

Metodología para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural

Methodology for the selection of technologies in rural energization projects

Felipe Muñoz-Sarria ¹, Maximiliano Bueno-López ²

¹ Universidad del Cauca, Colombia. Correo electrónico: ifmunoz@unicauca.edu.co. Orcid: [0000-0003-2801-030X](https://orcid.org/0000-0003-2801-030X)

² Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Colombia. Correo electrónico: mbuenol@unicauca.edu.co. Orcid: [0000-0002-7959-9962](https://orcid.org/0000-0002-7959-9962)

Recibido: 12 abril, 2022. Aceptado: 11 junio, 2022. Versión final: 14 agosto, 2022.

Resumen

El presente artículo propone una búsqueda y análisis de los criterios más relevantes para la elección de un tipo de recurso primario de energía en un proyecto de energización rural. Se establecieron aspectos técnicos, económicos, sociopolíticos y ambientales con el fin de considerar toda la información que permita elegir la mejor alternativa de generación para una zona no interconectada que garantice el desarrollo sostenible. Con estos aspectos se identificaron las diferentes barreras que han tenido las tecnologías renovables para penetrar en el sector eléctrico de Colombia; con base en estas, se establecieron los criterios para tener en cuenta en la implementación de un método multicriterio que permita disminuir la subjetividad a la hora de la elección. Se recolectó información acerca de los métodos multicriterio más utilizados para la toma de decisiones en proyectos energéticos; se estudiaron los métodos ELECTRE, PROMETHEE, AHP, MAUT, TOPSIS y VIKOR. Para la elección del método a utilizar se definieron aspectos como la complejidad, antecedentes, nivel de subjetividad, aplicación y flexibilidad de los métodos; como resultado, el método analítico jerárquico (AHP) fue una de las mejores opciones. Una vez escogido el método, se realizó una validación a partir de un caso de estudio en el resguardo indígena Calle Santa Rosa, en Timbiquí (Cauca), donde, a partir de los criterios establecidos y la implementación del método multicriterio AHP, se logró identificar que la mejor solución energética es la energía solar fotovoltaica, seguida de la biomasa.

Palabras clave: métodos multicriterio; fuentes no convencionales de energía; energías renovables; zonas no interconectadas (ZIN); sostenibilidad; pobreza energética; electrificación; planificación energética; Matlab; proceso analítico jerárquico AHP.

Abstract

This paper proposes a search and analysis of the most relevant criteria for choosing a type of primary energy resource, where technical, economic, socio-political and environmental aspects were established in order to consider all the information that allows choosing the best generation alternative for a non-interconnected area that guarantees sustainable development. With these aspects, the different barriers that renewable technologies have had to penetrate the Colombian electricity sector were identified and, based on these barriers, the criteria to be taken into account to implement a multi-criteria method to reduce subjectivity at the time of the election were established. Information was collected about the most used multicriteria methods for decision making in energy projects, where the ELECTRE, PROMETHEE, AHP, MAUT, TOPSIS and VIKOR methods were studied in order to choose the best one for decision making in this sector. In order to choose the method to be used, aspects such as complexity, background, level of subjectivity, application and flexibility of the methods were defined, resulting in the analytical hierarchical method (AHP) as one of the best options. Once the method was chosen, a validation was carried out based on a case study in

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia [CC BY-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)



Como citar: F. Muñoz-Sarria, M. Bueno-López, “Metodología para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 3, pp. 85-xx, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022008>.

the indigenous reservation Calle Santa Rosa, in Timbiquí (Cauca), where based on the established criteria and the implementation of the AHP multicriteria method, it was possible to identify that the best energy solution is photovoltaic solar energy followed by biomass energy.

Keywords: Multi-criteria methods, Unconventional sources of energy, renewable energy, non-interconnected zones (ZIN), sustainability, energy poverty, Electrification, Energy planning, Matlab, Analytical hierarchical process AHP.

1. Introducción

Contar con el acceso al servicio energético, hoy en día, se ha convertido en una necesidad prioritaria, debido a que contribuye a mejorar las condiciones y la calidad de vida, junto con otros servicios esenciales tales como agua potable, iluminación, telecomunicaciones y conservación de alimentos. También contribuye en el mejoramiento de sistemas de salud, en el aumento de la productividad del trabajo y en la generación de empleo.

En Colombia, una tercera parte de la población se ubica en zonas urbanas, y aproximadamente el 96 % tiene acceso a energía eléctrica, según datos del Sistema de Información Minero Energético Colombiano [1]. Sin embargo, cerca de un millón de familias pertenecientes a zonas rurales no cuentan con acceso a este servicio [2]. La mayoría de estos hogares sin electricidad están ubicados en zonas rurales donde la pobreza afecta al 38,6 % de la población. Debido a la carencia de infraestructura energética, se han presentado dificultades para llevar energía a zonas rurales, por ejemplo, el costo que se le atribuye a la expansión del sistema interconectado nacional (SIN) hasta dichas zonas, las cuales presentan dificultades de acceso por motivos topográficos y en algunas ocasiones por orden público [3]. Por otra parte, el desconocimiento de fuentes alternativas de energía ha motivado a que se continúen utilizando algunas metodologías basadas en combustibles fósiles, las cuales son costosas y generan contaminación en el medioambiente [4].

Hoy en día, los retos de la electrificación rural siguen siendo muy grandes, y la llegada del covid-19 dejó en evidencia las dificultades que existen en áreas donde no hay servicio de energía eléctrica continuo y de calidad. Por tal motivo, en los últimos años se han desarrollado proyectos de generación con fuentes de energía renovables que, además de cubrir la demanda existente y de permitir el desarrollo de economías emergentes, pueden también ayudar a erradicar los problemas asociados con la pobreza energética, mejorar la salud pública y el acceso a la educación [5], [6]. Por esto, se han desarrollado proyectos que buscan implementar sistemas de generación de naturaleza renovable como la energía solar fotovoltaica [7], energía eólica [8], energía biomasa [9] y energía geotérmica [10], donde se hace

necesario seleccionar la tecnología más adecuada para la zona que no se encuentre conectada eléctricamente, con el objetivo de evitar inconformidades y fallas en el sistema de generación renovable.

Investigaciones señalan que los proyectos de electrificación rural se presentan complejos debido a la variedad de factores por considerar [11], por tal motivo, en [12] se menciona que el éxito de la electrificación rural basada en energías renovables depende de una planeación adecuada y reciente que permita el aprovechamiento de los recursos disponibles localmente.

Dentro de la planificación energética también se busca implementar sistemas interconectados de distribución estables que permitan un mínimo número de interrupciones en el servicio; en este sentido, las *microgrid* aparecen como una alternativa, ya que son sistemas aislados y autocontrolados de distribución que permiten la conexión de diferentes fuentes de energía renovable, y pueden ser controlables en corrientes, voltajes, flujos de energía tanto reactiva como activa [13], [14].

Por tal motivo, para una planeación y toma de decisión adecuada de alternativas de generación, han surgido los métodos multicriterio, como una herramienta de selección sustentada en elementos científicos, que aporta mejoras distintivas para asumir una decisión a partir de múltiples criterios (cuantitativos y cualitativos), lo cual permite considerar los diferentes aspectos involucrados en la elección de un sistema de generación idóneo para zonas no interconectadas [15]. Estos métodos de decisión han tenido gran aplicabilidad y están ayudando en la toma de decisiones en el sector energético, dado que los sistemas de suministro de energía son un problema multidimensional con diversos criterios [16] [17]. Han sido múltiples las aplicaciones de métodos multicriterio (MCDM) en el sector eléctrico para facilitar la toma de decisiones.

En el sistema interconectado nacional de Colombia se ha propuesto una metodología basada en métodos multicriterio para la generación de electricidad; el autor menciona que la asignación basada en criterios de eficiencia utilizando MCDM resulta más eficaz debido a que se consideran otros aspectos aparte de los precios de

oferta. En diferentes proyectos y aplicaciones en el sector energético se concluye que estos métodos mejoran significativamente la toma de decisiones [18].

El objetivo de este artículo es realizar la correcta elección del sistema de generación en zonas no interconectadas, donde se han identificado los criterios que dificultan el acceso a la energía en Colombia. Se abordó una metodología multicriterio analítica jerárquica (AHP) considerando diferentes aspectos, entre estos, económicos, técnicos, sociopolíticos y ambientales, de modo que se garantice el desarrollo sostenible. El artículo se ha organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan algunas generalidades sobre energías renovables en Colombia, en la sección 3 se desarrolla la metodología de investigación, en la sección 4 se exponen los resultados y, para finalizar, en la sección 5 se evidencian las conclusiones.

2. Generalidades sobre energías renovables en Colombia

La posición geográfica de Colombia en la zona ecuatorial permite que el país cuente con un gran potencial para el aprovechamiento de recursos que promuevan el desarrollo de energías renovables no convencionales. La energía renovable se presenta como una alternativa para favorecer a los consumidores y atender la demanda ante la posibilidad de sequías provocadas por los cambios climáticos; además, contribuye a tener una matriz energética diversificada, donde no solo se aprovechen los recursos fósiles propios como el gas, carbón y el petróleo o los sistemas de generación tradicionales como las hidroeléctricas [19].

En el sector energético de Colombia, la mayor parte de la demanda de energía está cubierta por la participación del recurso hídrico, con un 70 %; seguido por termoeléctricas a gas, con un 11 %; carbón, con un 10 %; combustibles líquidos, con un 2 %, y casi un 1 % de recursos renovables no convencionales [6].

2.1. Sistema interconectado nacional (SIN)

El SIN lo componen más de 30 compañías de energía, entre empresas de generación, transmisión y distribución de energía en Colombia, junto con 209 plantas de generación (hidráulicas, térmicas, solares, eólicas, cogeneradores y autogeneradores) y 26.333 kilómetros aproximadamente de redes de energía. Está conformado por plantas de generación extendidas hacia el territorio nacional, y cuenta con redes de transmisión conectadas entre sí que permiten llevar y distribuir la energía que se produce a gran parte del territorio nacional.

El SIN comprende la tercera parte del territorio nacional, en la cual habita aproximadamente el 96 % de la población del país, con una cobertura de 95,54 %. A nivel urbano cubre aproximadamente el 99,35 % y a nivel rural presenta una cobertura del 83,39 % [19].

2.2. Zonas no interconectadas, ZNI

Las ZNI no cuentan con la disponibilidad del servicio eléctrico a través del SIN, debido a que son áreas geográficas de difícil acceso. Dentro de las características, se consideran como zonas de baja densidad poblacional, con distancias considerables respecto a zonas urbanas y con riquezas de recursos naturales. Las zonas no interconectadas en Colombia son aproximadamente el 52 % del territorio nacional, con 18 departamentos, 5 capitales departamentales, 36 cabeceras municipales, 95 municipios y más de 1.700 comunidades [4].

2.3. Dificultades para el acceso a la energía en Colombia

La gran mayoría de las zonas que carecen de electricidad se encuentran alejadas de la ciudad; dichas zonas no interconectadas utilizan mayoritariamente plantas de combustión interna con diésel para el suministro de fluido eléctrico, sin embargo, este no es constante por lo que se presentan dificultad para las comunidades rurales en el acceso confiable al suministro de energía, lo cual representa varias limitaciones [4]. Las condiciones geográficas, socioculturales y la vulnerabilidad del territorio colombiano debido al conflicto armado se presentan como grandes barreras, y causan que las brechas entre el campo y la ciudad sigan aumentando [20]. Algunas de las barreras en Colombia para el ingreso de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) se presentan en la tabla 1.

Por otro lado, también se han presentado barreras que han impedido la vinculación de FNCER a la matriz energética. Para la selección de los criterios empleados en la toma de decisión sobre el sistema de generación más adecuado para una región, se ha realizado una búsqueda y recopilación de información acerca de las barreras por tipo de tecnología, entre las cuales se encuentra energía solar fotovoltaica (FV), energía eólica, cogeneración por biomasa y energía geotérmica.

En la tabla 2 se presentan los aspectos que han dificultado la implementación de la generación solar FV en regiones alejadas [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Se presenta una clasificación que aborda diferentes dimensiones, tales como técnicas, económicas, sociopolíticas y ambientales.

Tabla 1. Barreras generales para el acceso universal a la energía

Dimensión	Indicador	Barreras
Técnicas	I1	Prejuicio tecnológico
Económicas	I2	Costos y financiamiento
	I3	Barreras de mercado
	I4	Externalidades
	I5	Costos transaccionales
Sociopolíticas	I6	Incentivos erróneos
	I7	Competencia imperfecta
	I8	Información
	I9	Capital humano
	I10	Orden público
	I11	Factores regulatorios e institucionales

Tabla 2. Barreras energía solar fotovoltaica

Dimensión	Indicador	Barreras
Técnica	BES1	Recursos humanos
	BES2	Ausencia de normatividad
	BES3	Disponibilidad del recurso
	BES4	Variación de la carga
	BES5	Información de potenciales
Económica	BES6	Financiación
Sociopolítica	BES7	Transporte
	BES8	Política energética
	BES9	Venta de excedentes
Ambiental	BES10	Extenso uso de área
	BES11	Afectaciones de la vida salvaje y el hábitat

En la tabla 3, se presentan los aspectos que han dificultado el acceso a sistemas de generación a partir de energía eólica [22], [26], [27], [28], para los cuales también se desarrolló una clasificación por tipo de dimensión, y se seleccionaron barreras técnicas, económicas, sociopolíticas y ambientales.

La generación por biomasa que se realiza principalmente en el sector industrial aporta a la canasta energética nacional, debido a que es un tipo de generación con alto grado de madurez respecto a su implementación, aun así, se identifican algunos aspectos que han dificultado su

desarrollo. En la tabla 4, se presentan las barreras para la generación por biomasa [22], [26], [29].

Tabla 3. Barreras energía eólica

Dimensión	Indicador	Barreras
Técnica	BEE1	Ausencia de normatividad
	BEE2	Infraestructura
	BEE3	Eficiencia energética
Económica	BEE4	Financiación
	BEE5	Costos de operación
Sociopolítica	BEE6	Licenciamiento
	BEE7	Desconocimiento
	BEE8	Política energética
Ambiental	BEE9	Ruido
	BEE10	Impacto aves migratorias

Tabla 4. Barreras energía por biomasa

Dimensión	Indicador	Barreras
Técnica	BEB1	Requisitos técnicos
Económica	BEB2	Respaldo
	BEB3	Costos
Sociopolítica	BEB4	Figura cogenerador
	BEB5	Política energética
	BEB6	Ausencia de conocimiento
Ambiental	BEB7	Cambio en la micro flora y fauna

La energía geotérmica, fuera de considerarse como un tipo de energía limpia, ha presentado dificultades o barreras que han impedido su desarrollo, igualmente que los demás sistemas de generación alternativa [30] [22], [26]. En la tabla 5, se describen los aspectos que han impedido su realización, clasificados por tipo de dimensión.

2.4. Selección del método multicriterio

Los métodos de decisión multicriterio han sido utilizados en algunas aplicaciones en sistemas de energías renovables. Vale la pena destacar los métodos de sobre clasificación o superioridad como ELECTRE y PROMETHEE, métodos de medición de valor o *ranking* como AHP y MAUT y métodos de nivel de preferencias o distancias como TOPSIS y VIKOR.

Uno de los principales problemas de la electrificación en zonas aisladas radica en escoger la alternativa de generación conveniente que garantice la sostenibilidad de los proyectos. Históricamente, se han seleccionado diferentes tipos de generación basados en FNCR, y

además se ha considerado un conjunto de criterios para la respectiva comparación entre las diferentes alternativas.

Para elegir la mejor alternativa de generación, se ha seleccionado, de los métodos multicriterio más utilizados en el sector eléctrico, el método proceso analítico jerárquico (AHP), debido a que involucra todos los aspectos de toma de decisiones, y permite considerar criterios tanto cualitativos como cuantitativos; además, es capaz de desarrollar completamente el proceso de toma de decisión. Por otro lado, permite al agente decisor realizar comparaciones, atribuyendo un valor numérico para cada alternativa; esto facilita la comprensión incorporando la participación de diferentes personas.

En la tabla 6 se muestra un análisis comparativo entre los diferentes métodos, el cual soporta la selección del método AHP.

Tabla 5. Barreras energía geotérmica

Dimensión	Indicador	Barreras
Técnica	EG1	Conocimientos técnicos
	EG2	Madurez de alternativa de generación
Económica	EG3	Alto costo de exploración
	EG4	Inversión inicial
Sociopolítica	EG5	Licenciamiento
	EG6	Inflexibilidad y desviaciones
Ambiental	EG7	Emisiones
	EG8	Contaminación en aguas

Después de analizar la tabla 6, y tras revisar algunos antecedentes de la temática bajo estudio [31], se puede concluir que las ventajas del método AHP frente a los demás son:

- Presenta un sustento matemático a partir de la formulación que involucra a los factores de decisión.
- Permite desglosar y analizar un problema por partes.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Incluye la participación de diferentes personas o grupos de interés, y genera un consenso.
- Permite verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es el caso.
- Genera una síntesis y da la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
- Es de fácil uso y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

Una vez seleccionado el método multicriterio para escoger la mejor alternativa de generación, se procedió a implementarlo en un caso de estudio real.

Con la identificación de las barreras que presentan las FNCER, además de las dificultades para acceder al servicio de energía en Colombia, se lograron recoger e identificar los criterios y subcriterios que al implementar el método AHP permitan determinar la mejor solución energética. Para esta identificación se seleccionaron los siguientes cuatro criterios iniciales:

- Aspectos técnicos
- Económicos
- Sociopolíticos
- Ambientales.

A partir de estos criterios, se eligieron las barreras y los aspectos más relevantes para la selección del tipo de generación pertinente para una zona no interconectada, los cuales fueron considerados para este procedimiento como subcriterios.

En la tabla 7 se presentan los diferentes criterios y subcriterios con su respectivo indicador.

Tabla 6. Comparación de métodos multicriterio

Criterios	Métodos Multicriterio					
	Electre	Promethee	Ahp	Maut	Topsis	Vikor
Complejidad	Media	Baja	Baja	Alta	Baja	Media
Antecedentes	Alta	Alta	Alta	Baja	Media	Media
Nivel de subjetividad	Media	Media	Baja	Alta	Media	Media
Aplicación	Media	Media	Alta	Baja	Media	Media
Flexibilidad	Baja	Media	Media	Baja	Media	Baja

Tabla 7. Criterios que dificultan el acceso a sistemas de energía en Colombia

Criterios	Indicador	Subcriterios
Técnicos	DR	Disponibilidad del recurso
	VC	Variación de la carga
	AN	Ausencia de normatividad
	I	Infraestructura
	EE	Eficiencia energética
	MA	Madurez de alternativa de generación
Económicos	F	Financiación
	II	Inversión inicial
	CO	Costos de operación
Sociopolíticos	IC	Información y conocimiento
	L	Licenciamiento
	PE	Política energética
	AA	Aceptación de alternativa
Ambientales	EA	Extenso uso de área
	AB	Afectación en la biodiversidad
	CC	Cambio climático

Teniendo en cuenta las diferentes barreras o criterios que dificultan el acceso al servicio de energía a partir de energías renovables, se desarrolló una búsqueda de información sobre un estudio real donde fuera posible validar la metodología propuesta. Se utilizó como caso de estudio un proyecto en el resguardo indígena Calle Santa Rosa (Timbiquí, Cauca), cuya región goza de un gran potencial de recursos energéticos, en el cual se puede implementar un sistema de generación basado en energías renovables, y donde se puede realizar un análisis comparativo entre alternativas.

La región requiere cubrir las necesidades básicas de orden energético, como refrigeración de alimentos, iluminación, bombeo de agua, electrificación para la escuela y la comunidad, de manera que se garantice el desarrollo sostenible. Con el objetivo de escoger la mejor solución energética para esta región, se procedió a hacer un análisis teniendo en cuenta los diferentes aspectos y entornos, con base en las barreras o criterios estipulados en la tabla 7. Las alternativas que se tienen en cuenta en este proyecto son la energía solar fotovoltaica, energía por biomasa, energía eólica y energía geotérmica.

3. Metodología

3.1. Análisis de criterios y datos técnicos de la región

Inicialmente, se desarrolló una recopilación de información de criterios técnicos de la región para las diferentes soluciones energéticas. Para esto se utilizaron las siguientes bases de datos:

- UPME: mapas solares, de viento y de biomasa [32], [33].
- IRENA [34].
- NASA: permite encontrar datos de los diferentes potenciales en la región de interés.

En cuanto a la disponibilidad del recurso, se encontraron datos para la zona de interés, como los expuestos a continuación:

- Radiación solar promedio anual 4,214 kw/m² [33]
- Velocidad del viento promedio anual 2,1133 m/s a 50 m de altura [32].
- Biomasa residual: plátano 10-40 mil ton/año o 20-50 TJ/año [35].
- Caudal del río Saija: 166 m³/s máxima altura cercana 17 m.

Con base en la información anteriormente expuesta de los datos técnicos de la región, se tiene que la disponibilidad del viento no es muy favorable; en cuanto al río, se logró identificar que presenta un muy buen caudal, pero no tiene alturas considerables, lo que lo hace poco viable desde una perspectiva técnica, y, además, la comunidad fue consultada sobre la utilización de este recurso para la generación de electricidad y no estuvo de acuerdo, esto debido a sus creencias religiosas, las cuales consideran el agua como un recurso sagrado. En cuanto a los potenciales de radiación solar y biomasa residual, los datos arrojan la riqueza de disponibilidad del recurso. En las figuras 1 y 2 se observa una vista general de las condiciones del resguardo indígena Calle Santa Rosa.



Figura 1. Centro educativo en el resguardo indígena Calle Santa Rosa.



Figura 2. Ingreso al resguardo indígena Calle Santa Rosa a través del río Saija.

3.2. Análisis de criterios y datos económicos

La comunidad de la región indígena Calle Santa Rosa basa su economía en la agricultura, artesanía, caza, pesca y aprovechamiento forestal, lo cual los favorecería para

adquirir nuevos conocimientos sobre el aprovechamiento y manejo del recurso de biomasa, por ejemplo, la operación y mantenimiento de sistemas energéticos con base en este potencial que pueden ser replicados a otras comunidades similares. Por otro lado, los sistemas solares se presentan, en cuanto a inversión inicial y costos de operación, como una de las mejores alternativas después de la biomasa, debido a que no requiere tanta inversión en comparación con otras tecnologías de generación. Los sistemas solares permitirían cubrir algunas de las necesidades básicas insatisfechas y mejorar el bienestar en la comunidad al ofrecer energía para la escuela, la refrigeración de alimentos y las comunicaciones, con lo cual se espera contribuir con el desarrollo del resguardo al disponer de mejores condiciones de estudio, conservación y comercialización de pescado.

3.3. Análisis de criterios y datos sociopolíticos

El nivel educativo de la población es bajo, por lo cual se debe considerar que la solución energética para la región debe contar con un sistema de generación cuya transferencia tecnológica para la operación y mantenimiento de los equipos asociados al aprovechamiento no sea compleja y no requiera de una experiencia alta, lo cual hace posible que en un tiempo no mayor a un año se logre capacitar a las personas de la comunidad para la operación y mantenimiento básico de los equipos y sistemas que se deseen instalar. También se debe tener en cuenta que el territorio es plano con alta afluencia hídrica, cuyas vías de acceso y comunicación se limitan a los ríos, por lo que el uso del recurso agua para el sistema hidráulico se hace restrictivo.

3.4. Análisis de criterios y datos culturales

La región goza de una zona rica tanto en disponibilidad de recursos como en biodiversidad, con abundancia de agua, presencia de flora y fauna típicas del bosque húmedo tropical, con presencia de manglares y condiciones climatológicas de alta humedad, nivel de salinidad medio y temperatura media.

Con el objetivo de identificar el nivel de impacto ambiental de cada tecnología renovable para la región, se realizó un análisis de la disponibilidad de fuentes energéticas de la zona, donde se encontró que el tipo de generación solar no presentaría afectaciones importantes al ambiente, ya que la intervención para su instalación es mínima y, en caso de operación y mantenimiento, se tendría un plan de manejo para las baterías principalmente.

Por otro lado, para la fuente de generación hídrica, el manejo ambiental durante la implementación y en la operación y mantenimiento sería mucho más complejo que en el solar, dada la presencia de peces y el uso del agua para consumo y transporte, por lo que el impacto ambiental podría ser medio-alto al tener que desviar parte del río o intervenir directamente en su caudal.

En cuanto a sistemas de generación con biomasa residual proveniente de leña o de los aserríos cercanos y de los cultivos de plátano y maíz, principalmente, este recurso tiene un impacto ambiental medio, ya que si bien requiere de planes de manejo ambiental específicos, la disponibilidad del recurso es alta y permite trazar programas de mitigación para no tener afectaciones negativas en la zona por deforestación y/o erosión, lo cual va en línea con las zonas de restricción ambiental consideradas por la comunidad.

La generación a partir de sistemas eólicos en esta región se considera medio-alto debido a la diversidad de la zona, la cual goza de gran variedad de especies de aves, donde estos sistemas podrían generar impactos que incluyen la mortalidad de las aves por colisión con los aerogeneradores, el desplazamiento de especies por modificación del hábitat, y podría impedir el paso de aves migratorias.

4. Resultados

Teniendo en cuenta el análisis de criterios en la región indígena de Santa Rosa y las diferentes ventajas de las alternativas, una respecto a la otra, se procedió a implementar el método multicriterio AHP que permite identificar la mejor solución energética para dicha región.

4.1. Implementación de método multicriterio AHP

4.1.1. Construcción de jerarquía

Inicialmente, se analiza el problema separando los aspectos más relevantes, y se define el objetivo, el cual es identificar la mejor alternativa o solución energética; posteriormente, se identifican los criterios, donde para este caso real se establecen aspectos técnicos, económicos, sociopolíticos y ambientales. Luego, se establecen los subcriterios, tomados de las barreras que dificultan el acceso a sistemas de energía en Colombia, expuestos en la tabla 8, para finalmente establecer las alternativas de generación FNCER.

Con lo mencionado anteriormente se construye el orden jerárquico mostrado en la figura 3, cumpliendo con el primer principio del método AHP.

4.1.2. Establecimiento de prioridades

Como segundo principio, el método AHP inicialmente propone realizar una comparación pareada entre subcriterios, para lo cual se deben estipular valores de acuerdo a la escala de Saaty, presentada en la tabla 8, la cual busca encontrar el nivel de importancia de un subcriterio frente al otro.

Para esta comparación, se formó una matriz con el fin de establecer cuánto supera un subcriterio al otro. Las comparaciones entre diferentes criterios o subcriterios se realizan entre filas y columnas, por ejemplo, si un subcriterio tiene un nivel de importancia más alto respecto a otro, se agrega un valor de 1 a 9 dependiendo del nivel de importancia según la escala de Saaty.

Tabla 8. Escala de Saaty, comparación pareada

Escala numérica	Escala verbal	Interpretación
1	Igual importancia de ambos criterios	Los dos criterios contribuyen de la misma forma al objetivo
3	Moderada importancia de un criterio sobre otro	Uno de los criterios es levemente favorecido
5	Fuerte importancia de un criterio sobre otro	Uno de los criterios es fuertemente favorecido
7	Muy fuerte importancia de un criterio sobre otro	Uno de los criterios es fuertemente dominante
9	Extrema importancia de un criterio sobre otro	Uno de los criterios domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2 / 4 / 6 / 8	Valores intermedios	Para juicios intermedios

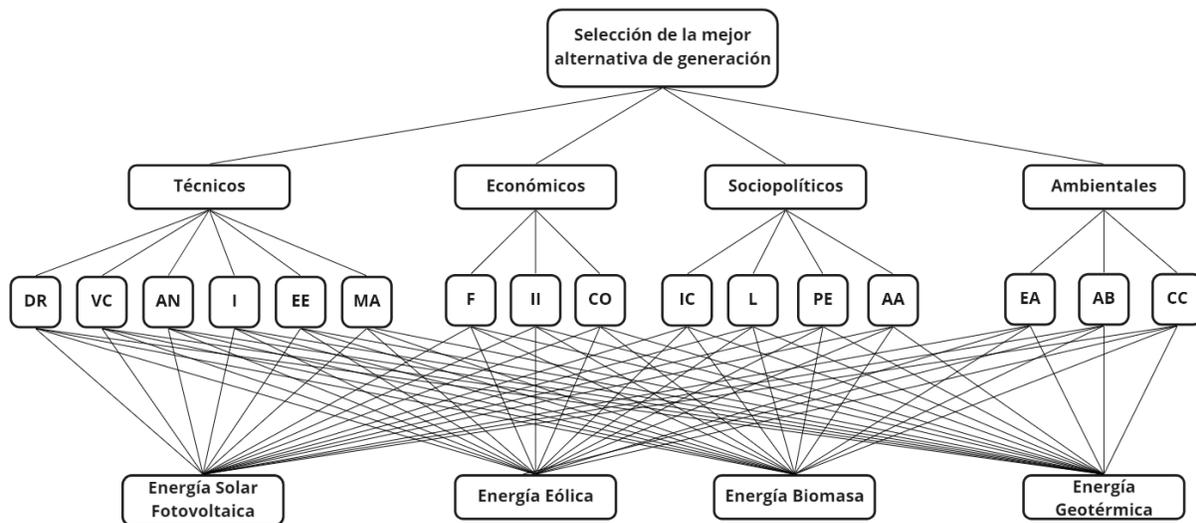


Figura 3. Esquema jerárquico caso de estudio real.

Para llenar la matriz de comparación pareada entre criterios, el método propone que, si se agrega un valor x al realizar la comparación entre un subcriterio 1 y un subcriterio 2, la comparación inversa, es decir, subcriterio 2 respecto a subcriterio 1, tendrá el valor de $1/x$.

La comparación pareada entre subcriterios, de manera que pudiera identificarse su nivel de importancia, fue obtenida de acuerdo a los siguientes ítems:

- Bases de datos gubernamentales entregadas por instituciones como el IPSE, UPME y el Ministerio de Minas y Energía: se realizaron consultas de históricos sobre proyectos de energización rural que estas instituciones han liderado en todo el país [36], [37], [38].
- Conocimiento de expertos sobre proyectos de energización rural, quienes han participado en diferentes proyectos de energización rural y tienen la experiencia certificada sobre su conocimiento de la temática; gracias a esto se han incluido elementos diferentes a los técnicos que garantizan la sostenibilidad de proyectos de este tipo.
- Análisis de condiciones climatológicas (datos tomados del IDEAM) e información y datos recopilados por medio de encuestas realizadas en la zona del caso de estudio, las cuales son fundamentales para definir los criterios de tipo social empleados en la comparación pareada [33], [32].

En la tabla 9 se evidencia la comparación pareada entre subcriterios, la cual puede ser utilizada para cualquier estudio de caso real.

Como se evidencia en la tabla 9, la diagonal de la matriz de comparación pareada tiene como valor la unidad, esto debido a que se está realizando una comparación entre el mismo subcriterio, lo que en referencia a la escala de Saaty equivale a igual importancia.

En el caso de la comparación del subcriterio 'disponibilidad del recurso' con varios subcriterios, se evidencia que el nivel de importancia es muy alto, debido a que, si no se cuenta con el recurso primario para desarrollar una tecnología de generación, no se podría ejecutar algún proyecto, por lo que este subcriterio técnico se califica como muy importante. Por otro lado, subcriterios ambientales y sociales también tienen un alto nivel de importancia, debido a que se mide la aceptación de la alternativa.

4.1.3. Consistencia lógica

Haciendo uso del *software* Matlab, versión 2019a, se desarrolló un *script* programado con las ecuaciones y operaciones propuestas por el método, donde se tomó la matriz de comparación pareada entre subcriterios ya desarrollada y se ejecutó el tercer principio del método multicriterio, el cual consiste en identificar si los valores según la escala de Saaty fueron estipulados correctamente para dicha comparación, es decir, si la calificación es correcta, de modo que no se presenten inconsistencias. Se calculó una suma ponderada para cada columna de la matriz de comparación pareada que permitiera encontrar el peso total por columna. Luego, se dividió punto a punto cada peso de la matriz de comparación pareada entre el peso total por columna, con el objetivo de normalizar la matriz.

Tabla 9. Comparación pareada entre criterios

	DR	VC	AN	I	EE	MA	F	II	CO	IC	L	PE	AA	EA	AB	CC
DR	1	8	9	7	6	4	3	4	3	3	7	9	3	7	4	4
VC	0,12	1	1	4	1	0,17	0,17	0,2	0,2	0,14	1	3	0,2	3	0,33	0,33
AN	0,11	1	1	0,3	0,2	0,2	0,14	0,33	0,2	0,14	1	0,5	0,2	1	0,2	0,2
I	0,14	0,25	3	1	0,33	0,2	0,14	0,25	0,33	0,2	1	3	0,3	1	0,2	0,33
EE	0,16	1	5	3	1	0,33	0,2	0,5	0,5	0,25	3	3	0,2	3	0,2	0,33
MA	0,25	6	5	5	3	1	0,33	3	0,33	0,25	4	5	0,3	4	0,2	0,33
F	0,33	6	7	7	5	3	1	3	3	0,33	7	7	1	7	3	3
II	0,25	5	3	4	2	0,33	0,33	1	0,33	0,2	3	5	0,3	3	0,5	0,33
CO	0,33	5	5	3	2	3	0,33	3	1	0,33	4	4	0,3	4	3	4
IC	0,33	7	7	5	4	4	3	5	3	1	7	7	3	7	3	3
L	0,14	1	1	1	0,33	0,25	0,14	0,33	0,25	0,14	1	2	0,2	2	0,33	0,25
PE	0,11	0,33	2	0,3	0,33	0,2	0,14	0,2	0,25	0,14	0,5	1	0,1	0,33	0,33	0,2
AA	0,33	5	5	7	5	4	1	3	3	0,33	5	7	1	7	3	3
EA	0,14	0,33	1	1	0,33	0,25	0,14	0,33	0,25	0,14	0,5	3	0,1	1	0,33	0,33
AB	0,25	3	5	5	5	5	0,33	2	0,33	0,33	3	3	0,3	3	1	1
CC	0,25	3	5	3	3	3	0,33	3	0,25	0,33	4	5	0,3	3	1	1

Los resultados de normalización de la matriz de comparación pareada para el caso de estudio se evidencian en la tabla 10.

Después, se calculó el promedio de cada fila de la matriz normalizada para obtener la ponderación de los subcriterios estipulados y, con ello, hallar el vector de prioridades inicial. En la tabla 11 se muestra el vector de prioridades resultante para la comparación entre subcriterios, donde al observar inicialmente sus valores se identifica que la disponibilidad del recurso es el criterio más importante.

Luego, se realizó una suma ponderada de los valores del vector resultante que permitió encontrar el máximo valor propio mediante la ecuación 1.

$$\lambda_{max} = \sum \lambda w = 18,4599 \tag{1}$$

Una vez calculado el máximo valor propio, se procedió a encontrar el índice de consistencia (CI), donde al máximo valor propio se le sustrajo el tamaño de las columnas de la matriz y se dividió entre el tamaño de las columnas de la matriz menos 1.

Tabla 10. Matriz Normalizada

0,23	0,151	0,138	0,123	0,16	0,138	0,28	0,14	0,184	0,412	0,13	0,133	0,27	0,12	0,19	0,18
0,03	0,019	0,015	0,070	0,03	0,005	0,02	0,01	0,012	0,02	0,02	0,044	0,02	0,05	0,02	0,02
0,03	0,019	0,015	0,005	0,01	0,006	0,01	0,01	0,012	0,02	0,02	0,007	0,02	0,02	0,01	0,01
0,03	0,005	0,046	0,017	0,01	0,006	0,01	0,01	0,020	0,027	0,02	0,044	0,03	0,02	0,01	0,02
0,04	0,019	0,077	0,052	0,03	0,011	0,02	0,02	0,030	0,034	0,06	0,044	0,02	0,05	0,01	0,02
0,06	0,113	0,077	0,088	0,08	0,034	0,03	0,1	0,020	0,034	0,08	0,074	0,02	0,07	0,01	0,02
0,08	0,113	0,108	0,123	0,13	0,103	0,09	0,1	0,184	0,046	0,13	0,104	0,09	0,12	0,15	0,14
0,06	0,094	0,046	0,070	0,05	0,011	0,03	0,03	0,020	0,027	0,06	0,074	0,03	0,05	0,02	0,02
0,08	0,094	0,077	0,052	0,05	0,103	0,03	0,1	0,061	0,046	0,08	0,059	0,03	0,07	0,15	0,18
0,08	0,132	0,108	0,088	0,1	0,138	0,28	0,17	0,184	0,137	0,13	0,104	0,27	0,12	0,15	0,14
0,03	0,019	0,015	0,017	0,01	0,008	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01
0,03	0,006	0,031	0,005	0,01	0,006	0,01	0,01	0,015	0,02	0,01	0,015	0,01	0,01	0,02	0,01
0,08	0,094	0,077	0,123	0,13	0,138	0,09	0,1	0,184	0,046	0,1	0,104	0,09	0,12	0,15	0,14
0,03	0,006	0,015	0,017	0,01	0,008	0,01	0,01	0,015	0,02	0,01	0,044	0,01	0,02	0,02	0,02
0,06	0,057	0,077	0,088	0,13	0,172	0,03	0,07	0,020	0,046	0,06	0,044	0,03	0,05	0,05	0,05
0,06	0,057	0,077	0,052	0,08	0,103	0,03	0,1	0,015	0,046	0,08	0,074	0,03	0,05	0,05	0,05

En la ecuación 2 se identifica el proceso que arrojó un valor equivalente a 0,1639.

$$CI = \frac{\lambda \max - c}{c - 1} = \frac{18,4599 - 16}{16 - 1} = 0,1639 \quad (2)$$

Tabla 11. Vector de prioridades inicial

Subcriterio	Ponderación
Disponibilidad del recurso	0,2449
Variación de la carga	0,1397
Ausencia de normatividad	0,0274
Infraestructura	0,0185
Eficiencia energética	0,0213
Madurez de alternativa de generación	0,0303
Financiación	0,0236
Inversión inicial	0,0362
Costos de operación	0,0245
Información y conocimiento	0,0344
Licenciamiento	0,0324
Política energética	0,0245
Aceptación de alternativa	0,0469
Extenso uso de área	0,0794
Afectación en la biodiversidad	0,0964
Cambio climático	0,1196

Luego, se realizó una suma ponderada de los valores del vector resultante que permitió encontrar el máximo valor propio mediante la ecuación 1.

$$\lambda_{max} = \sum \lambda w = 18,4599 \quad (1)$$

Una vez calculado el máximo valor propio, se procedió a encontrar el índice de consistencia (CI), donde al máximo valor propio se le sustrajo el tamaño de las columnas de la matriz y se dividió entre el tamaño de las columnas de

la matriz menos 1. En la ecuación 2 se identifica el proceso que arrojó un valor equivalente a 0,1639.

$$CI = \frac{\lambda \max - c}{c - 1} = \frac{18,4599 - 16}{16 - 1} = 0,1639 \quad (2)$$

Segundo, se calculó la consistencia aleatoria multiplicando un valor aleatorio propuesto por autores del método por la división del tamaño de la matriz de comparación pareada menos 2 entre el mismo tamaño de la matriz. El resultado de la consistencia aleatoria se muestra a continuación:

$$CA = 1,98 * \frac{c - 2}{c} = 1,98 * \frac{16 - 2}{16} = 1,7325 \quad (3)$$

Por último, se calculó la relación de consistencia que nos permitió identificar si la valoración en la comparación pareada entre subcriterios se realizó correctamente. En la ecuación 4 se evidencia el resultado obtenido, el cual es del 9 %, lo que quiere decir que la asignación de valores según la escala de Saaty se realizó correctamente porque está por debajo del 10 %.

$$CR = \frac{CI}{CA} = \frac{0,1639}{1,7325} = 0,09 \quad (5)$$

Con la verificación de la asignación de valores de manera satisfactoria, se procedió a realizar la comparación pareada entre alternativas para cada criterio. En la tabla 7 se evidencian los 16 criterios que se establecieron para encontrar la mejor alternativa de generación para zonas no interconectadas, por lo cual se generaron 16 matrices a las cuales se le asignaron valores según la escala de Saaty; se realizó la comparación pareada entre alternativas para cada criterio.

Tabla 12. Matriz para ponderación final

Subcriterio/ Alternativa	DR	VC	AN	I	EE	MA	F	II	CO	IC	L	PE	AA	EA	AB	CC
Energía eólica	0,02	0,04	0,04	0,02	0,15	0,06	0,02	0,02	0,01	0,06	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03
Energía solar fotovoltaica	0,15	0,16	0,16	0,14	0,02	0,15	0,15	0,06	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,13	0,13
Energía por biomasa	0,05	0,02	0,02	0,06	0,05	0,02	0,06	0,15	0,05	0,03	0,07	0,03	0,07	0,05	0,07	0,07
Energía geotérmica	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,009
Ponderación	0,18	0,02	0,01	0,02	0,03	0,05	0,11	0,04	0,07	0,14	0,01	0,01	0,11	0,01	0,06	0,05

La asignación de los pesos para estas matrices se realizó con base a levantamiento de información de la región indígena de Santa Rosa, Timbiquí, y gracias al conocimiento de expertos por medio de encuestas realizadas en la zona de Timbiquí.

Una vez se obtuvieron las matrices de comparación entre alternativas, se calculó la matriz normalizada para cada una de estas y se encontró el vector de prioridades para cada criterio, de la misma forma como se calculó el vector de prioridades inicial. Para la comparación entre alternativas por cada criterio también se calculó la relación de consistencia, con el fin de verificar que la comparación efectuada entre alternativas se realizó correctamente asignando pesos consistentes. El programa desarrollado en Matlab, el cual cuenta con las anteriores ecuaciones expuestas, arrojó 16 vectores, los cuales se organizaron en un arreglo junto con el vector encontrado de prioridades inicial, y se denominó la matriz de ponderación final mostrada en la tabla 12, la cual contiene los diferentes pesos y el nivel de importancia de cada alternativa para cada criterio. En la última fila de la matriz se ubicó el vector de prioridades inicial, donde se encuentran los pesos y el nivel de importancia de cada criterio.

4.1.4. Ranking de prioridad global

Para la ponderación final se tomó la matriz de ponderación final y se multiplicó cada valor de la primera fila por la última fila, es decir, por el vector de prioridades de criterios, y se sumaron sus respectivos valores; de igual forma se realizó con la segunda fila y con las demás filas, lo cual nos entregó el vector de ponderación final para cada alternativa. Los valores arrojados por el programa se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Ponderación final caso de estudio

Alternativas de generación	Ponderación final
Energía eólica	0,0397
Energía solar fotovoltaica	0,1379
Energía por biomasa	0,0600
Energía geotérmica	0,0124

Los datos expuestos en la tabla 14 muestran que la mejor alternativa de generación para el resguardo indígena Calle Santa Rosa es a partir de la energía solar fotovoltaica, con un 14 %, seguida de la energía por biomasa con un 6 %. Según la consulta bibliográfica realizada [31], este es un porcentaje común para seleccionar la fuente adecuada, esto se debe a que se

utilizó una gran cantidad de criterios, y los porcentajes se dividen en todas las posibles fuentes no convencionales por seleccionar.

Con el objetivo de utilizar el programa desarrollado en Matlab en otros proyectos o casos de estudio que requieran identificar la mejor alternativa de generación para una zona no interconectada, se desarrolló una interfaz con la herramienta *guide* de Matlab, donde se debe ingresar el nombre de la base de datos que contenga la calificación o ponderación por alternativa para cada criterio, la cual fue definida con base en las encuestas realizadas y el levantamiento de información de la zona. El programa entregará la mejor solución energética, teniendo en cuenta la calificación dada según la escala de Saaty para cada criterio. En la figura 4 se muestra el inicio de la plataforma.

Cuando se selecciona INICIAR en la interfaz, el programa despliega una ventana donde se debe ingresar el nombre de la base de datos (figura 5). Para comprobar su funcionamiento, se realizó una prueba con el caso de estudio de la zona de Santa Rosa anteriormente expuesto.



Figura 4. Inicio de plataforma.

Para el proyecto de la zona de Timbiquí, se utilizó una base de datos desarrollada en el programa informático Microsoft Excel, donde se realizó la calificación pertinente según la escala de Saaty, y se elaboraron las diferentes matrices; la base de datos se denominó “DCE”. El programa se desarrolló para recibir el nombre de la base de datos donde está la calificación, ejecutar los respectivos cálculos del método AHP y entregar la mejor solución energética para la zona. Cuando se ingresa el nombre de la base de datos, el programa pide seleccionar las alternativas para evaluar, y entrega el resultado. En la figura 6 se muestra el resultado final donde se evidencia la mejor alternativa para la zona Santa Rosa de Timbiquí.

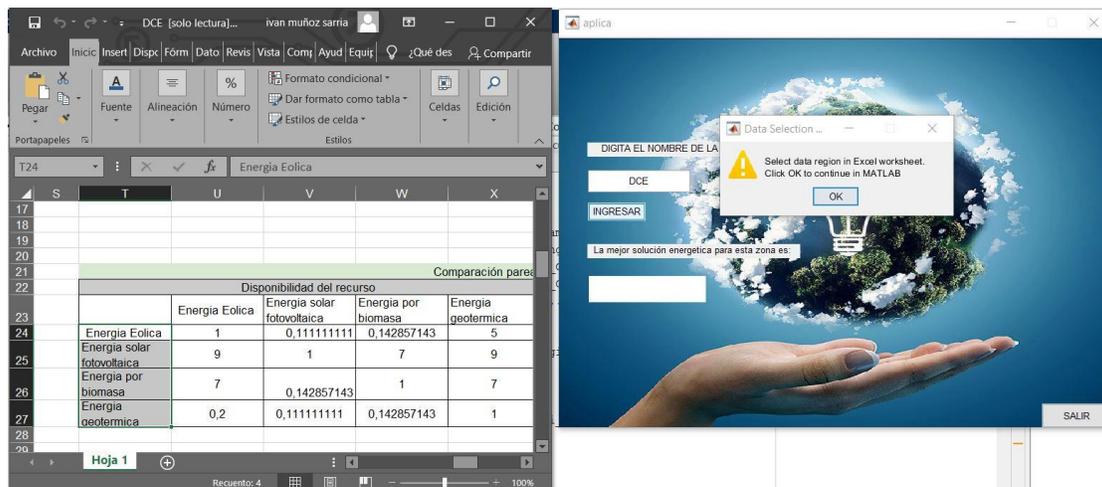


Figura 5. Aplicación interfaz gráfica.

Conclusión

Se han establecido las barreras que dificultan la aplicación e instalación de FNCER en zonas no interconectadas en Colombia, y a partir de estas se han definido algunos criterios, los cuales toman en consideración todos los aspectos que intervienen en la elección de la mejor tecnología; de esta manera, es posible garantizar el desarrollo sostenible para este tipo de proyectos.

El trabajo presentado en este artículo ha permitido generar una interfaz de usuario que, a partir de la utilización del método AHP, determina la mejor alternativa de generación basada en fuentes no convencionales de energía que puede implementarse en una región determinada. Por la facilidad de implementación, la consideración de datos cuantitativos y cualitativos y por permitir la participación de expertos por medio de la escala de Saaty, el método AHP logra identificar la mejor alternativa de implementación, y disminuye la subjetividad y aleatoriedad a la hora de la toma de decisión.

El método AHP permite incorporar factores que no son cuantificables en modelos matemáticos, pero son de alta importancia en la sostenibilidad de proyectos de energización rural.

El método AHP es altamente sensible al conocimiento de expertos, claramente es una estrategia heurística y esto queda reflejado en los cambios que se presentan al incluir los resultados de las encuestas realizadas a expertos. A medida que se añaden nuevas respuestas de las encuestas,

el resultado final se va ajustando a las prioridades asignadas.

La inclusión de factores diferentes a los técnicos en la selección de una solución energética permite garantizar la sostenibilidad del proyecto. Los factores sociales son difíciles de modelar, en este artículo se incluyen en la toma de decisiones.

Teniendo en cuenta todos los criterios definidos, al implementar el método analítico jerárquico en una herramienta computacional como Matlab, se logra automatizar y optimizar el proceso de elección de una fuente de generación para un estudio de caso.

El estudio de caso presentado para validar la metodología propuesta ha permitido demostrar la influencia de múltiples criterios en la selección de una solución energética.

La utilización de energías renovables es la única alternativa que tienen muchos habitantes de zonas aisladas para tener servicios básicos domiciliarios. Lo expuesto en este documento permitirá viabilizar soluciones que a veces solo consideran factores técnicos, los cuales son altamente relevantes, pero no toman en cuenta las necesidades reales de las comunidades.

El desarrollo de este artículo ha generado un documento que contiene un diagnóstico del estado actual de los sistemas de energías renovables en Colombia y, además, una revisión teórica de los principales tipos de tecnologías empleados para la conversión de energía. Se ha realizado una revisión teórica de algunos de los

denominados métodos multicriterio y se ha presentado un análisis comparativo que permite entender cuál es la estrategia más adecuada para utilizar en proyectos de energización en zonas aisladas.

Referencias

- [1] J. Alexis, G. Castro, S. Universidad, S. T.-S. Bogotá, and F. de Derecho, “Garantía de la prestación del servicio público de energía eléctrica y régimen tarifario para materializar los principios de continuidad, ampliación y cobertura.” 2021.
- [2] M. Acuna *et al.*, “Operational planning of energy for non-interconnected zones: A simulation-optimization approach and a case study to tackle energy poverty in colombia,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 10, 2021, doi: 10.3390/en14102789.
- [3] F. León Paimé, “Desafíos contemporáneos en el desarrollo del sector eléctrico colombiano,” *REC*, vol. 7, no. 10, pp. 87-111, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.53995/23463279.629>.
- [4] J. F. García-Franco, S. X. Carvajal-Quintero, and S. Arango-Aramburo, “Rational and efficient energy use programs in Non-Interconnected Zones in Colombia: a system dynamics analysis,” *Energy Efficiency*, vol. 14, no. 7, Oct. 2021, doi: 10.1007/s12053-021-09989-2.
- [5] G. Zubi, R. Dufo-López, G. Pasaoglu, and N. Pardo, “Techno-economic assessment of an off-grid PV system for developing regions to provide electricity for basic domestic needs: A 2020-2040 scenario,” *Applied Energy*, vol. 176, pp. 309-319, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.022.
- [6] R. Moreno, S. A. Cantillo, and L. A. Carrillo-Rodríguez, “Risk analysis of firm energy coverage in Colombia in the medium term,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 11, no. 2, pp. 220-226, 2021, doi: 10.32479/ijeeep.10490.
- [7] A. R. López *et al.*, “Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market,” *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 1266-1279, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.066.
- [8] M. de los A. Maldonado, J. K. Moreno Calderon, Y. A. Muñoz Maldonado, and A. Ospino, “Technical and Economic Evaluation of a Small-Scale Wind Power System Located in Berlin, Colombia.,” *TECCIENCIA*, vol. 13, no. 24, pp. 63-72, Sep. 2019, doi: 10.18180/tecciencia.2018.24.7.
- [9] A. Sagastume Gutiérrez, J. J. Cabello Eras, L. Hens, and C. Vandecasteele, “The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 269, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122317.
- [10] D. A. Moreno-Rendón, I. J. López-Sánchez, and D. Blessent, “Geothermal energy in Colombia as of 2018,” *Ingeniería y Universidad*, vol. 24, no. 1. Pontificia Universidad Javeriana, 2020. doi: 10.11144/Javeriana.iyu24.geic.
- [11] J. J. Cabello Eras, J. M. Mendoza Fandiño, A. Sagastume Gutiérrez, J. G. Rueda Bayona, and S. J. Sofan German, “The inequality of electricity consumption in Colombia. Projections and implications,” *Energy*, vol. 249, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123711.
- [12] M. J. Herington, E. van de Fliert, S. Smart, C. Greig, and P. A. Lant, “Rural energy planning remains out-of-step with contemporary paradigms of energy access and development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67. Elsevier Ltd, pp. 1412-1419, Jan. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.103.
- [13] S. M. Bhagavathy and G. Pillai, “PV microgrid design for rural electrification,” *Designs (Basel)*, vol. 2, no. 3, pp. 1-22, Sep. 2018, doi: 10.3390/designs2030033.
- [14] V. Motjoadi, P. N. Bokoro, and M. O. Onibonoje, “A review of microgrid-based approach to rural electrification in South Africa: Architecture and policy framework,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/en13092193.
- [15] E. Strantzali and K. Aravossis, “Decision making in renewable energy investments: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55. Elsevier Ltd, pp. 885-898, Mar. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.021.
- [16] L. Li, X. Deng, J. Zhao, F. Zhao, and J. W. Sutherland, “Multi-objective optimization of tool path considering efficiency, energy-saving and carbon-emission for free-form surface milling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 3311-3322, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.219.

- [17]A. Kumar *et al.*, “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 596-609, Mar. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- [18]A. C. Marques *et al.*, “Support for multicriteria group decision with voting procedures: Selection of electricity generation technologies,” *Cleaner Environmental Systems*, vol. 3, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cesys.2021.100060.
- [19]D. M. Molano & W. Ramírez, “Exposición de las principales políticas públicas relacionadas con la cobertura energética renovable de zonas no interconectadas en Colombia, Repositorio Institucional UNAD. Universidad Nacional,” 2020.
- [20]Á. P. Sepúlveda, “Soluciones energéticas para zonas rurales (¿En el posconflicto?),” *Revista de ingeniería*, no. 44, pp. 36-39, 2016, doi: <https://doi.org/10.16924/revinge.44.5>.
- [21]G. S. Fernández, L. E. Ortiz, and F. J. Posso, “Proponer la instalación de Paneles Solares de Energía Fotovoltaica en el Jardín Parque Cementerio Los Olivos Ubicado en el Municipio de Cota en el Departamento de Cundinamarca – Colombia,” *Trabajo de grado, Repositorio Institucional UNAD. Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 2019.
- [22]UPME, “Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,” 2015, Accessed: Feb. 19, 2022. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Doc_Hemeroteca/Estudio_integracion_energias/Integracion_energias_renovables.pdf
- [23]S. Cortes and A.A. Londoño, “Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía,” vol. 25, no. 38, pp. 375-390, 2017, doi: rces.v25n38.a7.
- [24]C. Adrián Correa Flórez, G. Alberto Marulanda García, and A. Felipe Panesso Hernández, “Impact of penetration of solar PV energy in distribution systems: case of study based on assumptions of the colombian context,” *Revista Tecnura*, vol. 20, no. 50, pp. 85-95, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a06.
- [25]J. Gómez-Ramírez, J. D. Murcia-Murcia, and I. Cabeza-Rojas, “La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas,” 2017.
- [26]J. Manuel and M. Navarrete, “Selección de criterios ambientales para la evaluación multicriterio de alternativas de suministro de energía eléctrica en zonas no interconectadas de Colombia,” *Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Occidente*, 2017.
- [27]B. G. Guerrero Hoyos, F. D. J. Vélez Macías, and D. E. Morales Quintero, “Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia),” *Ambiente y Desarrollo*, vol. 23, no. 44, Feb. 2020, doi: 10.11144/javeriana.ayd23-44.eets.
- [28]F. Isaza Cuervo, “Valoración de fuentes renovables no convencionales de generación de electricidad: un enfoque desde las opciones reales,” *Cuadernos de Administración*, vol. 28, no. 51, Feb. 2016, doi: 10.11144/javeriana.cao28-51.vfr.
- [29]J. Tierradentro Cruz and K. M. Oviedo, “Aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria en Colombia,” *mare*, vol. 1, no. 2, pp. 46-55, 2020, doi: <https://doi.org/10.52948/mare.v1i2.190>.
- [30]J. David Ortiz Tocora and C. Público Directora Dra Rosa Eugenia Reyes Gil, “Barreras corporativas a la adopción de energías limpias en Colombia,” 2016.
- [31]A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, “A Novel Methodological Framework for the Design of Sustainable Rural Microgrid for Developing Nations,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24925–24951, May 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2832460.
- [32]IDEAM, “Atlas velocidad del viento,” 2021, Accessed: May 25, 2021. [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>
- [33]IDEAM, “Atlas radiación solar,” 2021, Accessed: May 25, 2021. [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- [34]IRENA, “PERFIL ENERGÍA COLOMBIA,” 2021, Accessed: May 26, 2022. [Online]. Available: https://www.irena.org/IRENADocuments/Statistical_Profiles/South%20America/Colombia_South%20America_RE_SP.pdf
- [35]SIAME, “Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia,” 2021, Accessed: May 25, 2021. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>

[36]IPSE, “Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas,” 2021, Accessed: Feb. 23, 2021. [Online]. Available: <https://ipse.gov.co/mapa-del-sito/proyectos-ipse/proyectos-fanzi/>

[37]UPME, “Demanda y eficiencia energética,” 2021, Accessed: Feb. 25, 2021. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/default.aspx>

[38]MinEnergía, “Energías Renovables No Convencionales,” 2021, Accessed: Feb. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>