

**MÉTODO PARA EVALUAR TÉCNICAMENTE LA IMPLEMENTACIÓN Y
POTENCIAL USO DE NUEVAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE
ENERGÍA EN COLOMBIA**

Juan José Tabares Giraldo

Melissa Valencia Duque

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título en:

Ingeniería Mecánica

Director:

Juan Camilo López Restrepo M.Sc.

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingeniería Mecánica

Pereira

2020

Pereira, diciembre de 2020

Nota de aceptación:

Firma del Director de Proyecto

Agradecimientos

Se agradece a la UPME por la financiación al proyecto titulado “Método para evaluar la incorporación de fuentes no convencionales de energía en Colombia y su implementación en un caso base de estudio”, gestionado por MinCiencias mediante la Convocatoria 849-2019 *convocatoria de proyectos de I+D+i para el fortalecimiento del planeamiento minero energético*, bajo la línea temática: *abastecimiento energético confiable y diversificación de la canasta energética*.

Se agradece también al Grupo de Investigación en Gestión Energética (GENERGÉTICA) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, porque nos permitieron trabajar con ellos en el desarrollo del mismo proyecto y obtener así los insumos necesarios para la culminación del objetivo de este trabajo. De igual forma, se agradece al docente guía Juan Camilo López Restrepo por sus consejos, recomendaciones, apoyo y colaboración a lo largo del desarrollo del documento, a los investigadores de GENERGÉTICA Juan Carlos Castillo y David Andrés Serrato, y los investigadores del grupo coejecutor DINOP Laura Salazar y Alejandro Henao por el apoyo que nos brindaron y por el trabajo realizado en el proyecto. Por último, queremos agradecer al Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica Juan Esteban Tibaquirá Ph.D., por haber estado al tanto del desarrollo de este trabajo de grado y permitido nuestra participación en el proyecto mencionado anteriormente.

RESUMEN

En este documento se realiza una revisión de las Fuente No Convencionales de Energía (FNCE) que son reconocidas en Colombia según la Ley 1715 de 2014 y se identifican aquellas que no son utilizadas en el país, pero que se consideran consolidadas y reconocidas a nivel internacional. Adicionalmente, se proponen límites para considerar una FNCE como convencional con base en la definición de la Ley 1715 de 2014. Posteriormente, se procede a revisar los métodos de evaluación existentes a nivel global implementados en proyectos energéticos para seleccionar el que mejor se adapte al objetivo de la evaluación, y finalmente, se realiza una propuesta de implementación del método con los criterios técnicos seleccionados para el país.

ABSTRACT

In this document, a revision about the Not Conventional Energy Sources (FNCE) that are recognized by the Law 1715 of 2014 is made and are identified those that are not used in Colombia but that are considered as consolidated and recognized at an international level. Additionally, limits to consider a FNCE as conventional are proposed based on the definition given by the Law 1715 of 2014. Subsequently, proceed to review the existing globally evaluation methods used in energy projects in order to select the one that best fits the evaluation objective, and finally, an implementation proposal of the method with the technical criteria selected for the country is made.

Palabras clave: FNCE, Energía renovable, MCDM, WASPAS, TRL, CRI

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO CONCEPTUAL Y DEFINICIONES	15
1.1. Fuentes de energía	15
1.1.1. Según su forma de utilización	15
1.1.2. Según su disponibilidad a largo plazo.....	16
1.1.3. Según su uso tradicional.....	17
1.2. Métodos de decisión multicriterio (MCDM).....	18
2. FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA.....	19
2.1. Métricas para catalogar una FNCE como convencional	21
2.1.1. Comercialidad	21
2.1.2. Marginalidad	21
2.1.3. Sostenibilidad Ambiental	23
2.2. Límites para considerar una FNCE como convencional	23
2.2.1. Comercialidad	23
2.2.2. Marginalidad	24
2.2.3. Sostenibilidad ambiental	25
3. FNCE CONSOLIDADAS Y RECONOCIDAS EN EL MUNDO.....	26
3.1. Criterios para considerar una fuente de energía como consolidada y reconocida.....	28
3.2. Clasificación de las FNCE por nivel de madurez tecnológica	30
4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN TÉCNICA PARA FNCE.....	33
4.1. Métodos de evaluación	33
4.2. Descripción del método seleccionado	39

4.2.1. Matriz de decisión del método	40
4.2.2. Criterios técnicos de las FNCE	42
4.3. Propuesta de implementación del método de evaluación técnica para FNCE en Colombia	
44	
4.3.1. Características técnicas y energéticas relevantes para implementar FNCE en Colombia.....	44
4.3.2. Criterios técnicos seleccionados.....	45
4.3.3. Propuesta metodológica	46
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS.....	62

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Fuentes de energía primaria</i>	16
<i>Figura 2. FNCE reconocidas en Colombia</i>	19
<i>Figura 3. Capacidad instalada por tecnología/recurso en Colombia [MW] - agosto 2018</i>	20
<i>Figura 4. Niveles de CRI con relación al TRL y al despliegue comercial</i>	24
<i>Figura 5. Participación de las fuentes de energía primaria en países de la OCDE – 2018</i>	27
<i>Figura 6. FNCE no utilizadas en Colombia</i>	28
<i>Figura 7. Proceso general para la implementación de un MCDM</i>	38
<i>Figura 8. Propuesta metodológica para evaluar técnicamente la implementación de FNCE en Colombia</i>	47

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Descripción de los niveles de CRI</i>	22
<i>Tabla 2. Límites propuestos para diferenciar entre fuentes convencionales y no convencionales</i>	25
<i>Tabla 3. Nivel de TRL por cada Fuente No Convencional de Energía</i>	31
<i>Tabla 4. Categorización de métodos de decisión multicriterio</i>	34
<i>Tabla 5. Matriz de comparación de los MCDM</i>	37
<i>Tabla 6. Matriz de decisión del método a implementar</i>	39
<i>Tabla 7. Lista de criterios técnicos</i>	43
<i>Tabla 8. Criterios técnicos escogidos para Colombia</i>	45
<i>Tabla 9. Matriz de cálculo del CRI</i>	63
<i>Tabla 10. Descripción del indicador “ambiente regulatorio”</i>	64
<i>Tabla 11. Descripción del indicador “aceptación de las partes interesadas”</i>	64
<i>Tabla 12. Descripción del indicador “desempeño técnico”</i>	65
<i>Tabla 13. Descripción del indicador “propuesta financiera-Costos”</i>	65
<i>Tabla 14. Descripción del indicador “propuesta financiera-ingresos”</i>	66
<i>Tabla 15. Descripción del indicador “cadena de suministro de la industria y habilidades”</i>	66
<i>Tabla 16. Descripción del indicador “oportunidades de mercado”</i>	67
<i>Tabla 17. Descripción del indicador “madurez de la compañía”</i>	68
<i>Tabla 18. Participación de las fuentes de energía por tipo en la matriz eléctrica de Colombia</i> ..	69
<i>Tabla 19. Participación en la matriz energética de fuentes de energía convencionales y no convencionales</i>	70
<i>Tabla 20. Participación en la matriz energética de centrales hidroeléctricas</i>	70
<i>Tabla 21. Características de los métodos para establecer un nivel de madurez tecnológico</i>	71

NOMENCLATURA

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
ARENA	<i>Australian Renewable Energy Agency</i>
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CF	<i>Carbon Footprint</i>
COHgen	<i>Catalytic Organic Hydrogen Generation</i>
CRI	<i>Commercial Readiness Index</i>
CRL	<i>Commercial Readiness Level</i>
DHS	<i>Department of Homeland Security</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
EGS	<i>Enhanced Geothermal Systems</i>
ELECTRE	<i>Elimination Et Choice Translating Reality</i>
FCE	Fuente Convencional de Energía
FEG	Factor de Emisión de Generación
FENOGE	Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía
FER	Fuentes de Energía Renovable
FNCE	Fuente No Convencional de Energía
FNCER	Fuente No Convencional de Energía Renovable
FNRE	Fuente No Renovable de Energía
GEI	Gases Efecto Invernadero
GSI	<i>Global Sustainable Indicator</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MADM	<i>Multi Attribute Decision Making</i>
MCDM	<i>Multi Criteria Decision Making</i>
MinCiencias	Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación
MODM	<i>Multi Objective Decision Making</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
ONU	Organización de las Naciones Unidas

OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
PCH	Pequeñas Centrales Hidroeléctricas
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method</i>
Q	Vector columna de importancia relativa total
RTEGS	<i>Road Thermoelectric Generator System</i>
SAO	<i>Subject-Action-Object</i>
SEforALL	<i>Sustainable Energy for All</i>
SHTe-AP	<i>System Harvesting Thermoelectric Energy from Asphalt Pavement</i>
SIN	Sistema Interconectado Nacional
SRL	<i>System Readiness Level</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TRIZ	<i>Theory of Inventive Problem Solving</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
WASPAS	<i>Weighted Aggregated Sum Product Assessment</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>
WPM	<i>Weighted Product Method</i>
WSM	<i>Weighted Sum Method</i>
WTE	<i>Waste to Energy</i>
ZNI	Zonas No Interconectadas
λ	Índice de importancia relativa
e_j	Entropía para cada criterio
w_j	Peso de cada criterio

INTRODUCCIÓN

En el mundo existe la necesidad de proveer grandes cantidades de energía limpia económicamente, ya que el incremento de la población consecuentemente ha aumentado el uso de fuentes fósiles llevando a que la calidad del aire de las poblaciones alcance niveles altos de contaminación para los seres vivos, afectando su salud y calidad de vida [1]. Los gobiernos deben garantizar a su población la disponibilidad de combustibles y electricidad a un precio asequible. Por ende, garantizar la seguridad energética es una de las prioridades en el desarrollo de política pública de los países, para lo cual deben tenerse en cuenta diferentes factores de riesgo que pueden afectar el suministro de energía [2].

En los últimos 25 años el consumo de energía primaria a nivel global ha crecido alrededor de un 50% [3]. Las proyecciones indican que aún para el año 2040 habrá una dependencia de los recursos fósiles, con una participación del 73,3% en la canasta energética mundial [4], produciendo un aumento en la huella de carbono, acelerando el calentamiento global y agudizando enfermedades asociadas a la contaminación del aire. El uso de fuentes de energía de origen fósil, no solo produce emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, sino que afecta la economía de los países productores que terminarán dependiendo de las importaciones de recursos para abastecerse energéticamente.

Los países con alta seguridad energética se desarrollan mejor económicamente, ya que se asegura una mayor confiabilidad en los sistemas de energía que promueven el desarrollo industrial y comercial de las naciones [5]. Por lo anterior, se hace pertinente el estudio de energías limpias, de procesos y productos sostenibles, buscando reducir la contaminación ambiental, la producción de gases efecto invernadero y la dependencia de los recursos fósiles, para así mejorar la calidad de vida de las personas, diversificar las canastas energéticas de los países y proteger las economías nacionales ante los problemas energéticos externos.

Surgen entonces como una posible solución las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), las cuales son recursos energéticos ambientalmente sostenibles, debido a que, al momento de la operación, sus emisiones contaminantes y de efecto invernadero son insignificantes. Su medio de obtención es alternativo al comúnmente empleado para la generación eléctrica [6]. Entre ellas están: la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (pequeñas centrales

hidroeléctricas – PCH no convencionales), la eólica, la geotérmica, la solar, la proveniente de mares, entre otros.

Algunos países subdesarrollados o en vía de desarrollo han encontrado favorable la evaluación de FNCE maduras y reconocidas por los países más desarrollados, a través de métodos que evalúen el uso de estas fuentes desde perspectivas técnico-económicas, con el fin de minimizar los riesgos asociados a la inversión inicial en nuevas tecnologías [7]. Los aspectos comúnmente analizados son: la fuente de energía, la tecnología, la ubicación, la inversión y el diseño de sistemas para su aprovechamiento; teniendo en cuenta la madurez tecnológica, la eficiencia, la confiabilidad y sustentabilidad, costos de capital, costos de operación y mantenimiento, nivel de aceptación, generación de empleo, reducción de emisiones, requerimientos de suelo y seguridad [8]–[10]. Los métodos de toma de decisiones con múltiples criterios (*Multi-attribute decision-making – MADM*) han sido los más destacados en la literatura para la evaluación de FNCE, particularmente: procesos de análisis jerárquico (*Analytic hierarchy process – AHP*), procesos de análisis en red (*Analytic network process – ANP*), técnicas de orden por preferencia mediante similitud a solución ideal (*Technique for order preference by similarity to ideal solution – TOPSIS*), traslado a la realidad por eliminación y selección (*Elimination et choice translating reality – ELECTRE*), entre otros [10].

Particularmente, la matriz energética de Colombia está compuesta por un 68% de fuentes hídricas, un 31% de combustibles fósiles y el 1% por generación con FNCE establecidas en la Ley 1715 de 2014 [11]. Por ende, el país está llamado a impulsar y aprovechar estas FNCE no solo con el fin de cumplir con los objetivos 7 y 9 del desarrollo sostenible acordados en la ONU, sino también con el objetivo del Plan Nacional de Desarrollo (PND) de promover el uso de nuevas fuentes de energía [11]-[12]. El PND y el Ministerio de Minas y Energía promueven los estudios y desarrollos tecnológicos dirigidos a diversificar la canasta energética del país mediante la inclusión de FNCE, evaluadas previamente a su implementación, para garantizar la seguridad de abastecimiento de la creciente demanda energética del país.

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el método que mejor se adapta a las condiciones energéticas de Colombia, para evaluar de manera técnica la implementación de nuevas FNCE y cuáles son límites que se deben plantear para considerar estas fuentes de energía como convencionales? Es así como, el presente documento busca dar

cumplimiento al siguiente objetivo general: Definir un método para evaluar técnicamente la implementación y el potencial de uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE) no utilizadas en Colombia y plantear los límites para considerarlas una fuente convencional de generación de energía eléctrica en el país.

Los objetivos específicos son:

1. Identificar las FNCE utilizadas en Colombia y plantear los límites para considerar una fuente de generación de energía eléctrica como convencional en el país.
2. Determinar las FNCE no utilizadas en Colombia, que se consideren consolidadas y reconocidas por los países con economías en rápido crecimiento y de la OCDE.
3. Identificar y comparar los métodos utilizados para evaluar técnicamente la aplicabilidad de las FNCE identificadas.
4. Seleccionar el método que mejor se adapte a las características energéticas y/o técnicas de Colombia.

Así entonces, el siguiente documento presenta la siguiente estructura:

CAPÍTULO I: En este capítulo se definen los conceptos más relevantes del documento.

CAPÍTULO II: En este capítulo se identifican las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) que se utilizan en Colombia y se plantean los límites para considerar una fuente de generación de energía eléctrica como convencional en el país.

CAPÍTULO III: En este capítulo se identifican las FNCE no utilizadas en Colombia, que se consideran consolidadas y reconocidas por los países con economías en rápido crecimiento y de la OCDE.

CAPÍTULO IV: Este capítulo permite identificar y comparar los métodos existentes para la evaluación de tecnologías que aprovechan las FNCE, con el fin de seleccionar uno que permita evaluar técnicamente la implementación y potencial de uso de FNCE en el país. Adicionalmente, se presenta una propuesta metodológica para implementar el método seleccionado en el país.

Mediante este trabajo de grado se establecen las bases para analizar, desde un aspecto técnico, el potencial de implementación de una FNCE en el país; para ello se identifican qué fuentes no están siendo empleadas así como su respectiva madurez tecnológica, se proponen los límites bajo los

cuales una fuente no convencional podría ser considerada como convencional y se establece una propuesta para evaluar el uso de estas fuentes antes de entrar en operación, mitigando así los riesgos económicos de la inversión. Por lo tanto, se establecen las bases para desarrollar una herramienta para que entidades como la UPME y otros entes públicos y privados, puedan evaluar los proyectos de implementación de nuevas FNCE en Colombia.

1. MARCO CONCEPTUAL Y DEFINICIONES

En este capítulo se presentan los conceptos más relevantes en el análisis del método que evalúa técnicamente la implementación y el potencial de uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE) no utilizadas en Colombia y en el planteamiento de los límites para considerarlas una fuente convencional de generación de energía eléctrica en el país.

1.1. Fuentes de energía

Son todos los productos naturales o artificiales de los que se puede obtener energía en cualquiera de sus formas y manifestaciones. Sin embargo, el campo de las estadísticas energéticas solo considera aquellas que pueden producir calor y / o electricidad [13]. A nivel internacional, las fuentes de energía se clasifican de diferentes formas ya sea según su forma de utilización, según su uso tradicional o según su disponibilidad a largo plazo:

1.1.1. Según su forma de utilización

Algunas fuentes de energía se pueden utilizar directamente sin recurrir a algún proceso de transformación que permita aprovechar su potencial de generación de energía, o por el contrario algunas fuentes requieren ser procesadas para poder ser aprovechadas por diferentes tecnologías. Es así como según su forma de utilización las fuentes de energía se clasifican en:

- Fuentes de energía primaria

Es aquella energía procedente de fuentes renovables y no renovables que no ha sufrido ningún proceso de conversión o transformación [14], [15].

Según las Naciones Unidas, el término energía primaria debe usarse para designar aquellas fuentes que solo implican extracción o captura, con o sin separación del material contiguo, limpieza o clasificación, antes de que la energía incorporada en esa fuente pueda convertirse en calor o trabajo mecánico [16].

A nivel global las fuentes de energía primaria se clasifican, según su disponibilidad a largo plazo, en renovables y no renovables, como muestra la Figura 1.

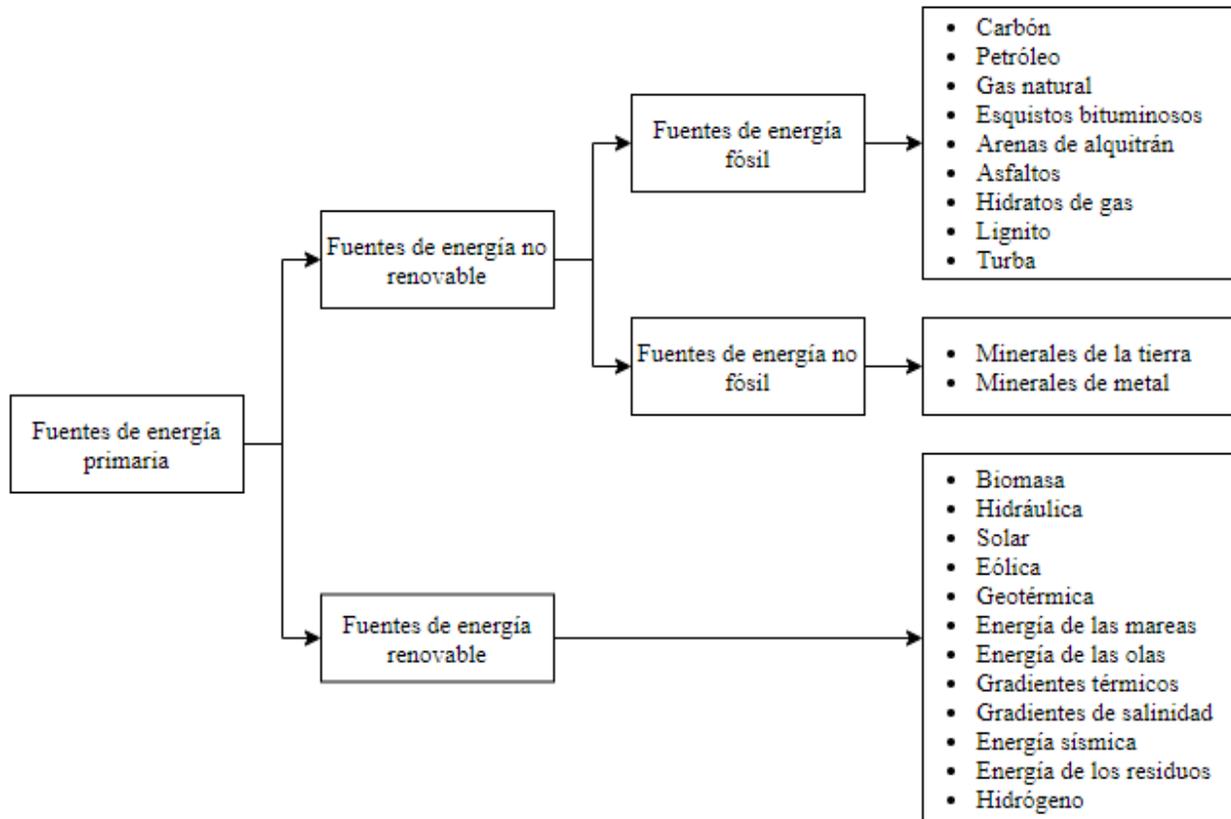


Figura 1. Fuentes de energía primaria

- Fuentes de energía secundaria

Según las Naciones Unidas, el término energía secundaria debe usarse para designar todas las fuentes de energía que resultan de la transformación de fuentes primarias [16]. Como por ejemplo los combustibles derivados de la refinación de los hidrocarburos, los biocombustibles, la electricidad y el calor, entre otros [15].

1.1.2. Según su disponibilidad a largo plazo

Algunos recursos tienden a desaparecer en el tiempo, ya sea porque es escaso o porque su tasa de consumo es mayor a su tasa de regeneración. Es así como según su disponibilidad a largo plazo, las fuentes de energía se clasifican en:

- Fuentes de energía renovable (FER)

Son las que se obtienen de fuentes naturales inagotables a escala humana, ya sea porque el recurso dispone de una gran cantidad de energía, o porque el recurso tiene la capacidad de regenerarse de

manera natural. La iniciativa Energía Sostenible para Todos (*SEforALL*) de la ONU define la energía renovable como “energía de fuentes naturales que se repone a un ritmo más rápido de lo que se consume, incluidas la energía hidroeléctrica, bioenergética, geotérmica, aerotérmica, solar, eólica y oceánica” [17].

- Fuentes de energía no renovable (FNRE)

Son aquellas de cantidad limitada en la naturaleza. Una vez que estos recursos se agotan, no se pueden reemplazar, o no se repondrán durante miles o incluso millones de años. Hay cuatro tipos principales de recursos no renovables: petróleo, gas natural, carbón y energía nuclear. Los tres primeros se denominan colectivamente combustibles fósiles [18].

1.1.3. Según su uso tradicional

Esta clasificación tiene en cuenta la participación de las fuentes de energía en los balances energéticos de los países, así como su desarrollo tecnológico. Según su uso tradicional, las fuentes de energía pueden ser:

- Fuente convencional de energía (FCE)

Estas fuentes de energía han sido usadas tradicionalmente por muchas décadas. Entre ellas se encuentran los combustibles fósiles, la energía nuclear y los recursos hidroeléctricos [19].

En Colombia, según la Ley 1715 de 2014 y la Ley 697 de 2001, son aquellos recursos de energía utilizados de forma intensiva y ampliamente comercializados en el país [20], [21].

- Fuente no convencional de energía (FNCE)

Son aquellas fuentes no fósiles que involucran energía eólica y solar almacenada como energía interna en el aire (aeroterminia), debajo de la superficie de la tierra (geoterminia) y agua (hidrotermal), energía oceánica, hidroeléctrica, biomasa, gas de vertedero producido en plantas y tratamiento de aguas residuales y biogás [22].

En Colombia, según la Ley 1715 de 2014 y la Ley 697 de 2001, son aquellos recursos de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCE la energía nuclear o atómica y las FNCE [20], [21].

1.2. Métodos de decisión multicriterio (MCDM)

Es una técnica que combina el desempeño de alternativas a través de numerosos criterios contradictorios, cualitativos y/o cuantitativos y da como resultado una solución que requiere un consenso. Utilizan el conocimiento obtenido de campos diversos, incluida la teoría de decisiones del comportamiento, la tecnología informática, la economía, los sistemas de información y las matemáticas. El objetivo de MCDM no es sugerir la una decisión superior a otras, sino ayudar a los tomadores de decisiones a seleccionar alternativas preseleccionadas o una única alternativa que cumpla con sus requisitos y esté en línea con sus preferencias [23]. Algunos de los métodos más utilizados para evaluar proyectos energéticos son: WSM, WPM, WASPAS, AHP, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE [24]–[29].

2. FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA

En este capítulo se identifican las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) que se utilizan en Colombia y se plantean los límites para considerar una fuente de generación de energía eléctrica como convencional en el país.

Las FNCE en Colombia, según la Ley 1715 de 2014, son recursos de energía ambientalmente sostenibles y disponibles a nivel mundial, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente [20]. Además, según el Fondo de energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), las FNCE son aquellas obtenidas de un medio alternativo, se emplean continuamente para producir energía y tienen un impacto ambiental bajo o nulo en cuanto a la emisión de gases efecto invernadero (GEI) o de CO₂ [6]. La Figura 2 clasifica las FNCE consideradas en Colombia, según la Ley 1715 y FENOGE.

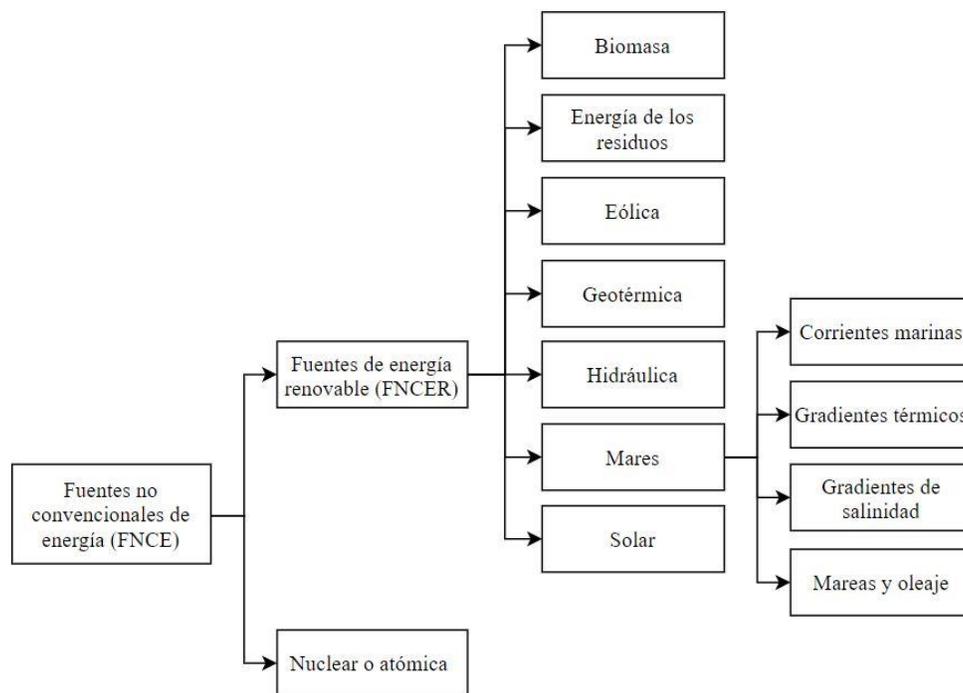


Figura 2. FNCE reconocidas en Colombia

Para lograr identificar cuáles de las FNCE reconocidas en Colombia son utilizadas en el país, se recurrió a la matriz eléctrica. La Figura 3 presenta la capacidad instalada de las tecnologías que componen la matriz eléctrica en Colombia; en la cual, el agua, la radiación solar, el bagazo, el biogás y el viento se consideran fuentes de energía renovable (FER) y representan más del 70 %

de la generación eléctrica del país [30]. El bagazo es biomasa vegetal y el biogás es un combustible, fuente de energía secundaria generado por la biodegradación de biomasa, ambas fuentes se aprovechan en plantas de cogeneración. Por otro lado, las Fuentes de Energía No Renovables (FENR) se aprovechan en plantas térmicas [31] y tienen una participación cercana al 30 %.

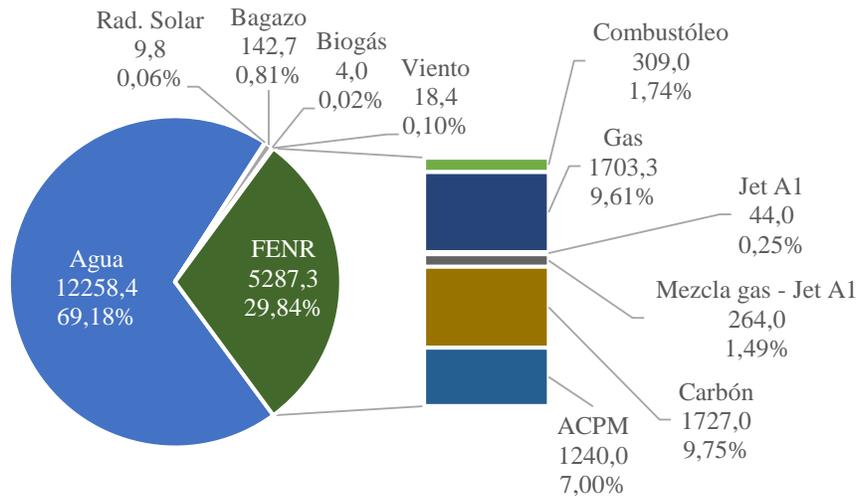


Figura 3. Capacidad instalada por tecnología/recurso en Colombia [MW] - agosto 2018

En Colombia, la energía proveniente del agua se aprovecha en las centrales hidroeléctricas y según la Ley 1715 de 2014 y la Ley 697 de 2001, para considerar esta fuente como no convencional de energía, debe ser aprovechada en centrales con una capacidad instalada máxima de 10 MW, denominadas pequeños aprovechamientos hidroeléctricos [20], [21]. Según el reporte de capacidad efectiva por tipo de generación de la empresa XM, la capacidad efectiva de generación eléctrica mediante estos pequeños aprovechamientos hidroeléctricos para el año 2020 es de 1,2 % de la capacidad total instalada del sistema interconectado de energía (SIN) [32].

Contrastando las FNCE reconocidas en la Ley 1715 de 2014 (Figura 2) con las fuentes de energía que componen la matriz eléctrica de Colombia (Figura 3), se logra identificar que las FNCE empleadas en el país son: biomasa, eólica, solar e hidráulica con los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Existe entonces una incertidumbre frente al uso de estas FNCE no empleadas en Colombia, por lo cual se requiere de criterios técnicos y económicos que permitan identificar el potencial de su introducción al país. Por lo tanto, en este documento se plantea un método para evaluar técnicamente la implementación y el potencial de uso de FNCE no utilizadas en Colombia

y se plantean los límites, basándose en métricas, para considerarlas una fuente convencional de generación de energía eléctrica en el país, así como se muestra a continuación.

2.1. Métricas para catalogar una FNCE como convencional

La Ley 1715 de 2014 define las FNCE bajo tres aspectos: comerciabilidad, sostenibilidad ambiental, y marginalidad. Por lo tanto, es pertinente definir la convencionalidad de estas fuentes bajo tres métricas, siendo entonces consideradas convencionales cuando estas sean ampliamente comercializadas, de uso no marginal y sostenibles ambientalmente. A continuación, se presenta una revisión sobre los indicadores existentes para medir o definir estas métricas.

2.1.1. Comerciabilidad

Los indicadores más utilizados para cuantificar la comerciabilidad de las tecnologías de aprovechamiento de recursos energéticos son el CRL (*Commercial Readiness Level*) y el CRI (*Commercial Readiness Index*). El CRL evalúa algunos factores que influyen en las condiciones comerciales y del mercado; sin embargo, es una métrica limitada y no fue específicamente diseñada para evaluar el aspecto comercial de los proyectos de energía [33], [34]. El CRI por otro lado, desarrollado por la Agencia Australiana de Energías Renovables (ARENA), evalúa la madurez comercial de las tecnologías, diseñado además específicamente para evaluar tecnologías de aprovechamiento de fuentes de energía, especialmente las renovables, clasificándolas en 6 niveles de desarrollo cualitativos, como se muestra en la Tabla 1. El último nivel indica que la tecnología presenta estándares y expectativas de desempeño conocidos a tal nivel que el riesgo de inversión asociado a esta no es significativo [35], [36].

En Colombia no hay normativa que regule, mencione o establezca cuándo una fuente de energía es ampliamente comercializada.

2.1.2. Marginalidad

No se logran identificar indicadores específicos para esta métrica que sean utilizados mundialmente. Sin embargo, se puede partir de la definición del término dado por la Real Academia Española (RAE), donde marginal es un adjetivo dicho de un asunto, de una cuestión, de un aspecto, etc. De importancia secundaria o escasa [37]. A partir de la anterior definición, se puede identificar cuándo una fuente se usa marginalmente: cuando su uso o participación en la canasta energética del país sea de escasa importancia.

Tabla 1. Descripción de los niveles de CRI

Nivel	Descripción
6	Clase de activo de grado "financiable" basado en los mismos criterios de otras tecnologías maduras. Considerado como una clase de activo de grado "financiable" con estándares y expectativas de desempeño conocidas. Los riesgos tecnológicos y de mercado no influyen en las decisiones de inversión. La capacidad de los proponentes, precios y otras fuerzas típicas de mercado llevan a la adopción.
5	Competencia en el mercado llevando a un despliegue amplio en el contexto del establecimiento de políticas a largo plazo. Ocurre competencia emergente a lo largo de todas las áreas de la cadena de suministro con mercantilización de componentes clave y productos financieros.
4	Múltiples aplicaciones comerciales se vuelven evidentes localmente, aunque aún sean subsidiadas. Los datos verificables sobre el desempeño técnico y financiero en el dominio público generan interés de una variedad de fuentes de deuda y capital; sin embargo, aún requieren el apoyo del gobierno. Los desafíos regulatorios se están abordando en múltiples jurisdicciones.
3	Escalada comercial se produce impulsada por políticas específicas y financiación de deuda emergente. Propuesta comercial impulsada por proponentes tecnológicos y participantes del segmento de mercado; datos de descubrimiento público que impulsan el interés emergente de los sectores financiero y regulatorio.
2	Ensayo comercial: proyecto de pequeña escala, primero en su tipo, financiado con fondos de capital y apoyo del gobierno. Propuesta comercial respaldada por evidencia de datos verificables que normalmente no son de dominio público.
1	Propuesta comercial hipotética: técnicamente lista, comercialmente no probada. Propuesta comercial impulsada por defensores de la tecnología con poca o ninguna evidencia de datos técnicos o financieros verificables para sustentar las afirmaciones.

Se identificó que en Colombia no existe una regulación que defina cuándo una fuente de energía es o se usa de manera marginal. Sin embargo, la ley 142 de 1994 en su artículo 14.15, modificado en la ley 689 de 2001, define el término “productor marginal” como aquella persona natural o jurídica que utilizando recursos propios y técnicamente aceptados por la normatividad vigente para cada servicio, produce bienes o servicios propios del objeto de las empresas de servicios públicos para sí misma o para una clientela compuesta exclusivamente por quienes tienen vinculación económica directa con ella o con sus socios o miembros o como subproducto de otra actividad principal [37], [38]. En cuanto a la convencionalidad de una fuente de energía o tecnología de aprovechamiento, el uso marginal no está definido por ningún límite de participación o capacidad

instalada, a excepción de los pequeños aprovechamientos hidroenergéticos (PCH no convencionales), que según el artículo 3.14 de la ley 697 de 2001, es la energía potencial de un caudal hidráulico en un salto determinado que no supere los 10 MW [21], y según el artículo 5.17 de la ley 1715 de 2014, se definen como FNCE [20].

2.1.3. Sostenibilidad Ambiental

En lo referente a generación de energía eléctrica existen diversos indicadores que se integran en un solo resultado a través de métodos de agregación como el caso del Indicador Global de Sostenibilidad (GSI) [39]. El GSI requiere de una amplia recopilación de información y de un proceso de cálculo extenso. Otros indicadores empleados para evaluar la sostenibilidad ambiental son: uso de tierra o de agua, impacto ambiental, emisiones de gases de efecto invernadero (especialmente las emisiones de CO₂ o huella de carbono), y factor de emisión de la generación eléctrica (FEG). Las dos últimas son las más comunes y utilizadas en el sector energético para realizar comparaciones de sostenibilidad ambiental entre tecnologías de aprovechamiento energético. El FEG, relaciona las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la generación de energía eléctrica, con la energía producida en un periodo de tiempo [24], [40], [41].

En Colombia, tampoco existe una normativa que establezca o regule los límites para considerar una fuente de energía como sostenible ambientalmente específicamente. Se identifica entonces que en Colombia no existen métricas que permitan diferenciar entre fuentes convencionales de energía y no convencionales y se vuelve necesario proponer límites para estas métricas con el fin de realizar esta diferenciación.

2.2. Límites para considerar una FNCE como convencional

Con base en las métricas mencionadas anteriormente, las cuales van ligadas a la definición de FNCE descrita en la Ley 1715 de 2014, se plantean como propuesta los siguientes límites nacionales para diferenciar entre una fuente de generación de energía eléctrica convencional y una no convencional.

2.2.1. Comercialidad

Se plantea el CRI como métrica para considerar una fuente de generación de energía eléctrica como convencional en Colombia bajo el aspecto de comercialidad, ya que este brinda una visión posterior al desarrollo tecnológico máximo y ayuda en la elaboración de políticas energéticas que favorezcan la incorporación de las tecnologías al mercado nacional, al generar una trazabilidad de

su desarrollo comercial. En el ANEXO A se muestra el cálculo del CRI. La Figura 4 muestra los niveles del CRI y sus etapas comerciales además de que se compara con el TRL (*Technology Readiness Levels*), el cual es una métrica ampliamente utilizada a nivel global para medir la madurez tecnológica de las tecnologías. A partir del nivel CRI 5 una tecnología se considera como competitiva comercialmente, donde la competencia del mercado impulsa el desarrollo generalizado de esta. Se propone este nivel como límite para que una fuente de energía sea reconocida como ampliamente comercializada.

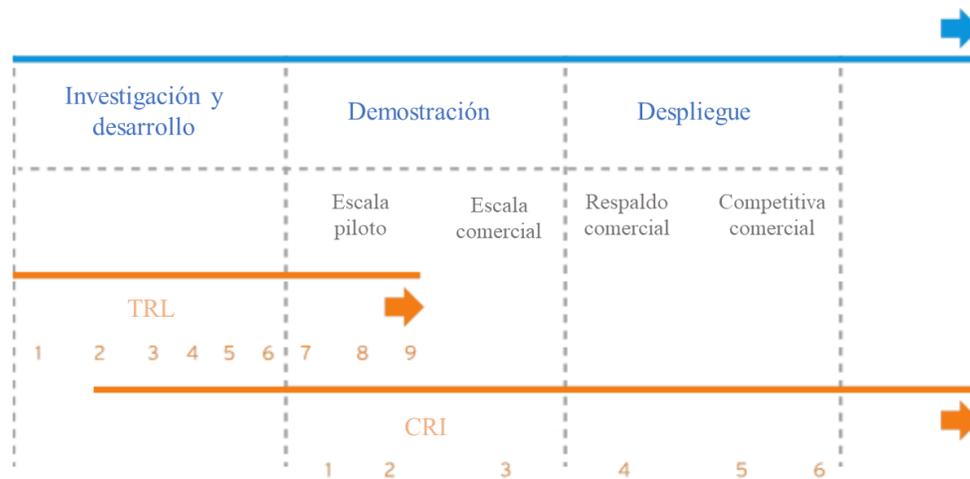


Figura 4. Niveles de CRI con relación al TRL y al despliegue comercial

2.2.2. Marginalidad

Se propone plantear la “participación” de las FNCE de generación eléctrica en la matriz energética del país como un indicador de la marginalidad. Se analiza el número de plantas de generación eléctrica y la capacidad instalada de las mismas. Con base en los datos adquiridos a través de la plataforma virtual de la compañía XM del Grupo ISA, la cual administra el mercado de energía mayorista en Colombia (ver ANEXO B). Se realiza un análisis de la participación de las fuentes de generación eléctrica teniendo en cuenta el número de plantas de generación y la capacidad instalada según el tipo de fuente. Se observa que el número de plantas de generación no es un indicador para definir la convencionalidad, debido a que el número total de plantas no convencionales de generación de energía eléctrica instaladas en Colombia (PCH no convencionales, PCH autogenerador, plantas solares y centrales eólicas), representan un porcentaje significativo del total de plantas en el país, siendo esto un 38,6%.

Por otro lado, las FNCE solo representan un 1,6% de la capacidad instalada de generación eléctrica del país. Según CEPAL, en nueve de los diez países del caribe el porcentaje de participación en la matriz energética por parte de fuentes renovables no supera el 10%, y en tanto en el otro país de la región este porcentaje se encuentra entre 10% y 20% [42]. Por lo anterior, se propone que cuando la capacidad instalada de un FNCE pase a las dos cifras porcentuales, es decir un 10%, se considere de uso no marginal.

2.2.3. Sostenibilidad ambiental

La huella de carbono (CF) de la generación eléctrica o también conocido como factor de emisiones de generación (FEG) es un indicador utilizado internacionalmente para evaluar la sostenibilidad de proyectos, especialmente de generación de energía. Por lo tanto, se propone como indicador para evaluar esta métrica. Además, la UPME en el 2019 calculó, para el periodo entre el 2018 y 2019, el FEG para la generación de energía del SIN al considerar la generación neta de energía total y las emisiones relacionadas a esa generación, dando como resultado un valor de $0,13 \frac{tCO_2}{MWh}$ [43]. Este valor representa las emisiones de una matriz mayoritariamente renovable como se evidenció en la Figura 3. Se propone entonces este valor calculado por la UPME como límite superior para que una FNCE sea considerada sostenible, es decir, por encima de este valor las fuentes serán consideradas no sostenibles ambientalmente.

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los límites propuestos para poder diferenciar de cuando una FNCE se convierte en FCE según las métricas exploradas en este capítulo.

Tabla 2. Límites propuestos para diferenciar entre fuentes convencionales y no convencionales

Métrica	Límite
Comerciabilidad	Se considera que una FNCE es ampliamente comercial cuando cuenta con un nivel de CRI 5 o superior, pasando a ser convencional.
Marginalidad	Se considera que una FNCE deja de ser marginal cuando su capacidad instalada supera el 10% de participación en la matriz energética, pasando a ser convencional.
Sostenibilidad ambiental	Se considera una fuente como sostenible ambientalmente cuando su FEG sea menor de $0,130 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$

Surge el interrogante de si la Ley 1715 de 2014 identifica todas las FNCE existentes, por lo tanto, se plantea hacer una revisión de las fuentes de energía que se utilizan a nivel global para identificar cuáles no se han contemplado en la Ley colombiana y se presenta en el capítulo siguiente.

3. FNCE CONSOLIDADAS Y RECONOCIDAS EN EL MUNDO

Este capítulo presenta una descripción de las FNCE consolidadas y reconocidas en el mundo y que no se identifican en la Ley colombiana.

Existen diferentes conceptos a nivel global para la clasificación de las fuentes de energía. Estas pueden clasificarse según su disponibilidad a largo plazo en renovables o no renovables, también pueden clasificarse según el uso tradicional en convencional o no convencional, donde una fuente no convencional o nueva fuente de energía es aquella que se encuentra en cierta etapa de desarrollo tecnológico y no cuenta con una participación importante en la matriz energética [19]. Por último, según sea la forma de utilización en primarias o secundarias [44].

A continuación, se realiza una revisión de las diferentes fuentes de energía empleadas como energía primaria en algunos países desarrollados y de rápido crecimiento económico. La Figura 5 permite comparar la composición de las canastas energéticas de los países, para identificar la participación de las fuentes de energía renovables en ellas. Analizando la gráfica, se puede resaltar a Noruega el cual es el país con la mayor participación de fuentes hídricas de energía en su canasta energética. En cuanto a la energía geotérmica, solar y eólica, la mayor participación la tiene Islandia; y los biocombustibles y residuos resaltan en la matriz de Letonia. Adicionalmente, se puede observar que los recursos fósiles tienen una participación cercana al 30 % en las canastas energéticas de la mayoría de los países comparados [45], [46], [55]–[64], [47], [65]–[74], [48], [75]–[80], [49]–[54].

Entre las fuentes de energía no renovables empleadas a nivel mundial se encuentra el petróleo, el carbón (turba y lignito), el gas natural, los esquistos bituminosos, las arenas de alquitrán, los asfaltos, los hidratos de gas, los minerales de la tierra y los minerales de metal. Por otro lado, entre las fuentes de energía renovables se encuentran la biomasa, la hidroeléctrica, la solar, la eólica y la geotérmica, las corrientes marinas, la energía de las olas, los gradientes térmicos y de salinidad, la energía sísmica y la energía de los residuos [81].

Una vez identificadas las fuentes de energía utilizadas a nivel global, se realiza una comparación con las FNCE reconocidas y utilizadas en Colombia, con el fin de determinar aquellas que no contempla la ley y que son susceptibles de evaluación para su incorporación al país. De estas fuentes identificadas a nivel global, las siguientes no se emplean en Colombia (ver Figura 6):

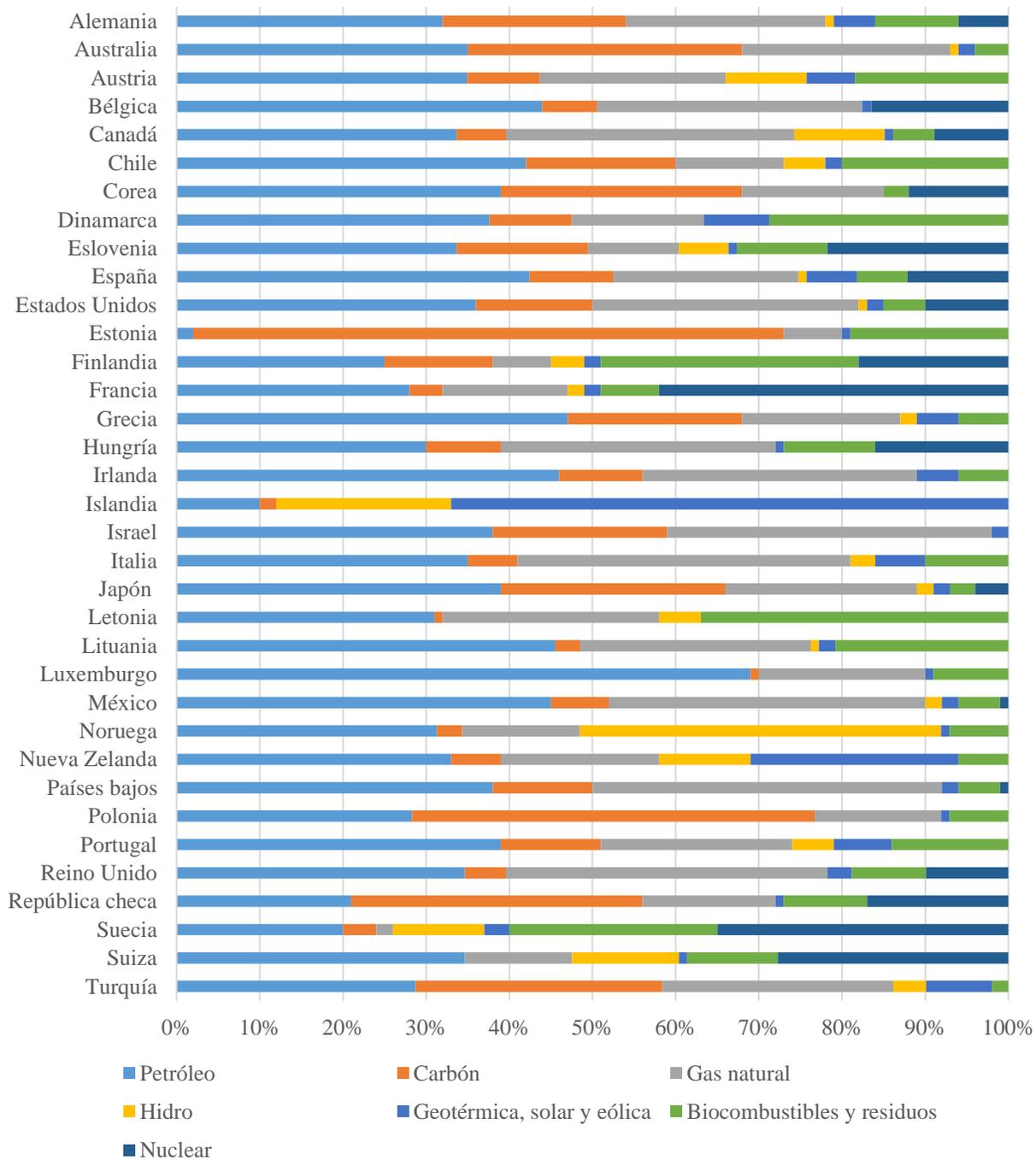


Figura 5. Participación de las fuentes de energía primaria en países de la OCDE – 2018

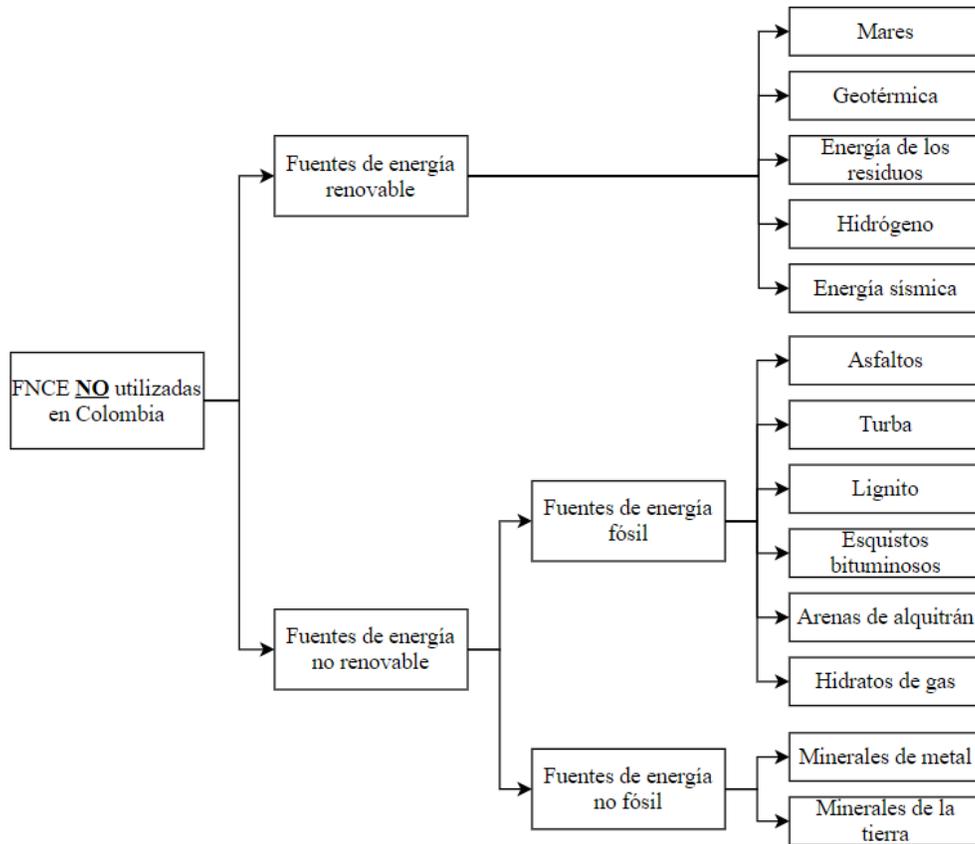


Figura 6. FNCE no utilizadas en Colombia

Con el fin de minimizar los riesgos económicos y técnicos asociados a la implementación de las tecnologías que aprovechen las FNCE identificadas previamente, los países con medianos y bajos ingresos han encontrado favorable la inserción de aquellas fuentes de energía que se consideren maduras y reconocidas por los países más desarrollados, garantizando una madurez tecnológica y un alto nivel de comercialización de estas. Por lo tanto, se requiere identificar los criterios para considerar una fuente como consolidada y reconocida, y así poder seleccionar las FNCE susceptibles a ser evaluadas para su incorporación en Colombia.

3.1. Criterios para considerar una fuente de energía como consolidada y reconocida

Existen diferentes criterios o técnicas cuantitativas o cualitativas para evaluar la madurez de las tecnologías que aprovechan las FNCE y el nivel de comercialización de estas. Algunos de estos criterios se listan a continuación y sus características se comparan en el ANEXO C:

- *Technology Readiness Levels* (TRL) – cuantitativo [82],
- *Commercial Readiness Index* (CRI) – cuantitativo [83],

- *Theory of Inventive Problem Solving* (TRIZ) – cualitativo [84],
- *Subject–Action–Object* (SAO) – cualitativo [85],
- Ciclo Hype – cualitativo [86],
- *System Readiness level method* (SRL) – cuantitativo [87].

Para materia de este estudio y teniendo en cuenta las características descritas para cada criterio y comparadas en el ANEXO C, se evidenció que el TRL tiene algunas ventajas frente a los demás. No solo es una metodología ampliamente conocida y utilizada internacionalmente por la NASA, la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA), el Departamento de Energía (DOE) y el Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos (DHS), entre otros; sino que, a nivel nacional el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias) ha utilizado el TRL con el fin de identificar el alcance de las actividades asociadas a la investigación, el desarrollo tecnológico y la Innovación (I+D+i) de los proyectos de algunas convocatorias, considerando sus posibilidades de transferencia de conocimiento y tecnologías generadas, y estableciendo el grado de madurez tecnológica de los resultados esperados de las propuestas [88].

El TRL, fue creado por la NASA para evaluar la preparación y el riesgo asociado con el desarrollo de la tecnología espacial. Los niveles de preparación tecnológica (TRL) son un tipo de sistema de medición que se utiliza a nivel mundial para evaluar el nivel de madurez de una tecnología en particular. Cada proyecto de tecnología se evalúa contra los parámetros de cada nivel de tecnología y luego se le asigna una calificación TRL en función del progreso del proyecto. Hay nueve niveles de preparación tecnológica, TRL 1 es el más bajo y TRL 9 es el más alto [89]. Los niveles de preparación de la tecnología son [90]:

- **TRL 1. Idea inicial:** se han definido los principios básicos. La investigación científica está comenzando a nivel teórico con principios básicos reportados.
- **TRL 2. Aplicación formulada:** se ha formulado el concepto y la aplicación de los principios básicos en una solución. Ocurre una vez que se han estudiado los principios básicos y se pueden dar aplicaciones prácticas a esos hallazgos iniciales.
- **TRL 3. Conceptos necesitan validación:** la solución necesita ser prototipada y aplicada. Etapa de diseño e investigación activa, donde se identifica si una tecnología es viable y está lista para avanzar en el proceso de desarrollo.
- **TRL 4. Prototipo temprano:** prototipo probado en un entorno de laboratorio.

- **TRL 5. Prototipo grande:** componentes probados en condiciones más rigurosas y reales. Se tiene un diseño conceptual, se conocen los componentes y sus características.
- **TRL 6. Prototipo completo a escala:** prototipo probado a escala. La tecnología tiene un prototipo o modelo preliminar y completamente funcional (*hardware* y *software*).
- **TRL 7. Demostración pre-comercial:** modelo o solución trabajando en las condiciones esperadas. En este nivel se cuenta con un diseño detallado, se conocen los sistemas y subsistemas, y se ha realizado la demostración del prototipo en un entorno operativo.
- **TRL 8. Primer comercial de tipo:** demostración comercial, implementación a gran escala en forma final. El modelo debe estar construido, debidamente probado y está listo para su implementación. La NASA denomina este nivel como “tecnología calificada para vuelo”. A partir de este nivel, una tecnología se considera madura.
- **TRL 9. Funcionamiento comercial en ambiente pertinente:** el modelo está disponible comercialmente. La NASA denomina este nivel como “tecnología probada en vuelo durante una misión exitosa”.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) identifica dos niveles más en la escala de nivel de preparación tecnológica [91]:

- **TRL 10. Integración necesaria a escala:** la solución está disponible comercialmente, pero necesita más esfuerzos de integración para continuar siendo competitiva.
- **TRL 11. Prueba de estabilidad alcanzada:** crecimiento predecible.

Actualmente existe una clasificación de la madurez de la mayoría de las tecnologías que aprovechan las FNCE mediante los niveles del TRL, donde a partir del nivel TRL 8 se consideran maduras [90]. A continuación, se identifica el TRL de las FNCE no utilizadas en Colombia para determinar cuáles son susceptibles a evaluar en el país.

3.2. Clasificación de las FNCE por nivel de madurez tecnológica

Para clasificar las FNCE según su nivel de madurez, es necesario establecer las tecnologías que las aprovechan, identificando el nivel TRL en el que se encuentran. La Tabla 3 muestra algunas de las tecnologías más representativas por cada fuente para generación eléctrica y los TRL en el que se encuentran.

Tabla 3. Nivel de TRL por cada Fuente No Convencional de Energía

Fuente de energía	Tecnología	Nivel de TRL
Fuentes de energía renovable		
Mares		
- Corrientes y olas	WEC (<i>Wave Energy Converter</i>)	TRL 6 [92], [93]
- Mareas (<i>Tidal</i>)	Presas de generación de: inundaciones, reflujo y bidireccional	TRL 9 [94], [95]
- Gradientes térmicos	Tecnologías de conversión de energía térmica oceánica (OTEC)	TRL 5 – TRL 6 [95], [94],
Geotérmica	Turbinas flash	TRL 5 [96], [97]
	Turbinas binarias	TRL 4 [96], [97]
	EGS para electricidad	TRL 2 [96], [97]
Energía de los residuos	NI	NI
Hidrógeno	Celdas de combustible	TRL 7 – TRL 8 [98]
Energía sísmica	Sensor de recolección de energía piezoeléctrica	TRL 4 [99], [100]
Fuentes de energía no renovable		
Minerales de metal y minerales de la tierra	Reactores de fisión nuclear	TRL 6 – TRL 11 [101]
	Reactores de fusión nuclear	TRL 1 – TRL 3 [101]
Fuentes de energía no renovable, fósil ¹		
Asfaltos	Sistema para la recolección de energía termoeléctrica del pavimento asfáltico (SHTE-AP)	TRL 3 [102]
	Sistema generador termoeléctrico de carretera (RTEGS)	TRL 5 – TRL 6 [103]
Turba	Método de fresado	NI
	Extracción de turba de césped	NI
Lignito	Proceso <i>Coldry</i>	TRL 8 – TRL 9 [104]
	<i>Catalytic Organic Hydrogen Generation</i> (COHgen)	TRL 2 – TRL 3 [104]
	<i>Waste-to-Energy</i> (WTE)	TRL 5 – TRL 6 [104]
Esquistos bituminosos	Fracturamiento hidráulico	TRL 7 – TRL 8 [105], [106]
Arenas de alquitrán	Estimulación cíclica con vapor	NI
	Drenaje gravitacional asistida con vapor	NI
Hidratos de gas	Desestabilización de hidratos	NI

NI: No Identificado

¹ Las tecnologías descritas para las fuentes de energía turba, esquistos bituminosos, arenas de alquitrán e hidratos de gas, son tecnologías de extracción, teniendo en cuenta que el producto final de ellas es carbón, petróleo y gas natural. Las tecnologías que aprovechan estos productos finales son convencionales, ampliamente utilizadas y maduras, y no son el foco de este documento.

De las FNCE no utilizadas en Colombia, aquellas reconocidas y con una madurez tecnológica significativa, es decir que tienen un TRL superior a 8, son: mareas (*tidal*), hidrógeno, minerales de metal y minerales de la tierra, lignito y esquistos bituminosos. Sin embargo, de este listado solo las mareas y el hidrógeno son fuentes de energía renovable y por ello resultan interesantes para evaluar en el país, teniendo en cuenta que Colombia en su Plan Nacional de Desarrollo (PND) sólo promueve el uso de nuevas fuentes de energía de carácter renovable [11]-[12].

Una vez identificadas las FNCE reconocidas y consolidadas en el mundo que no se utilizan en Colombia, se requiere entonces plantear algunos métodos para identificar si desde el punto de vista técnico tienen el potencial para ser introducidas en el país.

4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN TÉCNICA PARA FNCE

En este capítulo se identifican los métodos existentes para la evaluación de tecnologías que aprovechan las FNCE, se reconocen cuáles son los más utilizados en el mundo, sus características, funcionamiento y requisitos para realizar la evaluación. Se realiza una comparación de los métodos más comunes con el fin de seleccionar uno que permita evaluar técnicamente la implementación y potencial de uso de FNCE en el país. Finalmente, se presenta una propuesta metodológica para implementar el método seleccionado en el país.

4.1. Métodos de evaluación

Con la finalidad de facilitar las tomas de decisiones entre diferentes alternativas en proyectos de cualquier naturaleza, diversos métodos de evaluación han sido desarrollados, los cuales comparan criterios propios de las alternativas a evaluar, dando como resultado clasificaciones o información que permite la selección de una u otra alternativa según sea pertinente; estos son denominados Métodos de Decisión Multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés). Los criterios son características de los proyectos que pueden enmarcarse en diferentes dimensiones o naturalezas, ya sean técnicos, ambientales, sociales, económicos, entre otros. Es importante tener presente que todos los proyectos son distintos y se hace necesario evaluar múltiples dimensiones, en especial si se pretenden evaluar proyectos de energía [24].

- Lo más relevante en la selección del método de evaluación a utilizar es que este cumpla con alcanzar el objetivo principal de dicha evaluación, aunque varios MCDM pueden ser empleados en un caso específico [25]. B. Roy y R. Slowínsky [107], presentan una serie de preguntas con la finalidad de escoger el más adecuado para cada caso. La pregunta principal es: “¿qué tipo(s) de resultado(s) se espera que el método tenga, para permitir la elaboración de respuestas relevantes a preguntas formuladas por el tomador de decisiones?”. Así mismo, proponen una serie de preguntas complementarias: ¿Las escalas de desempeño originales tienen las propiedades requeridas para la correcta aplicación del método en consideración?
- ¿Es simple o difícil (hasta imposible) obtener la información que el método requiere?
- ¿Deberían ser tenidos en cuenta la imprecisión, incertidumbre o indeterminación en la definición del desempeño? ¿de qué manera?
- ¿Es necesario tener en cuenta algunas formas de interacción entre los criterios?

Tras realizar estos cuestionamientos y teniendo en cuenta las características de los métodos, se debería tener la capacidad de elegir cuál de ellos se implementará para la evaluación de las alternativas.

En la literatura, diversos autores catalogan y dividen los métodos de distintas maneras, la más generalizada es una clasificación en dos subdivisiones: toma de decisiones de múltiple objetivo (MODM por sus siglas en inglés), y toma de decisiones de múltiple atributo (MADM por sus siglas en inglés). Los métodos clasificados en la primera subdivisión son generalmente utilizados para optimizar objetivos que presentan conflictos entre sí y la segunda, para identificar la opción más deseada ordenando las alternativas [24]. También suelen ser catalogados por complejidad como lo mencionan J. Wang, Y. Jing y C. Zhang et al. [26], quienes los presentan en tres categorías: métodos elementales, métodos de síntesis a criterio único y métodos de superación. Por otro lado, en la Tabla 4 , los autores Y. Simsek, D. Watts y R. dividen los métodos de toma de decisión de múltiples criterios en 5 diferentes categorías, las cuales son: elementales, de superación, síntesis a criterio único, basados en utilidad y misceláneos.

Tabla 4. Categorización de métodos de decisión multicriterio

Categorías	Método	
Elemental	WSM WPM	
Superación	PROMETHEE ELECTRE	
Síntesis a único criterio	MAUT TOPSIS SMART Análisis relacional de Grey Análisis envolvente de datos	MAVT UTA Suma ponderada difusa Máximo difuso
Basados en utilidad	AHP ANP	
Misceláneos	MACBETH CP VIKOR PAIRS NAIADE	Árboles de valor Valor de Shapley SWARA & WASPAS ASPID

Como se puede observar, la cantidad de métodos de toma de decisión multicriterio es amplia, no obstante, en la literatura concerniente a evaluaciones de proyectos energéticos los más comunes son: WSM, WPM, WASPAS, AHP, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE [24]–[29].

El *Weighted Sum Method* (WSM) es de los métodos más utilizados para realizar evaluaciones en proyectos energéticos, debido a que ordena las alternativas y muestra como resultado la mejor, siendo aquella la que tenga el mayor puntaje [26]. En general el método trabaja con criterios deseables [29] y es de computación simple [108], aunque tiene la desventaja de que no es posible integrar múltiples preferencias, pero es bastante apto para manejar problemas de una sola dimensión (naturaleza).

El *Weighted Product Method* (WPM) es similar al WSM, su única diferencia es que en su proceso matemático en vez de sumar los pesos los multiplica, este método permite un análisis tanto de una dimensión como de múltiples debido a que elimina cualquier unidad de medida [25], está designado primordialmente para resolver problemas que incluyen criterios de la misma naturaleza, aunque suele derivar en resultados indeseados ya que prioriza o demerita las alternativas alejadas del promedio [109].

El método *Weighted Aggregates Sum Product Assessment* (WASPAS) es de los métodos últimamente presentados por los científicos, bastante novedoso ya que logra combinar los métodos WSM y WPM antes mencionados, por lo que tiene características similares y más robustez para realizar la evaluación, además su precisión es considerada superior en comparación a solo utilizar el WSM o WPM por separado [110], [111]. Logra además ser útil para el completo ordenamiento de las alternativas, los criterios son independientes y aquellos cualitativos se convierten en cuantitativos [112].

El método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) es comúnmente utilizado tanto como método de pesaje de criterios basados en la experticia de pares (esto cuando los valores y pesos no pueden ser obtenidos directamente), como método de comparación de alternativas. Es similar al WSM con la diferencia que los valores de la matriz de decisión son normalizados para sumar uno, permitiendo tener valores adimensionales [25]. Es ampliamente usado en los campos social, económico, agrícola, industrial, ecológico, sistemas biológicos y también en sistemas energéticos [26]. Es un método adaptable, poco complejo y entrega una estructura jerárquica, aunque su interdependencia

entre objetivos y alternativas puede derivar en un alto contenido subjetivo, al tener varios tomadores de decisión para asignar los pesos [109].

El método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions* (TOPSIS) se basa en el concepto de ideal y anti ideal para la elección de alternativas. La regla del método es que la mejor alternativa se ubique en la menor distancia de la solución ideal positiva y a la mayor distancia de la solución ideal negativa [26], [29], [113]. La solución ideal positiva es hipotéticamente el nivel más deseado de cada criterio, mientras que la solución ideal negativa es hipotéticamente la opción que muestra los niveles menos deseados de cada criterio, y la distancia entre las soluciones se mide utilizando el método de distancia Euclidiano [25]. Es un método que ordena o jerarquiza, hace uso de toda la información disponible la cual no necesita ser independiente, y al trabajar con el principio de la distancia Euclidiana, no hace diferencia entre valores positivos y negativos [109].

El método *Preference Ranking Organization Method* (PROMETHEE), que incluye el PROMETHEE I (clasificación parcial) y el PROMETHEE II (clasificación completa), permite la jerarquización de las alternativas por medio de relaciones de dominancia o por el principio de superación [26]. Bajo este método, una alternativa es mejor cuando todos sus criterios evaluados son superiores a las de otra, si en algún caso los valores de los criterios son iguales entre las alternativas, se deberá contar con información adicional sino serán incomparables [114], [115]. Suele utilizarse para planeación y aplicación en materia energética. La diferencia entre el PROMETHEE I y el PROMETHEE II es que el primero permite los criterios incomparables para dar un pre-orden de las alternativas, en tanto que el segundo las clasifica teniendo en cuenta el orden completo con los criterios incomparables resueltos [26]. Este método involucra decisiones a nivel grupal, trabaja con información de naturaleza cuantitativa y cualitativa, incluyendo información poco certera o difusa; aunque no estructura el objetivo de manera adecuada. Depende de los tomadores de decisión para la asignación de pesos, su algoritmo es complicado y los usuarios del método están limitados a los expertos [109].

El método *Elimination et Choice Translating Reality* (ELECTRE) contiene varias familias, se cuenta con los métodos ELECTRE I, II, III, IV, TRI y otros mejorados, aunque en general se basa en establecer relaciones de dominancia o de superación para comparar las alternativas. La diferencia entre las variedades del método es la forma en que se construyen estas relaciones de dominancia [26]. El método compara las alternativas bajo las medidas de concordancia y

discordancia, la primera hace referencia a aquellos pares de alternativas que superan a otro, mientras que la segunda hace referencia a los pares de alternativas superados por otro [113]. El método es ampliamente utilizado para los planes de acción de energía sustentable, selección del lugar geográfico y evaluaciones de desempeño [29]. Es similar al PROMETHEE con la diferencia que el ELECTRE ignora las diferencias entre los niveles entre alternativas al dar el orden de jerarquía y solo tiene en cuenta la preferencia [26]; permite el uso de criterios cuantitativos y cualitativos, los resultados finales se validan con razones y trabaja con escalas heterogéneas, aunque es menos versátil y es de alta complejidad demandando mayor comprensión del objetivo de la evaluación [109].

Realmente cualquier método puede ser utilizado en el país, pues los MCDM son una serie de algoritmos que evalúan y comparan las características de las alternativas establecidas y no excluyen su posibilidad de aplicación por condiciones específicas de una localización. Sin embargo, un MCDM se selecciona sobre otro con base en el objetivo de la problemática, alcance de la evaluación y resultados esperados.

La

Tabla 5 compara los métodos mencionados a través de características como “jerarquización” que hace referencia a si entregan un orden de las alternativas, “asignación de cualidad” que es si a los criterios se les asigna una cualidad positiva o negativa lo que es necesario para comparar criterios de distinta naturaleza; otros criterios de comparación utilizados en la tabla son “cálculo de pesos de criterios,” esto hace referencia a la asignación de su peso de importancia respecto a los demás, “complejidad” respecto al algoritmo del método, y “componente subjetivo” que es si el método trabaja con subjetividad u objetividad en cuanto a los valores de los criterios.

Tabla 5. Matriz de comparación de los MCDM

MCDM	Jerarquización	Asignación de cualidad	Cálculo de pesos de criterios	Complejidad	Componente subjetiva
WSM	Si	No	Si	Baja	Baja
WPM	Si	No	Si	Baja	Baja
AHP	Si	No	No	Mediana	Elevada
WASPAS	Si	No	Si	Mediana	Baja
TOPSIS	Si	Si	Si	Mediana	Baja
PROMETHEE I	No	Si	Si	Elevada	Baja

PROMETHEE II	Si	Si	Si	Elevada	Baja
ELECTRE	No	No	Si	Elevada	Baja

Dependiendo de la naturaleza del problema a evaluar, del método a utilizar y del marco de referencia de investigación establecido, el procedimiento de implementación de los métodos puede variar, ya que el uso de un MCDM va ciertamente más allá de su propio algoritmo, pero de forma global los pasos o procedimiento se pueden describir de una forma conjunta, como se muestra en la Figura 7 [26], [27], [29], [109].

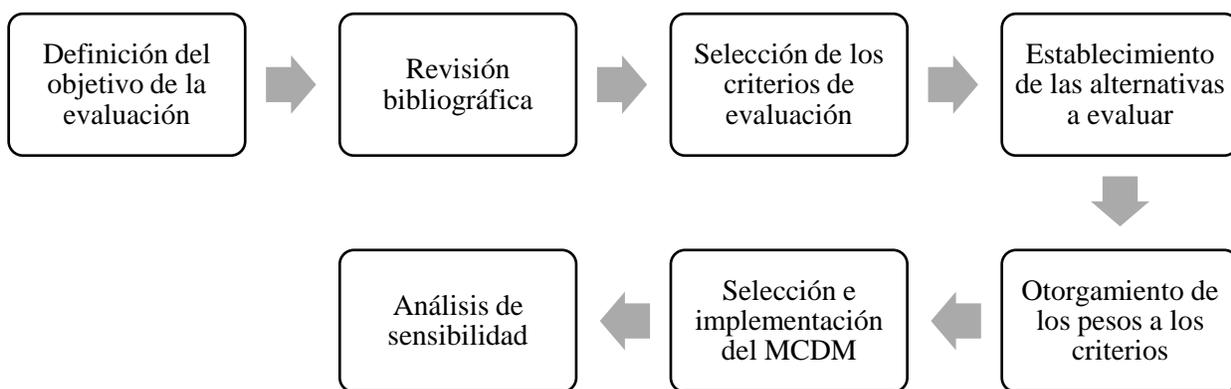


Figura 7. Proceso general para la implementación de un MCDM

Con base en la

Tabla 5 se construye la matriz de decisión mostrada en la Tabla 6. Allí, se asignan valores de 1 a 5 a los criterios de los métodos antes mencionados, (siendo 1 lo menos deseado y 5 lo más deseado), con el fin de facilitar la selección del método a trabajar según los objetivos de evaluación. El MCDM con mayor puntaje será el que mejor se ajuste a los requisitos establecidos. Dado que el fin de la evaluación es de carácter técnico, se establece como deseado y por ende con un valor de 5, a las siguientes consideraciones:

- Que el método jerarquice las alternativas.
- Que el método no asigne una cualidad a los criterios, debido a que no deseamos una comparación entre estos.
- Que el método realice el cálculo de los pesos de los criterios, para poder implementar un método de pesaje que sea objetivo.

- Que el método tenga una complejidad mediana, debido a que se obtendrá un resultado certero y robusto, sin necesidad de cálculos complejos.
- Que el método tenga una componente subjetiva baja, para evitar solicitar opiniones de una mesa de trabajo.

Sabiendo esto, se asignan los valores y se suman los puntajes para obtener una respuesta que facilite la selección como se muestra a continuación.

Tabla 6. Matriz de decisión del método a implementar

MCDM	Jerarquización	Asignación de calidad	Cálculo de pesos de criterios	Complejidad	Componente subjetiva	Total
WSM	5	5	5	1	5	21
WPM	5	5	5	1	5	21
AHP	5	5	1	5	1	17
WASPAS	5	5	5	5	5	25
TOPSIS	5	1	5	5	5	21
PROMETHEE I	1	1	5	1	5	13
PROMETHEE II	5	1	5	1	5	17
ELECTRE	1	5	5	1	5	17

Tras realizar el cálculo del total de los puntajes, se aprecia que el WASPAS es el método con el mayor puntaje, por lo que es el MCDM que mejor se ajusta a los requisitos establecidos para la evaluación ya que presenta el mayor puntaje entre todos los métodos comparados. A continuación, se da una explicación más profunda del método seleccionado, su matriz de cálculo y parámetros con los que trabaja.

4.2. Descripción del método seleccionado

Propuesto en el año 2012, es de los MCDM más recientes y robustos, logra incorporar tanto el método WSM y WPM en su algoritmo, lo que le brinda una mayor precisión [110]. Es un método de creciente uso, además de ser uno de los más aptos para la evaluación de tecnologías de energías renovables. Posee fases de cálculo cortas, permite también el completo ordenamiento de las alternativas, y el pesaje separado de criterios benéficos y no benéficos. Como desventaja, en la normalización de la matriz, sólo tiene en cuenta valores mínimos para los criterios no benéficos y valores máximos para los benéficos [112].

De forma general, el método normaliza los valores de los criterios para cada alternativa a partir de una matriz de decisión. Posteriormente, genera dos matrices adicionales para la parte de sumatoria y de multiplicación, teniendo en cuenta los pesos asignados a los criterios (el pesaje de los criterios está a consideración de los evaluadores) y por último, integra los valores de las matrices de sumatoria y multiplicación para así dar un puntaje a cada alternativa, lo cual permite organizarlas de mayor a menor puntaje [111].

4.2.1. Matriz de decisión del método

A continuación, se describe el algoritmo del método WASPAS [110], [111], [116]:

- 1) Se debe desarrollar la matriz de decisión A con los criterios para las distintas alternativas.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde a_{ij} hace referencia al criterio j de la alternativa i .

- 2) Con la matriz de decisión establecida, se hace la normalización de los valores de los criterios separando los criterios benéficos o no benéficos y se presentan en la matriz normalizada \bar{A} . Aunque el método no diferencia cualidades de los criterios, se cuenta con las siguientes ecuaciones para poder implementar los criterios de ambas cualidades. Si un criterio se considera benéfico se tiene en cuenta que el mayor valor de este va a ser el óptimo o deseable; por otro lado, si es un criterio no benéfico el menor valor de éste va a ser el óptimo o deseable:

- Criterio benéfico (valor máximo deseable), según Ecuación 1:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\underset{i}{opt} a_{ij}} \quad \text{Ecuación 1}$$

- Criterio no benéfico (Valor mínimo deseable), según Ecuación 2:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{\underset{i}{opt} a_{ij}}{a_{ij}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $\underset{i}{opt} a_{ij}$ hace referencia al valor deseable de cada caso, $i = \overline{1, m}$, y $j = \overline{1, n}$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \cdots & \bar{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_{m1} & \cdots & \bar{a}_{mn} \end{bmatrix}$$

3) Se generan las matrices pesadas y normalizadas para la parte de suma y para la parte de multiplicación de la siguiente forma.

- Matriz de suma $\bar{\bar{A}}_{suma}$ se genera con la ecuación $\bar{\bar{a}}_{ij,suma} = \bar{a}_{ij}w_j$, donde \bar{a}_{ij} hace referencia al valor normalizado del valor del criterio para la alternativa y w_j hace referencia al peso asignado del criterio.

$$\bar{\bar{A}}_{suma} = \begin{bmatrix} \bar{\bar{a}}_{11,suma} & \cdots & \bar{\bar{a}}_{1n,suma} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\bar{a}}_{m1,suma} & \cdots & \bar{\bar{a}}_{mn,suma} \end{bmatrix}$$

- Matriz de multiplicación $\bar{\bar{A}}_{multiplicación}$ se genera con: $\bar{\bar{a}}_{ij,multiplicación} = \bar{a}_{ij}^{w_j}$, donde \bar{a}_{ij} hace referencia al valor normalizado del valor del criterio para la alternativa y w_j hace referencia al peso asignado del criterio.

$$\bar{\bar{A}}_{multiplicación} = \begin{bmatrix} \bar{\bar{a}}_{11,multiplicación} & \cdots & \bar{\bar{a}}_{nj,multiplicación} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\bar{a}}_{m1,multiplicación} & \cdots & \bar{\bar{a}}_{mn,multiplicación} \end{bmatrix}$$

4) Se crean dos vectores normalizados y pesados para la parte de suma $Q^{(1)}$ y la parte de multiplicación $Q^{(2)}$, como se muestra a continuación:

- Vector normalizado y pesado de suma se obtiene según la Ecuación 3:

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{\bar{a}}_{ij,suma} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde el vector normalizado y pesado resultante es de la siguiente forma:

$$Q^{(1)} = \begin{bmatrix} Q_1^{(1)} \\ \vdots \\ Q_i^{(1)} \end{bmatrix}$$

- Vector normalizado y pesado de multiplicación se obtiene según la Ecuación 4:

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n \bar{\bar{a}}_{ij,multiplicación} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde el vector normalizado y pesado resultante es de la siguiente forma:

$$Q^{(2)} = \begin{bmatrix} Q_1^{(2)} \\ \vdots \\ Q_i^{(2)} \end{bmatrix}$$

5) Calcular las varianzas para el cálculo de la importancia relativa total de la siguiente forma:

- Para la parte del WSM se tiene la Ecuación 5:

$$\sigma^2(Q_i^{(1)}) = \sum_{j=1}^n \sigma^2(\bar{a}_{ij})w_j^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

- Para la parte del WPM se tiene la Ecuación 6:

$$\sigma^2(Q_i^{(2)}) = \prod_{j=1}^n \sigma^2(\bar{a}_{ij}) \left[\frac{Q_i^{(2)}w_j}{(\bar{a}_{ij})^{w_j}(\bar{a}_{ij})^{1-w_j}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde $\sigma^2(\bar{a}_{ij}) = 0,0025 * (\bar{a}_{ij})^2$ es la varianza de los valores de los criterios normalizados inicialmente con un 95% de confiabilidad [116].

- 6) Determinar el coeficiente λ para la determinación del índice de importancia relativa por medio de la Ecuación 7:

$$\lambda_i = \frac{\sigma^2(Q_i^{(2)})}{\sigma^2(Q_i^{(1)}) + \sigma^2(Q_i^{(2)})} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde λ hace referencia al vector columna:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix}$$

- 7) Cálculo del índice de importancia relativa total en el vector columna Q , según la Ecuación 8, el cual permite apreciar el resultado de la evaluación de las alternativas.

$$Q_i = \lambda_i Q_i^{(1)} + (1 - \lambda_i) Q_i^{(2)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde el vector columna del índice de importancia relativa total es de la siguiente forma:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_m \end{bmatrix}$$

Esto con el fin de dar mayor o menor importancia ya sea a la parte de suma o de multiplicación del método dependiendo de la varianza de los datos.

4.2.2. Criterios técnicos de las FNCE

Existen múltiples criterios que se usan para evaluar alternativas, dependiendo del objetivo de la evaluación se escogen unos sobre otros. Para efecto de este documento, se tratará la naturaleza

(técnica, ambiental, económica, social, etc.) como dimensión y la característica (eficiencia, madurez, disponibilidad del recurso, etc.) como criterio; los cuales serán comparados para evaluar las alternativas. El objetivo de la implementación del método es realizar una evaluación técnica para la incorporación de nuevas FNCE en Colombia, por lo que se hace necesario saber qué criterios técnicos se evalúan en estas fuentes, para así poder efectuar la evaluación en términos de esta dimensión.

A partir de la revisión bibliográfica de diversos estudios y evaluaciones realizadas por distintos autores en materia de proyectos energéticos, se elaboró la Tabla 7 donde se consignaron los criterios concernientes a la dimensión técnica y de los cuales se pueden seleccionar los deseados para comparar las alternativas [24], [26], [27], [29], [117]–[121].

Tabla 7. Lista de criterios técnicos

Número	Criterio	Número	Criterio
1	Eficiencia	19	Compatibilidad técnica
2	Recurso	20	Estabilidad de la red
3	Madurez tecnológica	21	Continuidad y predecibilidad del desempeño
4	Potencial de generación de poder	22	Horas de almacenamiento
5	Fiabilidad	23	Hibridación
6	Factor de capacidad	24	Idoneidad para microrredes
7	Seguridad del sistema energético	25	Capacidad de aumento
8	Reserva/Producción	26	Temperatura de operación
9	Demanda	27	Punto de congelamiento del fluido de trabajo
10	Potencial de desarrollo de la tecnología	28	Disponibilidad
11	Eficiencia exergética	29	Pérdida de transmisión
12	Tiempo de despliegue	30	Pérdida de distribución
13	Recurso experto humano	31	Duración de cortes de la planta
14	Disponibilidad de suministro eléctrico	32	Expedibilidad
15	Facilidad de descentralización	33	Simplicidad de integración
16	Seguridad para cubrir la demanda pico	34	Flexibilidad operacional
17	Escalabilidad	35	Tasas de interconexión
18	Nivel de complejidad	36	Reservas del recurso

Conociendo el funcionamiento del método y los criterios con los que este puede trabajar para realizar la evaluación, en la sección 4.3 se seleccionan los criterios para trabajar según sea más

pertinente para Colombia y se propone además la metodología para realizar una evaluación con el método y criterios seleccionados.

4.3. Propuesta de implementación del método de evaluación técnica para FNCE en Colombia

Lo realmente decisivo e importante para el desarrollo de la evaluación es la selección de los criterios que alimentarán el mecanismo de cálculo, por lo que a continuación, se describen características técnicas y energéticas relevantes de Colombia y se seleccionan los criterios para ser utilizados en la evaluación, además de que se realiza la propuesta metodológica para la implementación del método en el país.

4.3.1. Características técnicas y energéticas relevantes para implementar FNCE en Colombia

Hay ciertas características relevantes que se deben considerar al momento de emplear FNCE en Colombia, sobre todo de las FNCER, debido a que el objeto de la Ley 1715 de 2014 hace especial énfasis en su desarrollo en el país. Dichas características técnicas y energéticas pueden ser tales como conectividad a la red nacional, ubicación, y barreras que causan dificultades para el desarrollo de estas FNCE en especial de las FNCER.

Existen básicamente tres características técnicas y energéticas específicas que actúan como barreras en cuanto a la implementación de las FNCE en Colombia, la falta de conectividad al SIN, tarifas o impuestos personalizados, e insuficiencia de información acerca del potencial de las FNCE especialmente de las renovables [122]. A continuación, se describen estas características identificadas.

- Falta de conectividad al SIN: el mallado eléctrico colombiano no cubre más de un 48% del territorio, dejando el 52% como zonas no interconectadas (ZNI), y aunque el SIN cubre cerca del 96% de la población, 625.000 personas quedan por fuera del mallado eléctrico nacional, recayendo en la producción de energía eléctrica basada en combustibles fósiles. Paradójicamente, las ZNI son las que suelen tener mayor potencial de FNCE sobre todo de FNCER [122].
- Tarifas o impuestos personalizados: la Ley 1715 de 2014 hace alusión a incentivos tributarios, incluyendo descuentos en cuanto a importación de equipo o materiales concernientes a proyectos de FNCE. Sin embargo, frecuentemente dichas exenciones no se realizan por el

desconocimiento de los oficiales y funcionarios de las aduanas, lo que genera reclamos de los inversionistas y retrasa el desarrollo de estos proyectos [122].

- Insuficiencia de información acerca del potencial de las FNCE, especialmente de las renovables: en el país hay una carencia de datos en cuanto a recursos y potenciales de las FNCE, lo que causa mayores costos y riesgos de inversión por la información incierta y con actualización poco constante [122], [123].

4.3.2. Criterios técnicos seleccionados

En la Tabla 7 se listaron una serie de criterios de dimensión técnica que son ampliamente utilizados y mencionados por autores para la evaluación de proyectos de FNCE. Con base en esta tabla y la revisión bibliográfica realizada, se eligen los criterios que se presentan en la Tabla 8, debido a su recurrencia en la literatura y fácil adquisición de sus valores, teniendo en cuenta las características técnicas y energéticas del país descritas anteriormente.

Tabla 8. Criterios técnicos escogidos para Colombia

Criterio	Descripción	Unidad	Proyectos energéticos donde se consideran
Eficiencia	Razón entre la energía producida y la energía de entrada. La cantidad de energía útil que puede ser obtenida de una fuente de energía.	%	[24], [26], [27], [29], [117], [118], [120], [124]–[126]
Disponibilidad del recurso	Cantidad de recurso energético a ser aprovechado por una tecnología.	MW	[24], [117], [120], [124]
Factor de capacidad	Es la razón de la energía producida en un tiempo y la cantidad máxima de energía que pudo ser producida en ese mismo tiempo si se operara a toda capacidad.	%	[24], [29], [120], [126]
Madurez tecnológica	El reconocimiento internacional del desarrollo de una tecnología que indica si ya llegó a un máximo de desarrollo o aún puede ser mejorada	TRL	[24], [26], [27], [29], [117]–[119], [124], [127]

La eficiencia y el factor de capacidad son generalmente dados por los proveedores de las tecnologías, la madurez tecnológica requiere de revisión bibliográfica, y la disponibilidad del recurso puede ser encontrada en bases de datos de agencias meteorológicas, tales como el IDEAM y la NASA. Una vez establecida la matriz de decisión del MCDM seleccionado a desarrollar y los

criterios establecidos a trabajar, se propone a continuación la metodología para la implementación del método de evaluación en el país.

4.3.3. Propuesta metodológica

La Figura 8 presenta, en un diagrama de flujo, la propuesta metodológica que tiene por objetivo realizar una evaluación técnica de la implementación de FNCE en Colombia. El MCDM seleccionado realiza una jerarquización de las alternativas, dependiendo de los criterios evaluados, lo cual permite identificar la mejor opción para el país. Se debe entonces seleccionar las FNCE a evaluar y las tecnologías que aprovechan estas fuentes para generar energía eléctrica. Posteriormente, y teniendo en cuenta los criterios propuestos en la Tabla 8. Se debe recopilar la información necesaria para alimentar la matriz de decisión del MCDM seleccionado (WASPAS), esto es: la eficiencia de las tecnologías, la disponibilidad del recurso en el área geográfica donde se instalará la tecnología, el factor de capacidad asociado a la tecnología y la madurez tecnológica que puede medirse en los niveles del TRL.

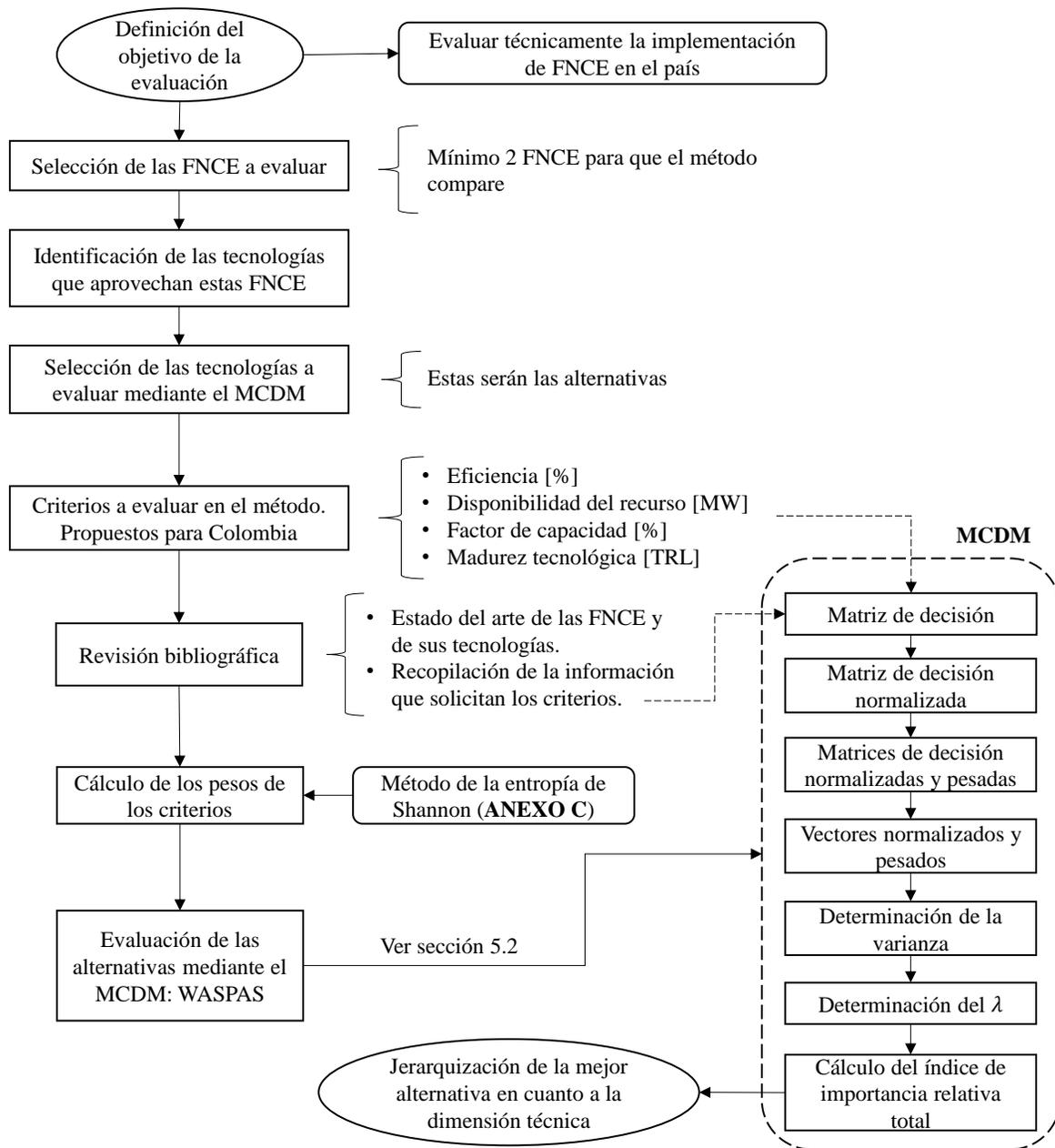


Figura 8. Propuesta metodológica para evaluar técnicamente la implementación de FNCE en Colombia

Se propone entonces el método WASPAS para evaluar técnicamente la implementación y el potencial de uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE) no utilizadas en Colombia, en conjunto con el método de la Entropía de Shannon para asignar pesos a los criterios de una forma objetiva; dando como resultado una jerarquización de las alternativas, lo cual facilita la toma de decisiones frente a la incorporación de una nueva FNCE en el país.

CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la matriz energética de generación eléctrica de Colombia, la definición de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos descrita en la Ley 697 de 2001 y el reporte de la capacidad efectiva de generación eléctrica de la empresa XM para el año 2020, las FNCE utilizadas en Colombia son la biomasa, la eólica, la hidráulica y la solar.
- Considerando la Ley 1715 de 2014, donde se definen las FNCE bajo tres aspectos: comerciabilidad, sostenibilidad ambiental, y marginalidad; se proponen los siguientes límites para cada uno de los aspectos: el nivel CRI 5 (*Commercial Readiness Index*) como límite inferior para que una fuente de energía sea reconocida como ampliamente comercializada; una capacidad instalada superior al 10 % de la generación eléctrica del país para que una fuente se considere de uso no marginal; y finalmente, un FEG (factor de emisiones de generación) de $0,13 \frac{tCO_2}{MWh}$ como límite superior para que una fuente sea considerada sostenible ambientalmente en el país.
- Teniendo presente las métricas y límites propuestos, además de la definición de FNCE dada en la Ley 1715 de 2014, se identificó que para que una FNCE sea considerada convencional debe cumplir con los límites propuestos para los parámetros: comerciabilidad, marginalidad y sostenibilidad ambiental. Sin embargo, también se observó que una FNCE seguirá siendo sostenible ambientalmente así se torne convencional, y esto es debido a que bajo la ley estas fuentes ya son sostenibles ambientalmente y no dejarán de serlo ya que esa es su naturaleza.
- Teniendo en cuenta las fuentes de energía primaria existentes a nivel global y el TRL de las tecnologías que aprovechan estas fuentes, las FNCE no utilizadas en Colombia y sus respectiva madurez tecnológica son: mares (TRL 5 a 9), geotérmica (TRL 2 a 5), energía de los residuos (TRL no identificado), hidrógeno (TRL 7 y 8), energía sísmica (TRL 4), asfaltos (TRL 3 a 6), turba (TRL no identificado), lignito (TRL 2 a 9), esquistos bituminosos (TRL 7 y 8), arenas de alquitrán (TRL no identificado), hidratos de gas (TRL no identificado), minerales de metal y minerales de la tierra (TRL 1 a 11). De las cuales aquellas con un TRL superior a 8 se consideran maduras tecnológicamente por los países con economías en rápido crecimiento y de la OCDE.
- Los métodos más utilizados para evaluar la aplicabilidad de FNCE, son WSM, WPM, WASPAS, AHP, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE. Estos métodos permiten evaluar según

el objetivo deseado, criterios de diferente naturaleza, entre ellas la técnica. A partir de una matriz de decisión, se compararon las características de los métodos mencionados, teniendo en cuenta diferentes criterios: jerarquización, asignación de cualidad, cálculo de pesos de criterios, complejidad y componente subjetivo.

- Se identificó que la selección del método no está ligada a las características energéticas y/o técnicas de un país, sino a los objetivos planteados para la evaluación. Sin embargo, estas características tienen una mayor influencia en la selección de los criterios de evaluación, en nuestro caso, criterios de naturaleza técnica. Teniendo esto en cuenta, se eligió el WASPAS para evaluar técnicamente la implementación y el potencial de uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE) no utilizadas en Colombia, ya que sólo interesa identificar qué fuente es técnicamente superior a las otras, y este método lo logra al entregar una estructura jerarquizada de las alternativas. Además, el WASPAS tiene una complejidad media, posee una alta precisión gracias a la combinación de los métodos WSM y WPM, tiene fases de cálculo cortos lo que agiliza el proceso de evaluación, separa los criterios benéficos de los no benéficos y posee un bajo nivel de subjetividad.
- En Colombia se lograron identificar características técnicas, las cuales resultan siendo barreras para el desarrollo de las FNCE en el país, tales como: falta de conectividad al SIN, tarifas o impuestos personalizados, e insuficiencia de información acerca del potencial de las FNCE especialmente de las renovables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. G. Stern, “A new sustainable hydrogen clean energy paradigm,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 9, pp. 4244–4255, 2018.
- [2] CEPAL, “Seguridad energética: análisis y evaluación del caso de México,” *CEPAL - Ser. Estud. y Perspect.*, vol. N° 179, 2018.
- [3] A. Banshwar, N. K. Sharma, Y. R. Sood, and R. Shrivastava, “Renewable energy sources as a new participant in ancillary service markets,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 18, pp. 106–120, 2017.
- [4] N. Sönnichsen, “Projected energy consumption worldwide from 1990 to 2040, by energy source,” *Statista*, 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/222066/projected-global-energy-consumption-by-source/>. [Accessed: 08-Aug-2020].
- [5] L. Yao, X. Shi, and P. Andrews-Speed, “Conceptualization of energy security in resource-poor economies: The role of the nature of economy,” *Energy Policy*, vol. 114, pp. 394–402, 2018.
- [6] Fondos de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía - FENOGE, “¿Qué son Fuentes No Convencionales de Energía?,” 2020. [Online]. Available: <https://fenoge.com/fuentes-no-convencionales-de-energia/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [7] T. Kitamura and S. Managi, “Energy security and potential supply disruption: A case study in Japan,” *Energy Policy*, vol. 110, no. July, pp. 90–104, 2017.
- [8] B. Haddad, A. Liazid, and P. Ferreira, “A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system,” *Renew. Energy*, vol. 107, pp. 462–472, Jul. 2017.
- [9] H. I. Cobuloglu and I. E. Büyüktaktakin, “A stochastic multi-criteria decision analysis for sustainable biomass crop selection,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 15–16, pp. 6065–6074, Sep. 2015.
- [10] E. Ilbahar, S. Cebi, and C. Kahraman, “A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 25, no. May, pp. 18–33,

2019.

- [11] L. E. Vallejo Zamudio, “Plan nacional de desarrollo 2018-2022: ‘Pacto por Colombia, pacto por la equidad,’” *Apunt. del Cenes*, 2019.
- [12] Organización de las Naciones Unidas-ONU, “Objetivos de Desarrollo Sostenible,” 2020. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Accessed: 09-Sep-2020].
- [13] F. García, M. Yujato, and A. Arenas, *Energy Statistics Manual 2017*. Quito: OECD, 2017.
- [14] United Nations Statistics Division, *International Recommendations for Energy Statistics (IRES)*. 2018.
- [15] S. Øvergaard, “Definition of primary and secondary energy,” in *International Recommendations for Energy Statistics*, no. Energy Statistics, 2008, pp. 1–7.
- [16] United Nations, “Concepts and methods in energy statistics, with special reference to energy accounts and balances,” New York, 1982.
- [17] Sustainable Energy for All (SE4ALL), “Chapter 4: renewable Energy,” in *Global Tracking Framework*, no. 296, 2017, p. 58.
- [18] National Geographic Society, “Nonrenewable Resources,” *Education*, 2020. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/nonrenewable-resources/>. [Accessed: 03-Nov-2020].
- [19] B. H. Khan, *Non-conventional energy resources*. New Delhi: McGraw-Hill, 2006.
- [20] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1715 de 2014*. Colombia, 2014, p. 26.
- [21] Congreso de la República de Colombia, *Ley 697 de 2001*, vol. 44573, no. Octubre 3. Colombia, 2001, pp. 1–4.
- [22] C. Batlle, “Analysis of the impact of increased Non- Conventional Renewable Energy generation on Latin American Electric Power Systems Tools and Methodologies for assessing future Operation, Planning and Expansion,” IDB-DP-341, 2014.
- [23] S. A. Khan, A. Chaabane, and F. T. Dweiri, “Multi-Criteria Decision-Making Methods

- Application in Supply Chain Management: A Systematic Literature Review,” in *Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management*, InTech, 2018, p. 38.
- [24] Y. Simsek, D. Watts, and R. Escobar, “Sustainability evaluation of Concentrated Solar Power (CSP) projects under Clean Development Mechanism (CDM) by using Multi Criteria Decision Method (MCDM),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. May 2017, pp. 421–438, 2018.
- [25] E. Mulliner, N. Malys, and V. Maliene, “Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability,” *Omega (United Kingdom)*, vol. 59, pp. 146–156, 2016.
- [26] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, 2009.
- [27] T. Li, A. Li, and X. Guo, “The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry—A comprehensive analysis of MCDM methods,” *Energy*, vol. 212, p. 118694, 2020.
- [28] M. K. Loganathan, B. Mishra, C. M. Tan, T. Kongsvik, and R. N. Rai, “Multi-Criteria decision making (MCDM) for the selection of Li-Ion batteries used in electric vehicles (EVs),” *Mater. Today Proc.*, Aug. 2020.
- [29] H. C. Lee and C. Ter Chang, “Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. April 2017, pp. 883–896, 2018.
- [30] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – agosto de 2018. Subdirección de energía eléctrica – grupo de generación,” Bogotá D.C., 2018.
- [31] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “Energía eléctrica SIN (Sistema Interconectado Nacional),” *Información Cifras*, 2020. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx>. [Accessed: 08-

Nov-2020].

- [32] XM S.A., “Capacidad efectiva por tipo de generación,” *Parámetros Técnicos del SIN - PARATEC*, 2020. [Online]. Available: <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>. [Accessed: 08-Aug-2020].
- [33] J. J. Ramsden, “The impacts of nanotechnology,” *Nanotechnol. Perceptions*, vol. 7, no. 1, pp. 28–66, 2011.
- [34] Granted Consultancy, “What is CRL?,” *octubre 29*, 2018. [Online]. Available: <https://grantedltd.co.uk/funding-blog/what-is-crl/?cn-reloaded=1>. [Accessed: 24-Oct-2020].
- [35] International Energy Agency’s Renewable Energy Technology Deployment Technology and Collaboration Programme, “Commercial Readiness Index Assessment. Using the method as a tool in renewable energy policy desingn (Re-CRI),” 2017.
- [36] J. Szekely, C. W. Chang, and W. E. Johnson, “Experimental measurement and prediction of melt surface velocities in a 30,000 lb inductively stirred melt,” *Metall. Trans. B*, vol. 8, no. 2, pp. 514–517, Sep. 1977.
- [37] R. A. Española, “Marginal,” *Diccionario de la lengua española*, 2020. [Online]. Available: <https://dle.rae.es/marginal>. [Accessed: 09-Nov-2020].
- [38] Congreso de la República de Colombia, “Ley 142 de 1994,” *D. Of.*, vol. 1982, p. 323, 1994.
- [39] G. Liu, “Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 611–621, 2014.
- [40] W. M. Budzianowski and K. Postawa, “Renewable energy from biogas with reduced carbon dioxide footprint: Implications of applying different plant configurations and operating pressures,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 852–868, 2017.
- [41] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, “Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 5, pp. 1082–1088, 2009.

- [42] Manlio F. Coviello and B. Ruchansky, “Avances en materia de energías sostenibles en América Latina y el Caribe. Resultados del Marco de Seguimiento Mundial, informe de 2017,” 2017.
- [43] Marcela Bonilla Madriñan and H. H. H. Flórez, “Cálculo del FE del SIN 2018 Dic 2019.” p. 21, 2019.
- [44] U.S. Energy Information Administration (EIA), “What is energy? Sources of energy,” *Basics*, 2020. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/sources-of-energy.php>. [Accessed: 15-Nov-2020].
- [45] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note -Austria,” 2020.
- [46] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note -Belgium,” 2020.
- [47] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note -Switzerland,” 2020.
- [48] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Chile,” 2020.
- [49] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Estonia,” 2020.
- [50] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Finland,” 2020.
- [51] OECD - Better policies for better lives, “France has very limited fossil-energy resources,” 2020.
- [52] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Greece,” 2020.
- [53] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Hungary,” 2020.
- [54] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Iceland,” 2020.
- [55] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Italy,” 2020.
- [56] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Japan,” 2020.
- [57] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Lithuania,” 2020.
- [58] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Luxembourg,” 2020.

- [59] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - México,” 2020.
- [60] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Portugal,” 2020.
- [61] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Sweden,” 2020.
- [62] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Turkey,” 2020.
- [63] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Australia,” 2020.
- [64] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Germany,” 2020.
- [65] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Denmark,” 2020.
- [66] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Spain,” 2019.
- [67] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - United Kingdom,” 2020.
- [68] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Ireland,” 2020.
- [69] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Israel,” 2020.
- [70] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Korea,” 2020.
- [71] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Latvia,” 2020.
- [72] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - The Netherlands,” 2019.
- [73] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Norway,” 2019.
- [74] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - New Zealand,” 2020.
- [75] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Poland,” 2019.
- [76] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Slovenia,” 2020.
- [77] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - United States of America,” 2020.
- [78] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Czech Republic,”

2020.

- [79] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note -Canada,” 2019.
- [80] OECD - Better policies for better lives, “Fossil fuel support country note - Australia,” 2020.
- [81] A. Demirbas, *Waste Energy for Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [82] J. M. Ibáñez de Aldecoa Quintana, “Niveles de madurez de la tecnología technology readiness levels. TRLs. Una introducción,” 2016.
- [83] Australian Renewable Energy Agency, “Commercial Readiness Index for Renewable Energy Sectors ARENA,” *Metall. Trans. B*, vol. 8, no. 2, pp. 514–517, 1977.
- [84] B. He, L. Shan, L. Bao, and Y. Liang, “Product technology maturity prediction based on TRIZ technical evolution theory,” *CICC-ITOE 2010 - 2010 Int. Conf. Innov. Comput. Commun. 2010 Asia-Pacific Conf. Inf. Technol. Ocean Eng.*, no. 2, pp. 166–169, 2010.
- [85] X. jun He, X. Meng, Y. bo Dong, and Y. ying Wu, “Demand identification model of potential technology based on SAO structure semantic analysis: The case of new energy and energy saving fields,” *Technol. Soc.*, vol. 58, no. February, pp. 1–10, 2019.
- [86] O. Dedehayir and M. Steinert, “The hype cycle model: A review and future directions,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 108, pp. 28–41, 2016.
- [87] B. Sauser, D. Verma, J. Ramirez-Marquez, and R. Gove, “From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels,” *Conf. Syst. Eng. Res. Los Angeles, CA*, no. May, pp. 1–10, 2006.
- [88] Colciencias, “Guía Técnica para el reconocimiento de centros de desarrollo tecnológico y centros de innovación y productividad.” Sistema de gestión de la calidad de Colciencias, p. 43, 2016.
- [89] NASA, “Technology Readiness Level,” *Technology*, 2012. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html. [Accessed: 10-Nov-2020].
- [90] US Department of Energy, “Technology Readiness Assessment Guide,” Washington, D.C.,

2011.

- [91] International Energy Agency (IEA), “Innovation needs in the Sustainable Development Scenario,” *Clean Energy Innovation*, 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation/innovation-needs-in-the-sustainable-development-scenario>. [Accessed: 20-Oct-2020].
- [92] E. Rusu and F. Onea, “A review of the technologies for wave energy extraction,” *Clean Energy*, vol. 2, no. 1. pp. 10–19, 2018.
- [93] F. Mwasilu and J. W. Jung, “Potential for power generation from ocean wave renewable energy source: A comprehensive review on state-of-the-art technology and future prospects,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 3. pp. 363–375, 2019.
- [94] L. Mofor, J. Goldsmith, and F. Jones, “Ocean Energy: Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook,” *Int. Renew. energy agency IRENA*, no. August, p. 76, 2014.
- [95] M. Shadman *et al.*, “Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: A case study of Brazil,” *Energies*, vol. 12, no. 19, 2019.
- [96] T. Garabetian and P. Dumas, “Report on Competitiveness of the geothermal industry,” 2019.
- [97] R. Shortall and A. Uihlein, *Geothermal Energy Technology Development Report 2018*, JRC118299 ed. Luxembourg: EUR 29917 EN, European Commission, 2019.
- [98] Y. Ruf, M. Kaufmann, S. Lange, J. Pfister, F. Heieck, and A. Endres Brussels, “Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities,” vol. 1, no. September, pp. 108–123, 2017.
- [99] M. Gholikhani, H. Roshani, S. Dessouky, and A. T. Papagiannakis, “A critical review of roadway energy harvesting technologies,” *Applied Energy*, vol. 261, no. December 2019. Elsevier, p. 114388, 2020.
- [100] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, and D. Inman, “High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications,” *Joule*, vol. 2, no. 4. Elsevier Inc., pp. 642–697, 2018.
- [101] IEA, “ETP Clean Energy Technology Guide,” *IEA Paris*, 2020. [Online]. Available:

<https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>. [Accessed: 13-Oct-2020].

- [102] X. Zhu, Y. Yu, and F. Li, “A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116818, 2019.
- [103] W. Jiang *et al.*, “Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology,” *Appl. Energy*, vol. 205, no. June, pp. 941–950, 2017.
- [104] Department of Economic Development, JOGMEC, and Environmental Clean Technologies Limited, “Capturing the chemistry of lignite without the emissions,” Victoria, 2019.
- [105] InnoEnergy, “Energy for Circular Economy. Thematic Roadmap,” 2018.
- [106] M. B. Smith and C. Montgomery, *Hydraulic Fracturing*, no. January. CRC Press, 2015.
- [107] B. Roy and R. Słowiński, “Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method,” *EURO J. Decis. Process.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 69–97, 2013.
- [108] A. Kumar *et al.*, “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. March, pp. 596–609, 2017.
- [109] A. Kumar *et al.*, “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, no. March. Elsevier, pp. 596–609, 2017.
- [110] S. Hashemkhani Zolfani, M. H. Aghdaie, A. Derakhti, E. K. Zavadskas, and M. H. Morshed Varzandeh, “Decision making on business issues with foresight perspective; An application of new hybrid MCDM model in shopping mall locating,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 17, pp. 7111–7121, 2013.
- [111] M. Vafaeipour, S. Hashemkhani Zolfani, M. H. Morshed Varzandeh, A. Derakhti, and M. Keshavarz Eshkalag, “Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 653–663, 2014.
- [112] I. Siksnyte-Butkiene, E. K. Zavadskas, and D. Streimikiene, “Multi-Criteria Decision-

Making (MCDM) for the Assessment of Renewable Energy Technologies in a Household: A Review,” *Energies*, vol. 13, no. 5, p. 1164, Mar. 2020.

- [113] J. R. Pallarés, “Métodos De Decisión Multicriterio Electre Y Topsis Aplicados a La Elección De Un Dispositivo Móvil,” Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, 2015.
- [114] J. García Islas, “Las Líneas Estratégicas Del Sector Hídrico En México En Materia De Investigación, Desarrollo Tecnológico Y Formación De Recursos Humanos: Una Jerarquización Empleando El Método Promethee,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [115] M. Fontana and J. Muñuzuri, “Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil,” Universidad de Sevilla, 2015.
- [116] S. Pradhan, S. Indraneel, R. Sharma, D. K. Bagal, and R. N. Bathe, “Optimization of machinability criteria during dry machining of Ti-2 with micro-groove cutting tool using WASPAS approach,” *Mater. Today Proc.*, Mar. 2020.
- [117] H. Al Garni, A. Kassem, A. Awasthi, D. Komljenovic, and K. Al-Haddad, “A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 16, pp. 137–150, 2016.
- [118] A. Kassem, K. Al-Haddad, D. Komljenovic, and A. Schiffauerova, “A value tree for identification of evaluation criteria for solar thermal power technologies in developing countries,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 16, pp. 18–32, 2016.
- [119] M. Troldborg, S. Heslop, and R. L. Hough, “Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1173–1184, 2014.
- [120] A. I. Chatzimouratidis and P. A. Pilavachi, “Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 3, pp. 778–787, 2009.
- [121] J. D. Nixon, P. K. Dey, and P. A. Davies, “Which is the best solar thermal collection

- technology for electricity generation in north-west India? Evaluation of options using the analytical hierarchy process,” *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5230–5240, 2010.
- [122] T. Gómez-Navarro and D. Ribó-Pérez, “Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. February, pp. 131–141, 2018.
- [123] H. García, A. Corredor, L. Calderón, and M. Gómez, “Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia,” 2013.
- [124] S. Theodorou, G. Florides, and S. Tassou, “The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 12, pp. 7783–7792, 2010.
- [125] T. Kaya and C. Kahraman, “Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul,” *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2517–2527, 2010.
- [126] E. W. Stein, “A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 640–654, 2013.
- [127] T. Tsoutsos, M. Drandaki, N. Frantzeskaki, E. Iosifidis, and I. Kiosses, “Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 5, pp. 1587–1600, 2009.
- [128] Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación, “Documento No. 1602. Actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.,” Bogotá D.C., 2016.
- [129] M. M. H. Bellido, H. L. Mendonça, M. V. de A. Fonseca, D. A. C. Branco, and A. O. Pereira, “Maturity-based analysis of emerging technologies in the Brazilian Power Sector,” *J. Clean. Prod.*, vol. 243, p. 118603, 2020.
- [130] A. Linden and J. Fenn, “Understanding Gartner’s hype cycles,” *Strateg. Anal. Rep. N° R-20-1971. Gart. Res.*, no. May, p. 12, 2003.
- [131] M. Knaggs *et al.*, “Application of systems readiness level methods in advanced fossil energy applications,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 44, pp. 497–506, 2015.

- [132] H. Li, W. Wang, L. Fan, Q. Li, and X. Chen, “A novel hybrid MCDM model for machine tool selection using fuzzy DEMATEL, entropy weighting and later defuzzification VIKOR,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 91, p. 106207, 2020.

ANEXOS

ANEXO A. CRI

Tabla 9. Matriz de cálculo del CRI

		Indicadores								
		Ambiente regulatorio	Aceptación de las partes interesadas	Desempeño técnico	Desempeño financiero-Costos	Propuesta financiera-Ingresos	Cadena de suministros de la industrial y habilidades	Oportunidades de mercado	Madurez de la compañía	
Nivel de resumen de estado	Clase de activo de grado "financiable"									6
	Competencia en el mercado llevando a un despliegue amplio									5
	Múltiples aplicaciones comerciales									4
	Escalada comercial									3
	Ensayo comercial									2
	Propuesta comercial hipotética									1

El CRI consta de 8 indicadores, cada uno con 6 niveles que serán explicados de la Tabla 10 a la Tabla 17. El funcionamiento es simple, dependiendo del nivel de cada indicador en específico se posiciona sobre la matriz, cuando se completan los 8 indicadores se podrá obtener el nivel general de CRI con el promedio de los niveles de todos los indicadores y se posiciona sobre la franja a la izquierda (verde claro), así se obtiene el CRI para una tecnología de aprovechamiento de fuentes de energía. La información fue obtenida de la plantilla brindada por ARENA [83] y traducida para esta investigación.

Tabla 10. Descripción del indicador “ambiente regulatorio”

Nivel	Resumen del indicador
6	Procesos de regulación, planeación y permisos son documentados y definidos con procesos en marcha de revisión y refinamiento. Los mercados de inversión ven el establecimiento de políticas a término largo, robustas y probadas.
5	Desafíos de regulación, planeación y permisos son entendidos y bajo revisión, aun así, algunos permanecen sin resolver y se vuelven críticos a medida que la penetración crece.
4	Los hallazgos clave en planeación publicados, permisos y desafíos regulatorios basados en evidencia actual. Jurisdicciones múltiples con experiencia liderando para emerger estándares nacionales. Establecimiento de políticas para la "promoción del mercado"
3	Bosquejo de recomendaciones emergentes para tratar barreras clave. Primeros desarrolladores invirtiendo en desarrollo de procesos para así obtener certificación. Establecimiento de políticas enfocadas en promoción de proyecto/tecnología.
2	Barreras regulatorias claves emergentes que a menudo requieren consideraciones específicas en el proyecto.
1	Procesos regulatorios incluyendo planeación, permisos, salud ocupacional y seguridad, estándares específicos como conexión eléctrica están sin definir. Cronometraje y costos de la conexión a la red y/o certificación del combustible es asumida en el modelaje, pero no conocido.

Tabla 11. Descripción del indicador “aceptación de las partes interesadas”

Nivel	Resumen de indicador
6	Proceso establecido entendido y esperado por todas las partes, utilizado para ganar la aceptación de las partes interesadas.
5	Proceso transparente que utiliza evidencia detectable para involucrar a las partes interesadas.
4	La evidencia y la experiencia están disponibles para informar a las partes interesadas y aumentar su aceptación.
3	Surgen problemas más amplios de apoyo de las partes interesadas. Las inquietudes de las partes interesadas se convierten en consideraciones clave en los cronogramas de desarrollo de proyectos y en los escenarios futuros de aceptación comercial.
2	El apoyo u oposición de las partes interesadas es caso por caso y las habilidades del desarrollador de proyectos son un factor crítico de éxito.
1	El apoyo u oposición de las partes interesadas es hipotético.

Tabla 12. Descripción del indicador “desempeño técnico”

Nivel	Resumen de indicador
6	Existen mercados secundarios para acceder a información de desempeño verificada externamente para los vencimientos de rutina. Revisión de desempeño y calificación crediticia de garantía transparente.
5	Múltiples conjuntos de datos detectables en proyectos comerciales que operan en una variedad de entornos operativos. Metodología de evaluación de desempeño y garantías definidas e impulsadas por los requisitos de financiamiento del proyecto. Pronósticos de recursos renovables altamente sofisticados basados en la experiencia de una amplia gama de fuentes.
4	Rendimiento, eficiencia frente a pronósticos publicados y comprensión de los factores clave. La metodología de evaluación del desempeño y las garantías se están convirtiendo en estándar con un proceso clave de asignación de riesgos que impulsa las expectativas de rendimiento de la deuda y el capital. Alta confianza en el recurso renovable esperado.
3	Pronósticos de rendimiento y rendimiento basados en extrapolación de sitios a escala reducida o aplicaciones similares. La calificación crediticia de las garantías de desempeño del proyecto se convierte en un factor clave en la bancabilidad del proyecto. Pronósticos de recursos renovables impulsados por la captura de datos específicos del sitio. Evidencia internacional clave en inversión.
2	Pronósticos de desempeño basados en modelos de simulación referenciados a evidencia de investigación y desarrollo o demostración a escala piloto. Pronósticos de recursos renovables impulsados por sitios específicos. Captura de datos. Evidencia internacional a menudo utilizada para respaldar el caso de inversión.
1	Pronósticos de desempeño basados en modelos de proponentes.

Tabla 13. Descripción del indicador “propuesta financiera-Costos”

Nivel	Resumen de indicador
6	El costo del sistema es lo suficientemente confiable y competitivo para impulsar la aceptación. Detalle de costos ampliamente publicado y aceptado para múltiples aplicaciones similares. Se establecieron e informaron índices de precios globales y / o locales.
5	Precio y propuesta de valor clara y atractiva con acceso abierto a las tendencias de costos y proyecciones basadas en datos reales del proyecto de una amplia gama de aplicaciones.
4	Elementos clave de costos de proyectos de dominio público. Se produce la mercantilización de los componentes principales. Los generadores de costos se entienden con hojas de ruta implementadas para hacer que los costos sean competitivos en el mercado.
3	Datos de costos basados en proyecciones de un solo sitio o sitio comparable o vía comparable. Se entiende que los factores claves de costos permiten que un mercado más amplio juzgue las perspectivas de la tecnología a largo plazo.
2	Costos claves basados en proyecciones con pocos datos reales disponibles para verificar.

- 1 Datos de costos (si están disponibles) basados en proyecciones y pronósticos con poca o ninguna información previa para corroborar.

Tabla 14. Descripción del indicador “propuesta financiera-ingresos”

Nivel	Resumen del indicador
6	Pronóstico de ingresos probado y aceptado por la industria financiera con evaluación comparativa transparente evidente. Ejemplos de diferentes formas de estrategias de participación en el mercado con financiamiento de deuda dispuesto a riesgo comercial atrasado.
5	Proyecciones de ingresos basadas en pronósticos probados y datos comerciales aceptados. Mayor PPA u opcionalidad de contrato para desarrolladores a gran escala, con inversores cómodos con el valor subyacente de activo propuesto.
4	Proyecciones de ingresos respaldadas por datos comerciales. Se entienden las brechas de precios y se implementan hojas de ruta. PPA a largo plazo o contratos o acuerdos de compra necesarios para garantizar la deuda.
3	Las proyecciones de ingresos se están probando en un contexto comercial, muy descontadas por inversores con requisitos para contratos o contratos de compra de energía a largo plazo o acuerdos de compra para aplicaciones a gran escala.
2	Proyecciones de ingresos altamente descontados por los inversores.
1	Datos de ingresos basados en proyecciones y pronósticos con poca o ninguna información previa para corroborar.

Tabla 15. Descripción del indicador “cadena de suministro de la industria y habilidades”

Nivel	Resumen de indicador
6	Múltiples alternativas con capacidad probada. Factor de selección clave de diferenciación de proyectos y servicios.
5	Especialización que ocurre a lo largo de la cadena de suministro con estándares definidos y desempeño del proveedor comparado externamente.
4	Habilidades clave demostradas con resultados replicables. Opciones de suministro limitadas probadas. Es hora de crear un impulsor clave de la eficiencia futura.
3	Proyecto por enfoque de proyecto de proveedores de ingeniería, adquisiciones, construcción y transporte con experiencia previa limitada. Disponibilidad limitada de componentes clave y habilidades de EPC y / o O&M. Es posible que los principales participantes de la cadena de suministro no respalden el desarrollo debido a conflictos con su modelo comercial actual.

- 2 La cadena de suministro no está disponible o no está dispuesta a participar en muchos componentes clave. El desarrollador de proyectos suele diseñar y adquirir múltiples elementos según sus propias especificaciones. Los costos de ingeniería, adquisición, construcción y transporte a menudo se basan en el tiempo y los materiales con un alto grado de carga de riesgo.
- 1 La cadena de suministro no se considera en su totalidad con elementos claves típicamente desde una fuente especializada, a menudo bajo la especificación del proponente de tecnología.

Tabla 16. Descripción del indicador “oportunidades de mercado”

Nivel	Resumen de indicador
6	El mercado impulsa el proceso de inversión con poco o ningún apoyo político concesional.
5	Los factores externos pueden ralentizar o acelerar la implementación en curso. Oportunidades de mercado claras y entendidas.
4	La demanda del mercado es el principal impulsor del caso de inversión con claridad sobre los segmentos del mercado y la cadena de suministro de la industria y / o los canales del mercado para cumplir. Tamaño del mercado ampliamente disponible y verificado por terceros. Se entienden las brechas de financiamiento entre el valor actual neto de los ingresos y el costo, siendo los clientes del segmento objetivo un actor clave en el proceso de decisión de inversión. Se requiere cierto apoyo político en condiciones favorables para impulsar la adopción.
3	Concéntrate en pasar de demostrar el desempeño comercial a optimizar las estructuras de costos e ingresos del proyecto y reducir el \$ / unidad de apoyo energético requerido en el segmento de mercado objetivo. Investigación de mercado detallada para comprender el tamaño, el interés y la preparación del mercado disponible. Ingresos posteriores al subsidio que generan suficiente flujo de efectivo para atender la deuda y las expectativas de capital.
2	La prueba comercial ha identificado el segmento de mercado objetivo para una prueba con el objetivo de demostrar a los futuros inversores que la tecnología puede operar de manera confiable y generar ingresos predecibles a partir de una base de costos que se comprende, incluso si aún no es rentable. Se han realizado estudios de mercado para permitir a los proponentes estimar el tamaño del mercado a nivel local e internacional. La prueba comercial no busca optimizar \$ / unidad de energía, pero busca equilibrar el costo absoluto de la prueba con la escala requerida para demostrar el desempeño comercial básico.
1	Etapa crítica para que una tecnología pase de una solución técnica prometedora a una oportunidad comercial prospectiva. Caso de inversión para ensayos comerciales respaldado por evidencia de planes de negocios revisados por pares con estimaciones de costos e ingresos verificables, tamaño del mercado y canal temprano al mercado identificado. Riesgos claves identificados tanto dentro como fuera de la esfera de control de los proponentes.

Tabla 17. Descripción del indicador “madurez de la compañía”

Nivel	Resumen de los indicadores
6	Los participantes líderes son mayoría, compañías públicas con hojas de balance largas. La capacidad de administración ya no se considera para la mayoría de los proyectos, como proponentes se tienen antecedentes fuertes
5	Los participantes líderes en el sector tienen hojas de balances significantes y una experiencia de administración amplia en cuanto a energía y entrega de tecnología y/o clases de proyecto.
4	Los participantes energéticos establecidos son ahora considerados parte del sector (Aunque al borde). Hojas de balance y la influencia de los proponentes tecnológicos crece. La capacidad de administración es aún significativa en cuanto al factor de selección de proyectos.
3	Los cuerpos de la industria están en lugar y fuertemente representan el sector para inversionistas externos. La industria es aún conducida por proponentes tecnológicos.
2	Los cuerpos de la industria están formados, pero son más débiles que las contrapartes contractuales.
1	Los participantes energéticos establecidos no son parte del sector aún. La capacidad de administración es dependiente de los proponentes individuales.

ANEXO B. Tablas de participación de las fuentes de energía (XM)

Tabla 18. Participación de las fuentes de energía por tipo en la matriz eléctrica de Colombia

				Participación (%)						
				Cantidad	Capacidad total [MW]	Mínimo [MW]	Máximo [MW]	Cantidad	Capacidad	MW / cantidad
Renovable	No despachada	Eólica		1	18,42	18,42	18,42	0,4%	0,1%	18,42
		Solar		3	27,76	8,06	9,90	1,4%	0,2%	9,25
		PCH	No convencional	79	214,74	0,30	10,00	35,9%	1,2%	2,72
			Convencional	37	666,47	10,20	19,90	16,8%	3,8%	18,01
			Autogenerador	2	15,50	6,50	9,00	0,9%	0,1%	7,75
	Despachada	Hidroeléctricas		29	11041	30,00	1250,00	13,2%	63,0%	380,72
No renovable	No despachada	Térmica	Autogenerador	12	82,24	1,00	19,90	5,4%	0,5%	6,85
			Normal	12	156,80	1,70	19,90	5,4%	0,9%	13,07
		Cogenerador		11	149,00	2,00	19,90	5,0%	0,8%	13,55
	Despachada	Térmica		34	5147,00	30,00	791,00	15,4%	29,4%	151,38
					220	17518,93				

Tabla 19. Participación en la matriz energética de fuentes de energía convencionales y no convencionales

		Capacidad	Cantidad	
Renovable	No convencional	1,6%	38,6%	Eólica - Solar - PCH NC
	Convencional	66,8%	30,0%	Hidroeléctricas - PCH C
No renovable		31,6%	31,4%	Térmica - Cogenerador
		100%	100%	

Tabla 20. Participación en la matriz energética de centrales hidroeléctricas

				Participación porcentual	
		Cantidad	Capacidad	Cantidad	Capacidad
PCH	No convencional	79	214,74	53,7%	1,8%
	Convencional	37	666,47	25,2%	5,6%
	Autogenerador	2	15,50	1,4%	0,1%
Hidroeléctricas		29	11041,00	19,7%	92,5%
Total		147	11937,71	100%	100%
		Participación hidroeléctricas en la matriz	68,1%		

ANEXO C. Comparación entre los métodos para establecer nivel de madurez

Tabla 21. Características de los métodos para establecer un nivel de madurez tecnológico

Método	TRL [128]	CRI [83]	TRIZ [84]	SAO [85]	Ciclo Hype [129], [130]	SRL [131]
Resultado	Cuantitativo	Cuantitativo	Cualitativo	Cualitativo	Cualitativo	Cuantitativo
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarizada • Requiere de revisión bibliográfica • Utilizado por: DOE, NASA, DHS, IRENA, MinCiencias Colombia 	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarizada • Utilizado por la Agencia Australiana de Energía Renovable (ARENA) 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de revisión bibliográfica 	<ul style="list-style-type: none"> • Se elabora mediante un análisis estadístico 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de revisión bibliográfica 	<ul style="list-style-type: none"> • Se elabora mediante un análisis matemático
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación por expertos 	<ul style="list-style-type: none"> • No evalúa madurez tecnológica sino comercial 	<ul style="list-style-type: none"> • No es ampliamente utilizado • Es un método subjetivo basado en comparación de curvas 	<ul style="list-style-type: none"> • No es ampliamente utilizado 	<ul style="list-style-type: none"> • No es ampliamente utilizado • Es implementado en análisis científico 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere conocer previamente el nivel de TRL y calcular el Nivel de Preparación de una Inversión (IRL, por sus siglas en inglés) • No estandarizada

ANEXO D. Método de la entropía de Shannon para el cálculo del peso de los criterios

Con base en dos estudios sobre el uso de MCDM y en específico con la aplicación del método de la entropía de Shannon para calcular el peso de los criterios [29], [132], se extrajo el algoritmo de cálculo de este y se presenta a continuación.

- 1) Considerando m alternativas y n criterios se crea la matriz de decisión A donde el elemento a_{ij} hace referencia al criterio j de la alternativa i de la siguiente forma.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

- 2) Con la matriz de decisión A y los elementos a_{ij} se crea la matriz de decisión normalizada \hat{A} utilizando la Ecuación 9.

$$\hat{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} & \cdots & \hat{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{a}_{m1} & \cdots & \hat{a}_{mn} \end{bmatrix}$$

- 3) Se calcula la entropía para cada criterio j según la Ecuación 10.

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m \hat{a}_{ij} \ln \hat{a}_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ecuación 10}$$

- 4) Por último, se calcula el peso de cada criterio con la Ecuación 11.

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^n (1 - e_j)}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ecuación 11}$$