptimo, además de indicar el valor correspondiente a dicho ángulo. Adicionalmente, es importante considerar variables como la temperatura, la humedad relativa y la nubosidad.

5.2 Cálculo de la demanda energética

Conocer la información sobre la demanda energética permite dimensionar el sistema de generación. En zonas que cuentan con servicio de energía eléctrica, este dato puede obtenerse de la factura de cobro. Sin embargo, en el contexto de zonas aisladas, muchas veces no se dispone de esta información. Para estos casos, el programa Zuhepower permite calcular la demanda energética diaria, proporcionando una estimación para el diseño del sistema.

5.3 Determinación del número de paneles necesarios

Para seleccionar un panel fotovoltaico que satisfaga las necesidades del proyecto, se toma como referencia el consumo diario y la Hora Solar Pico (HSP) de la ubicación en la que se lleva a cabo el análisis. Para garantizar un dimensionamiento adecuado, se considera la situación de máxima exigencia mediante el método del peor mes. Este método utiliza el dato de HSP más bajo registrado, asegurando así el suministro energético durante todo el año, incluso en condiciones de menor irradiación. Para calcular la potencia requerida en el panel se utiliza la siguiente ecuación:

$$Wp_{demanda_{efectiva_{dia}}} = \frac{E_{demanda_{efectiva_{dia}} \times 1,2}{HSP} \quad [13]$$

Para calcular la cantidad de paneles necesarios para cubrir la demanda, se deben considerar diversos factores, entre ellos: el tipo de panel, los valores eficaces de tensión y corriente, la compatibilidad con inversores, baterías y el seguidor de máxima potencia (MPPT), las condiciones ambientales y la relación costo-beneficio. Toda esta información es detallada en el Anexo 1. La ecuación para el cálculo del número de paneles es:

$$\text{Numero de paneles} = \frac{Wp_{\text{demanda efectiva dia}}}{Wp} \quad [14]$$

5.3.1 MPPT

En la selección de los seguidores de máxima potencia (MPPT), lo primero es definir la magnitud de la tensión a la que funcionará el sistema: 12[V], 24[V] o 48[V]. Otro factor clave que influye en la selección del equipo es la configuración del sistema y los requerimientos energéticos.

Otro aspecto a considerar es la conexión de los paneles fotovoltaicos, que puede ser en serie, paralelo o mixta. La Tabla 9 presenta los efectos en el nivel de tensión, la corriente de los tipos de conexiones, lo cual es expuesto en detalle en el Anexo 1.

Tabla 9

Efectos de los tipos de conexiones de los paneles fotovoltaicos

Tipo de conexión	Variación	Revisar
Serie	Aumento de la tensión	Tensión de circuito abierto
Paralelo	Aumento de la corriente	Corriente de corto circuito

Es fundamental garantizar que las entradas del MPPT no excedan los rangos permitidos de tensión y corriente. Otro aspecto importante es que la tensión de salida del MPPT debe coincidir con la tensión del banco de baterías para asegurar una carga eficiente y segura. En la Tabla 10, se resumen las condiciones críticas y sus efectos:

Tabla 10

Efectos de tensión, corriente y potencia en el MPPT

Condición	Efectos
$V_{\text{banco baterias}} < V_{\text{circuitoabierto}}$	Se genera mayor inyección de los paneles al banco de baterías (paneles en serie)
$V_{\text{circuitoabierto}} < V_{\text{maxcontrolador}}$	El controlador conserva su integridad (paneles en serie)

$I_{cortocircuito} < I_{maxcontrolador}$	Limita y protege el controlador (paneles en paralelo)
$P_{panel} \leq P_{controlador}$	Limita y protege el controlador

5.4 Inversores

La selección de un inversor debe realizarse considerando diversos factores que garanticen la compatibilidad entre los elementos del sistema y la eficiencia en la conversión de energía.

En primer lugar, el inversor debe ser capaz de proporcionar una señal de corriente alterna lo más senoidal posible, para evitar interferencias y mejorar la calidad del suministro energético. En el Anexo 1, se aborda el tipo de onda de salida (AC) del inversor. Otro factor importante es la estabilidad en la frecuencia de salida, que generalmente debe ser de 60 Hz, con tolerancia a oscilaciones de tensión para evitar daños o inestabilidad en el suministro eléctrico.

Además, el inversor debe ser capaz de manejar las tensiones de entrada compatibles con el banco de baterías y el sistema de generación. La tensión de salida debe ser adecuada para los equipos de consumo, que generalmente operan con 208/220 V o 120/127 V. Es fundamental que el equipo tenga una baja distorsión armónica, con el fin de minimizar interferencias y garantizar la estabilidad del sistema.

También es importante que el inversor cuente con la capacidad de suministrar la potencia requerida en régimen permanente, además de soportar los picos de demanda, como los arranques de motores. Finalmente, se debe evaluar el consumo en espera (stand-by), priorizando equipos con bajo consumo energético cuando no están en uso, para maximizar la eficiencia del sistema.

5.5 Baterías

Las baterías son un elemento fundamental en los sistemas fotovoltaicos aislados. La tensión del banco de baterías debe coincidir con la del controlador MPPT, lo cual garantiza la compatibilidad del sistema. Los principales factores que determinan si una batería es adecuada

incluyen el consumo diario, los días de autonomía requeridos y la profundidad de descarga máxima.

La configuración de las baterías puede realizarse en serie o en paralelo, dependiendo de la tensión necesaria para operar el sistema. En la mayoría de los casos, una sola batería no es suficiente para cubrir las necesidades del usuario, por lo que se requiere un banco de baterías mediante conexiones adecuadas. Esto es necesario para garantizar un sistema óptimo.

El cálculo del banco de baterías está fundamentado en los criterios establecidos por Mendoza Rengifo y Ramírez López (2021, p.108) [12] (ver Ecuación 15).

$$C_{(Ah)} = \frac{\text{Consumo } \left(\frac{Wh}{\text{día}}\right) * \text{Días autonomía (día)}}{\text{Voltaje batería} * \text{profundidad descarga}} \quad [15]$$

En el Anexo 1, se abordan aspectos específicos sobre el funcionamiento y características de las baterías.

5.6 Cables

La selección del cableado en instalaciones fotovoltaicas abarca tanto la instalación de corriente continua (CC) como de corriente alterna (AC) y debe cumplir con las normativas vigentes en Colombia. El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) establece las directrices específicas para el cableado en estos sistemas.

En el Libro 3: Instalaciones Objeto del RETIE, el numeral 20.22, titulado "Paneles Solares Fotovoltaicos" [7], detalla los requisitos técnicos relacionados con la instalación de sistemas fotovoltaicos, incluidos aspectos del cableado. Particularmente, el literal "d" de este numeral hace referencia al "Cableado de conexión de los paneles solares", indicando lo siguiente:

“Para conectar los distintos paneles solares con el tablero de conexión y con los equipos de control, protección y medida, los conductores deben ser de tipo cables aislados con materiales de alta calidad, para garantizar la durabilidad y fiabilidad del sistema a la

intemperie y a la humedad. Dichos cables deben estar certificados para usos en sistemas solares fotovoltaicos, de acuerdo con los requisitos y ensayos de producto establecidos en el presente Reglamento” [7].

Además, la Norma Técnica Colombiana (NTC) 2050, correspondiente al Código Eléctrico Colombiano, aborda en la Sección 690 los sistemas solares fotovoltaicos (FV). Esta sección establece “lineamientos detallados para la instalación y operación segura de los sistemas fotovoltaicos, asegurando cumplimiento técnico y prevención de riesgos” [6].

5.7 DPS

Para la selección de los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) en sistemas fotovoltaicos, se debe hacer referencia a la Norma Técnica Colombiana NTC 4552, la cual está compuesta por tres partes que establecen los lineamientos para la instalación, selección y uso de estos dispositivos en sistemas eléctricos, incluyendo aplicaciones en instalaciones solares fotovoltaicas [3].

Esta norma proporciona los criterios técnicos necesarios para mitigar los efectos de sobretensiones transitorias y permanentes, garantizando la protección de los equipos y la seguridad del sistema. En particular, la NTC 4552-1 aborda “los principios generales y las características de los DPS” (2008), la NTC 4552-2 “especifica los métodos de ensayo y los requisitos de funcionamiento” (2008), mientras que la NTC 4552-3 “establece las directrices para la correcta instalación y coordinación de los DPS dentro de una instalación eléctrica” [3].

5.8 Interruptores automáticos (“Breakers”)

La selección de los interruptores automáticos en sistemas fotovoltaicos requiere tener en cuenta tanto la sección de corriente continua (DC) como la sección de corriente alterna (AC).

Aunque ambas secciones operan bajo principios similares de protección y seguridad, presentan diferencias técnicas que deben considerarse.

En ambas partes, la selección de los interruptores automáticos debe basarse en factores de seguridad como la corriente nominal del sistema, la capacidad de interrupción, la coordinación con otros dispositivos de protección y las condiciones ambientales de operación.

En Colombia, la selección y uso de interruptores automáticos en sistemas fotovoltaicos está regulada por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y la Norma Técnica Colombiana NTC 2050, que corresponde al Código Eléctrico Colombiano. Estas normativas establecen los requisitos técnicos necesarios para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas en sistemas solares fotovoltaicos.

La NTC 2050, en su Sección 690, los sistemas solares fotovoltaicos. Esta sección aborda aspectos como la selección de interruptores automáticos, las protecciones contra sobre corriente y la coordinación con otros dispositivos de seguridad eléctrica, con el fin de minimizar riesgos y asegurar la confiabilidad de la instalación [6].

Finalmente, cada elemento de un sistema fotovoltaico debe cumplir con los estándares de la IEC 61730 (seguridad de módulos fotovoltaicos) y estar certificado por la Superintendencia de Industria y Comercio. Las certificaciones pueden verificarse a través de la plataforma SICERCO.

6. Aspecto social

El acceso a los servicios de energía en algunos municipios de Santander no es el adecuado. Lo cual plantea diferentes desafíos por resolver para mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas zonas rurales. La implementación de proyectos de comunidades energéticas impulsará el desarrollo sostenible en estas regiones, generando oportunidades de fortalecimiento en aspectos multidimensionales como el nivel de servicios locales de iluminación, formación, trabajo,

seguridad, bienestar y economía; favoreciendo el índice de calidad de vida de sus habitantes, el acceso equitativo a energía y fortalecimiento de la cohesión social en las comunidades beneficiadas. Es por esto que el desarrollo de una comunidad energética impactará a las comunidades rurales en tres aspectos: la calidad de vida, el acceso equitativo a energía y la cohesión social.

6.1 Calidad de vida

Según la OMS la calidad de vida de un individuo es la percepción que este tiene de su posición en la vida, en el contexto cultural, en sus expectativas y normas e inquietudes [10]. Teniendo en cuenta lo anterior, el acceso a sistemas de generación con energía renovables, contribuiría al desarrollo integral de estas comunidades, en aspectos básico como la iluminación en el hogar, lo cual permitirá realizar actividades en horarios nocturnos como: cocinar, estudiar, leer; además de reducir riesgos en las labores del hogar, así como facilitar tareas domésticas.

También mejorará el acceso a sistemas de refrigeración de alimentos, reduciendo riesgos de salud y mejorando la alimentación diaria. De esta forma, las mejoras en aspectos relacionados con la salud, reduciría el riesgo de contraer enfermedades respiratorias, evitando la utilización de métodos como lo es las lámparas de keroseno.

Por último, el acceso a fuentes de energía las 24 horas del día impulsaría el nivel educativo, facilitando el acceso a futuras fuentes de estudio y actividades que requieren energía eléctrica. La implementación de una comunidad energética permitirá a los habitantes contar con dispositivos eléctricos tanto para el hogar como para el estudio, así como para acceder a información y comunicación.

6.2 Acceso equitativo

La energía eléctrica es un servicio necesario para garantizar el acceso a pilares de convivencia como lo es la seguridad, sostenibilidad y la reducción de la desigualdad. En Colombia el acceso equitativo a la energía eléctrica en zonas rurales ha ido aumentando en los últimos años. Por lo tanto, la implementación de una comunidad energética en estas zonas, contribuirá en la reducción de los problemas de seguridad y bienestar, permitiendo el alumbrado en zonas sociales, la disminución de riesgos de accidentes laborales y domésticos y el fortalecimiento de la cohesión comunitaria, evitando la fragmentación social. Además, promoverá el desarrollo de proyectos de beneficio colectivo y reducirá la necesidad de que las familias se desplacen a zonas urbanas para acceder a servicios básicos como educación, seguridad, economía, cultura y recreación.

6.3 Cohesión social

Fomentar la cohesión social permitirá fortalecer el sentido de comunidad, el grado de unión social, la interacción y armonía de estas comunidades. Asimismo, favorecerá la capacitación en comunidades energéticas, promoviendo un sentido de pertenencia y equidad, e impulsará la economía de los municipios. Esto incluirá la creación de microempresas, la mejora en la producción agrícola, la reducción de costos de iluminación, y la facilitación de la comercialización de productos. Además, se fomentarán empleos relacionados con la instalación, mantenimiento y gestión de sistemas energéticos comunitarios, lo que incrementará directamente los ingresos de la comunidad. Esto también potenciará su autonomía y capacidad de gestión para futuros proyectos que impacten positivamente a la sociedad.

7. Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo del trabajo de grado se focaliza en el diseño e implementación de una herramienta computacional denominada Zuhepower que permite realizar un análisis detallado de los datos de irradiación solar de un lugar específico, para proporcionar información clave para evaluar la viabilidad de sistemas fotovoltaicos considerando las condiciones del lugar de implementación.

7.1 Conclusiones

Las conclusiones relevantes del trabajo de grado son las siguientes:

- Se llevó a cabo el estudio sobre la pobreza energética en Colombia y Santander para dar cumplimiento al primer objetivo específico. Utilizando datos oficiales del DANE y del IMPE, este análisis permitió identificar los municipios más afectados y comprender la relación entre pobreza energética, pobreza multidimensional y necesidades básicas insatisfechas. Con base en este estudio, se pudieron establecer los criterios de selección de los municipios en Santander en función de su necesidad energética y vulnerabilidad, fortaleciendo el argumento del proyecto.
- Se desarrolló una base de datos para el cumplimiento del segundo objetivo específico, esta base fue estructurada con información solar de los municipios de Macaravita, Puerto Wilches y El Carmen de Chucurí, utilizando datos de plataformas confiables como NASA POWER. Esta base de datos permitió analizar las horas solares pico y el ángulo óptimo de inclinación de los paneles fotovoltaicos, proporcionando una herramienta clave para determinar la viabilidad de generación solar en las zonas rurales estudiadas.

- Para el cumplimiento del tercer objetivo se diseñó e implementó la herramienta Zuhepower, diseñada en VBA, que facilita la evaluación de la prefactibilidad de sistemas fotovoltaicos. Esta aplicación permite procesar datos solares, calcular la demanda energética y estimar el número de paneles necesarios para cubrir las necesidades de una comunidad. La herramienta brinda un apoyo en la toma de decisiones para la implementación de sistemas solares en regiones, especialmente las rurales. Además, se establecieron bases metodológicas que pueden ser aprovechadas para la formación de comunidades energéticas en futuras aplicaciones.
- Para la aplicación en la región de Santander se seleccionaron tres municipios ubicados en diferentes pisos térmicos que tienen índices altos de pobreza energética, multidimensional y una cobertura eléctrica limitada. Con ello se demuestra que existe viabilidad para suplir las necesidades básicas a través de la generación de energía solar.
- A pesar de que las estadísticas del IMPE y DANE muestran una disminución en los niveles de pobreza en Colombia y Santander, persiste una profunda brecha en el acceso a la energía eléctrica y en la cobertura de necesidades básicas. Este problema es particularmente grave en las zonas rurales, donde las dificultades para acceder a estos servicios esenciales son más evidentes y están profundamente arraigadas.
- La implementación de comunidades energéticas en estas zonas enfrenta retos significativos, especialmente al tratar con comunidades que, aunque pertenezcan al mismo municipio, tienen costumbres y dinámicas sociales distintas. Estos desafíos se ven agravados por factores como la falta de recursos económicos, las barreras

sociales y la corrupción, que dificultan la creación de estructuras de socialización efectivas entre los promotores de las comunidades energéticas y la comunidad.

- Las comunidades energéticas con conexión a la red cuentan con un amplio marco regulatorio, respaldado por diversas resoluciones emitidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Estas resoluciones han establecido lineamientos claros para la integración de comunidades energéticas al Sistema Energético Nacional, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos energéticos. Sin embargo, en el caso de las comunidades energéticas en zonas aisladas, la regulación específica es limitada. Aunque existen iniciativas y proyectos piloto impulsados por entidades como el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas), aún se requiere un desarrollo normativo más robusto que aborde las particularidades de estas regiones. Esto incluye la necesidad de garantizar el acceso a fuentes de energía renovables y sostenibles, adaptadas a las condiciones geográficas y sociales de las comunidades rurales y aisladas.

7.2 Recomendaciones

Algunas recomendaciones para la utilización de la herramienta computacional son las siguientes:

- Zuhpower se especializa en estudios de prefactibilidad y no debe ser considerado en la parte técnica de los proyectos solares. Su enfoque principal es la evaluación preliminar de la viabilidad de una zona, analizando el potencial solar del área de estudio.

- Fortalecimiento de la calidad y diversidad de fuentes de datos solares: Actualmente, el programa utiliza bases satelitales como NASA POWER y PVGIS, las cuales, si bien son ampliamente reconocidas, presentan limitaciones en resolución espacial (por ejemplo, la retícula de NASA es de aproximadamente 50 km). Esto puede afectar la precisión de variables como temperatura, irradiancia y velocidad del viento, especialmente en zonas con alta variabilidad climática. Se recomienda incorporar fuentes locales como las estaciones meteorológicas de la UIS y del Centro de Investigación de Guatiguará, explorar otras bases de datos con mayor resolución y cobertura regional y permitir la carga de datos personalizados provenientes de sensores o registros propios, para mejorar la adaptabilidad del programa a distintos contextos no solo a nivel Santander si no a nivel nacional.
- La versión actual del programa no contempla pérdidas asociadas a elementos como reguladores, inversores, cableado, ni al comportamiento de las baterías por lo cual entre las actualizaciones se debe incluir el cálculo de profundidad de descarga (DoD) y eficiencia de carga/descarga, tipos de conexión de baterías (serie, paralelo, híbrida) y su impacto en el dimensionamiento y configuraciones de paneles (string, arreglo paralelo) y su influencia en voltajes y corrientes del sistema.
- Para fortalecer y tener un programa robusto, se recomienda incorporar módulos que permitan al usuario obtener una estimación aproximada de los costos asociados al sistema fotovoltaico propuesto. La inclusión del cálculo de costos por componente: paneles, baterías, inversores, estructuras, cableado y mano de

obra, la visualización de escenarios económicos según el tipo de conexión (autónomo, híbrido, interconectado). También sería pertinente la inclusión de parámetros como vida útil los elementos del sistema fotovoltaico y mantenimiento preventivo con la posibilidad de ajustar precios según proveedores locales o referencias comerciales actualizadas en el mercado nivel Colombia.

Referencias bibliográficas

- [1] Boardman, B. (1991). *Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth* .
- [2] DANE. (2024). *Pobreza y desigualdad* . Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-multidimensional>
- [3] ICONTEC. (2008). *Norma Técnica Colombiana NTC 4552*. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- [4] IDEAM. (2024). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de <https://www.ideam.gov.co/>
- [5] IMPE. (2022). *Índice Multidimensional de pobreza energética*. Obtenido de <https://fundacionpromigas.org.co/impe/>
- [6] Ministerio de desarrollo económico. (s.f.). *Norma Técnica Colombiana 2050*. Obtenido de <https://osaic.com.co/wp-content/uploads/NTC-2050.pdf>
- [7] Ministerio de Energía . (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/>
- [8] Ministerio de Minas y Energía . (2024). *RESOLUCIÓN 40137 DE 2024*. Obtenido de https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40137_2024.htm
- [9] Olarte , D. Y., & Cruz, Y. T. (2023). *Propuesta de una metodología para caracterizar la pobreza energética en la región de Santander*. Bucaramanga.

- [10] Organización Mundial de Salud OMS. (1996). *¿Que calidad de vida?*. Obtenido de https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/55264/WHF_1996_17_n4_p385-387_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] Presidente De La Republica De Colombia. (2023). *Decreto 2236*. Obtenido de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/30050699>
- [12] Mendoza Rengifo, W. J., & Ramírez López, J. R. (2021). Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica. *Revista Científica Pakamuros*, 5(1), 48–56.
- [13] Canal Solar-Navi. (8 de enero 2024). Calcula la potencia fotovoltaica y el número de paneles solares que necesitas [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QZaHujeQp8>