



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y
TERRITORIO**

**PROGRAMA DE POSGRADO
INTERDISCIPLINAR EN ENERGIA Y
SUSTENTABILIDAD**

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA PROMOVER LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA EN UNIDADES GENERADORAS A CARBÓN, CON ABORDAJE DE
APOYO MULTICRITERIO**

JESSICA VALERIA LUGO GONZÁLEZ

Foz de Iguazú
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y
TERRITORIO**

**PROGRAMA DE POSGRADO INTERDISCIPLINAR
EN ENERGIA Y SUSTENTABILIDAD**

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA PROMOVER LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA EN UNIDADES GENERADORAS A CARBÓN, CON ABORDAJE DE
APOYO MULTICRITERIO**

JESSICA VALERIA LUGO GONZÁLEZ

Disertación de Maestría presentada al Programa de Posgrado Interdisciplinar en Energía y Sustentabilidad de la Universidad Federal de la Integración Latino-Americana, como requisito para la obtención del título de Máster en Energía y Sustentabilidad.

Área de concentración: Energía y Sustentabilidad

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.


Coorientador: Prof. Dr. Jorge Javier Giménez Ledesma.

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA PROMOVER LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN UNIDADES GENERADORAS A CARBÓN, CON ABORDAJE DE APOYO MULTICRITERIO


Disertación de Maestría presentada al Programa de Posgrado Interdisciplinar en Energía y Sustentabilidad de la Universidad Federal de la Integración Latino-Americana, como requisito para la obtención del título de Máster en Energía y Sustentabilidad.

APROBADA EL 21 DE JULIO DEL 2025


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR**
Data: 19/08/2025 17:22:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.
CEAR /UFPB

Documento assinado digitalmente
 **JORGE JAVIER GIMENEZ LEDESMA**
Data: 20/08/2025 14:26:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma
PPGIES/UNILA

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ MOREIRA COELHO JUNIOR**
Data: 20/08/2025 09:07:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Júnior
PPGER/UFPB

Documento assinado digitalmente
 **TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO**
Data: 20/08/2025 09:20:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Taynara Geysa Silva do Lago
PPGER/UFPB

Foz de Iguazú, 21 de julio del 2025.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

L951e

Lugo Gonzalez, Jessica Valeria.

Evaluación de alternativas para promover la transición energética en unidades generadoras a carbón, con abordaje de apoyo multicriterio / Jéssica Valéria Lugo Gonzalez. - Foz do Iguaçu, 2025.
148 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO, PÓS-GRADUAÇÃO INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma.

1. Transição energética. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Redução de gases do efeito estufa. 4. Energia limpa. 5. Política energética. I. Ando Junior, Oswaldo Hideo. II. Gimenez Ledesma, Jorge Javier. III. Título.

CDU 620.91

LUGO, Jessica. Evaluación de alternativas para promover la transición energética en unidades generadoras a carbón, con abordaje de apoyo multicriterio. 148 páginas. Disertación de maestría presentado al Programa de Posgraduación Interdisciplinar en Energía y Sustentabilidad –Universidad Federal de la Integración Latino-Americana, Foz de Iguazú, 2025.

RESUMEN

La sustentabilidad y la transición energética son componentes críticos en el contexto energético global actual, donde la necesidad de mitigar el impacto ambiental del sector eléctrico se ha convertido en una prioridad, un aspecto clave de esta transición es la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono. La adopción de tecnologías y fuentes energéticas más limpias reflejan el imperativo de avanzar hacia la descarbonización y de promover un sistema energético más sostenible, es fundamental reemplazar progresivamente los combustibles fósiles tradicionales y transformarlos hacia un modelo más sostenible y eficiente. La propuesta de este estudio busca minimizar la dependencia del carbón, contribuyendo así a la descarbonización del sector eléctrico. Este estudio se enfoca en las unidades generadoras a carbón, que actualmente son responsables de alrededor del 40% de las emisiones globales de dióxido de carbono. El objetivo principal es evaluar alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón, promoviendo la transición energética mediante la integración de fuentes de energía más sostenibles. Se lleva a cabo la evaluación en función de criterios definidos en términos ambiental, estructural, técnico, tecnológico, económico y social. Se empleó el método Proknow-C, para identificar artículos y patentes relevantes sobre alternativas de reconversión; el método AHP para evaluar cuantitativamente las alternativas y el método PROMETHEE para obtener un ranking de preferencias de dichas alternativas. En los resultados del primer método Proknow-C, se identificaron 26 artículos y 13 patentes que incluyen alternativas como; la hibridación de carbón y energía solar; la conversión total a gas natural e hibridación de carbón y gas natural; la conversión total a biomasa e hibridación de carbón y biomasa; la conversión hacia la cogeneración de electricidad e hidrógeno y la integración de sistemas con captura de carbono. La evaluación del segundo método AHP permitió obtener los pesos de las alternativas utilizando el *software Total Decision*, mediante la comparación multicriterio aplicada a dos grupos de datos, el primer grupo de datos fue recolectado de la revisión bibliográfica y el segundo grupo fue recolectado mediante encuestas realizadas a 14 expertos. Finalmente se aplicó el método PROMETHEE para combinar los pesos de las alternativas y clasificarlas obteniendo como mejor alternativa la conversión total a gas natural ($\phi=0,0368$), seguida de la alternativa correspondiente a la hibridación de carbón y gas natural ($\phi=0,0257$), y la hibridación de carbón y energía solar ($\phi=0,0124$), siendo estas alternativas las que destacan e inciden mayormente con los criterios. Opciones como el cierre ($\phi=-0,0578$) y la captura de carbono ($\phi=-0,0196$) resultaron menos favorables. El estudio aporta un marco decisorio para la transición energética justa y presenta contribuciones relacionadas a los ODS 7 y 13, subrayando la necesidad de políticas que impulsen la competitividad de estas alternativas, además proporciona una base sólida y una herramienta útil para la toma de decisiones estratégicas.

Palabras clave: AHP; descarbonización, multicriterio, unidades generadoras; Proknow-C; PROMETHEE; transición energética; sustentabilidad.

LUGO, Jessica. Avaliação de alternativas para promover a transição energética em unidades geradoras a carvão, com abordagem de apoio multicritério. 148 páginas. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa De Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia E Sustentabilidade – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2025.

RESUMO

A sustentabilidade e a transição energética são componentes críticos no contexto energético global atual, onde a necessidade de mitigar o impacto ambiental do setor elétrico tornou-se uma prioridade. Um aspecto chave dessa transição é a redução das emissões de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono. A adoção de tecnologias e fontes energéticas mais limpas reflete o imperativo de avançar rumo à descarbonização e promover um sistema energético mais sustentável. É fundamental substituir progressivamente os combustíveis fósseis tradicionais e transformá-los em um modelo mais sustentável e eficiente. Esta proposta de estudo busca minimizar a dependência do carvão, contribuindo assim para a descarbonização do setor elétrico. O foco recai sobre as unidades geradoras a carvão, atualmente responsáveis por cerca de 40% das emissões globais de dióxido de carbono. O principal objetivo é avaliar alternativas para a reconversão dessas unidades, promovendo a transição energética mediante a integração de fontes mais sustentáveis. A avaliação é realizada com base em critérios definidos em termos ambientais, estruturais, técnicos, tecnológicos, econômicos e sociais. O método Proknow-C foi utilizado para identificar artigos e patentes relevantes sobre alternativas de conversão; o método AHP para avaliar quantitativamente alternativas e o método PROMETHEE para obter uma classificação de preferências para essas alternativas. Nos resultados do primeiro método Proknow-C, foram identificados 26 artigos e 13 patentes que incluem alternativas como; a hibridização do carvão e da energia solar; conversão total para gás natural e hibridização de carvão e gás natural; conversão total em biomassa e hibridização de carvão e biomassa; a conversão para cogeração de eletricidade e hidrogênio e a integração de sistemas com captura de carbono. A avaliação do segundo método AHP permitiu obter os pesos das alternativas utilizando o *software Total Decision*, através da comparação multicritério aplicada a dois grupos de dados, o primeiro grupo de dados foi coletado da revisão bibliográfica e o segundo grupo foi coletado por meio de pesquisas realizadas com 14 especialistas. Por fim, aplicou-se o método PROMETHEE para combinar os pesos das alternativas e classificá-las, obtendo-se como melhor alternativa a conversão total para gás natural ($\phi=0,0368$), seguida da alternativa correspondente à hibridização carvão e gás natural ($\phi=0,0257$), e da hibridização carvão e energia solar ($\phi=0,0124$), sendo estas alternativas as que se destacam e têm maior impacto nos critérios. Opções como fechamento ($\phi=-0,0578$) e captura de carbono ($\phi=-0,0196$) foram menos favoráveis. O estudo fornece uma estrutura de tomada de decisão para uma transição energética justa e apresenta contribuições relacionadas aos ODS 7 e 13, destacando a necessidade de políticas que impulsionem a competitividade dessas alternativas. Ele também fornece uma base sólida e uma ferramenta útil para a tomada de decisões estratégicas.

Palavras-chave: AHP; descarbonização, multicritério, unidades geradoras; Proknow-C; PROMETHEE; transição energética; sustentabilidade;

LUGO, Jessica. Assessment of alternatives to promote the energy transition in coal-fired generating units, with a multi-criteria support approach. 148 páginas. Disertación de maestría presentado al Programa de Posgraduación Interdisciplinar en Energía y Sustentabilidad –Universidad Federal de la Integración Latino-Americana, Foz de Iguazú, 2025.

ABSTRACT

Sustainability and energy transition are critical components in the current global energy context, where the need to mitigate the environmental impact of the electricity sector has become a priority. A fundamental aspect of this transition is the reduction of greenhouse gas emissions, primarily carbon dioxide. The adoption of cleaner technologies and energy sources reflects the need to move toward decarbonization and promote a more sustainable energy system. It is essential to progressively replace traditional fossil fuels and transform them toward a more sustainable and efficient model. The purpose of this study is to minimize dependence on coal, thus contributing to the decarbonization of the electricity sector. This study focuses on coal-fired generating units, which are currently responsible for approximately 40% of global carbon dioxide emissions. The main objective is to evaluate alternatives for the conversion of coal-fired generating units, promoting the energy transition through the integration of more sustainable energy sources. The evaluation is carried out based on criteria defined in environmental, structural, technical, technological, economic, and social terms. The Proknow-C method was used to identify relevant articles and patents on conversion alternatives; the AHP method was used to quantitatively evaluate the alternatives; and the PROMETHEE method was used to obtain a preference ranking for these alternatives. The results of the first Proknow-C method identified 26 articles and 13 patents that include alternatives such as: coal and solar hybridization; total conversion to natural gas and coal-natural gas hybridization; total conversion to biomass and coal-biomass hybridization; conversion to cogeneration of electricity and hydrogen; and the integration of systems with carbon capture. The evaluation of the second AHP method allowed obtaining the weights of the alternatives using the Total Decision software, through the multicriteria comparison applied to two groups of data, the first group of data was collected from the bibliographic review and the second group was collected through surveys carried out on 14 experts. Finally, the PROMETHEE method was applied to combine the weights of the alternatives and classify them, obtaining as the best alternative the total conversion to natural gas ($\phi=0.0368$), followed by the alternative corresponding to the hybridization of coal and natural gas ($\phi=0.0257$), and the hybridization of coal and solar energy ($\phi=0.0124$), these alternatives being the ones that stand out and most impact the criteria. Options such as closure ($\phi=-0.0578$) and carbon capture ($\phi=-0.0196$) were less favorable. The study provides a decision-making framework for a just energy transition and presents contributions related to SDGs 7 and 13, highlighting the need for policies that boost the competitiveness of these alternatives. It also provides a solid foundation and a useful tool for strategic decision-making.

Keywords: AHP; decarbonization, multicriteria, generating units; Proknow-C; PROMETHEE; energy transition; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Enfoque, métodos y herramientas	30
Figura 2. Proceso metodológico para el cumplimiento de los objetivos	31
Figura 3. Interfaz del software Total Decision	33
Figura 4. Interfaz del software Visual PROMETHEE.....	34
Figura 5. Procesos del método Proknow-C.....	36
Figura 6. Número de citas de los Artículos Científicos seleccionados	41
Figura 7. Año de publicación de los Artículos Científicos seleccionados.....	42
Figura 8. Resultados por países de las patentes seleccionadas.	51
Figura 9. Resultados por año de publicación de las patentes seleccionadas.....	52
Figura 10. Resultados por reconocimiento científico de las patentes seleccionadas.....	52
Figura 11. Resultados por clasificación internacional de las patentes seleccionadas.....	53
Figura 12. Términos más enunciados.	59
Figura 13. Distribución de patentes y artículos por cada categoría.	60
Figura 14. Alternativas para la reconversión de unidades generadoras a carbón.	61
Figura 15. Procesos del método AHP	66
Figura 16. Estructura jerárquica por niveles.....	68
Figura 17. Profesiones de los encuestados.....	70
Figura 18. Área de actuación de los encuestados.	71
Figura 19. Procesos del método PROMETHEE	73
Figura 20. Definición de la función de preferencia y cálculo de flujos	75
Figura 21. Resultados del método Proknow-C.	78
Figura 22. Matriz de comparación de criterios.	80
Figura 23. Resultados de criterios por el método AHP.	81
Figura 24. Resultados de las alternativas según la revisión bibliográfica por el método AHP	82
Figura 25. Resultados de las alternativas según la encuesta a expertos por el método AHP	84
Figura 26. Resultado gráfico de las Alternativas por el método PROMETHEE.....	86
Figura 27. Resultado gráfico de la Alternativa 1 por el método PROMETHEE.....	87
Figura 28. Resultado gráfico de la Alternativa 2 por el método PROMETHEE.....	88
Figura 29. Resultado gráfico de la Alternativa 3 por el método PROMETHEE.....	89
Figura 30. Resultado gráfico de la Alternativa 4 por el método PROMETHEE.....	89
Figura 31. Resultado gráfico de la Alternativa 5 por el método PROMETHEE.....	90
Figura 32. Resultado gráfico de la Alternativa 6 por el método PROMETHEE.....	91

Figura 33. Resultado gráfico de la Alternativa 7 por el método PROMETHEE.....	91
Figura 34. Resultado gráfico de la Alternativa 8 por el método PROMETHEE.....	92
Figura 35. Análisis de sensibilidad en el primer escenario.....	95
Figura 36. Análisis de sensibilidad en el segundo escenario	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las etapas de investigación.....	32
Tabla 2. Ejes de investigación.....	37
Tabla 3. Palabras Clave (PC).....	37
Tabla 4. Artículos Científicos seleccionados parte uno.....	39
Tabla 5. Artículos Científicos seleccionados parte dos.....	40
Tabla 6. Patentes seleccionadas.....	50
Tabla 7. Descripción de la clasificación de las patentes seleccionadas.....	54
Tabla 8. Categorización de patentes y artículos científicos.....	59
Tabla 9. Escala de importancia definida por Saaty.....	64
Tabla 10. Resumen del método AHP.....	64
Tabla 11. Alternativas de reconversión para las unidades generadoras a carbón.....	66
Tabla 12. Criterios y definición de subcriterios.....	67
Tabla 13. Matriz de comparación.....	68
Tabla 14. Matriz de comparación según encuesta a expertos.....	71
Tabla 15. Resumen del método PROMETHEE.....	72
Tabla 16. Definición del Nivel I, II, III y IV.....	79
Tabla 17. Comparación de las alternativas según la revisión bibliográfica.....	81
Tabla 18. Comparación de las alternativas según la encuesta a expertos.....	83
Tabla 19. Peso total de las alternativas de reconversión.....	85
Tabla 20. Flujos positivos y negativos de cada alternativa.....	85
Tabla 21. Ranking de las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón.....	86
Tabla 22. Síntesis de la revisión sistemática del criterio ambiental.....	109
Tabla 23. Síntesis de la revisión sistemática del criterio estructural.....	110
Tabla 24. Síntesis de la revisión sistemática del criterio técnico.....	111
Tabla 25. Síntesis de la revisión sistemática de criterios social, tecnológico y económico.....	112
Tabla 26. Escala de puntuación (A).....	113
Tabla 27. Escala de puntuación (B).....	113
Tabla 28. Escala de Puntuación (C).....	113
Tabla 29. Escala de puntuación (D).....	113

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
ANDE	Administración Nacional de Electricidad
CAC	Captura y Almacenamiento de Carbono
CAE	Comisión de Asuntos Económicos
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
ECSIM	Centro de Estudios en Economía Sistémica
EE. UU	Estados Unidos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IC	Índice de Consistencia
IGCC	<i>Integrated Gasification Combined Cycle</i>
I+D	Investigación y Desarrollo
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
MBRE	Mercado Brasileño de Reducción de Emisiones
MME	Ministerio de Minas y Energía
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEX	<i>Operating Expenses</i>
PF	<i>Pareto front</i>
PC	Palabras Clave
PM	<i>Particulate Matter</i>
Proknow-C	<i>Knowledge Development Process – Constructivist</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
RC	Razón de Consistencia
UE	Unión Europea
WIPO	<i>World Intellectual Property Organization</i>

LISTA DE SIMBOLOS Y UNIDADES DE MEDIDA

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ /kWh	Dióxido de carbono por kilovatio-hora
GW	Gigavatios
g/kWh	Gramos por kilovatio-hora
kcal/kg	Kilocalorías por kilogramos
kg	Kilogramos
kg/GJ	Kilogramos por gigajulio
kW	Kilovatios
kWh	Kilovatios-hora
kWh/m ²	Kilovatios-hora por metro cuadrado
MJ/kg	Megajulios por kilogramo
MW	Megavatios
MWh	Megavatios-hora
NO _x	Óxidos de nitrógeno
sCO ₂	Dióxido de carbono supercrítico
SO ₂	Dióxido de azufre
tCO ₂ e	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
\$/kW	Dólares por kilovatio
\$/kWh	Dólares por kilovatio-hora
€/kWh	Euros por kilovatio-hora
€/m ²	Euros por metro cuadrado
€/tonelada	Euros por tonelada

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. PROBLEMA Y OBJETIVOS.....	17
1.2. JUSTIFICATIVA Y RELEVANCIA	18
1.3. ORIGINALIDAD Y CONTRIBUCIÓN	20
1.4. ESTRUCTURA DE LA DISERTACIÓN	21
2. MARCO CONCEPTUAL	24
2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	24
2.2. TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES DE RECONVERSIÓN	26
2.3. ESTUDIOS QUE ABORDARON LA RECONVERSIÓN.....	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. DESARROLLO SECUENCIAL DE MÉTODOS.....	30
3.2. HERRAMIENTA ESPECIALIZADA TOTAL DECISION.....	32
3.3. HERRAMIENTA ESPECIALIZADA VISUAL PROMETHEE.....	33
4. MÉTODO PROKNOW-C: REVISIÓN SISTEMÁTICA.....	35
4.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA CIENTÍFICA	37
4.2. REVISIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL	48
4.3. ANÁLISIS DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA.....	58
5. MÉTODO AHP: EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	63
5.1. ALTERNATIVAS, CRITERIOS Y ESTRUCTURA JERÁRQUICA.....	66
5.2. MATRIZ DE COMPARACIÓN, NORMALIZACIÓN Y CONSISTENCIA	68
5.3. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS SEGÚN LA REVISIÓN SISTEMÁTICA.....	69
5.4. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS SEGÚN ENCUESTA A EXPERTOS	69
6. MÉTODO PROMETHEE: RANKING DE PREFERENCIAS	72
6.1. PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	74
6.2. FUNCIÓN DE PREFERENCIA Y CALCULO DE FLUJOS	75
6.3. RANKING DE PREFERENCIA DE LAS ALTERNATIVAS.....	76
7. RESULTADOS.....	77
7.1. RESULTADOS DEL MÉTODO PROKNOW-C.....	77
7.2. RESULTADOS DEL MÉTODO AHP	78
7.3. RESULTADOS DEL MÉTODO PROMETHEE.....	84
8. DISCUSIÓN.....	94
8.1. VALIDACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE RECONVERSIÓN	94
8.2. IMPLICACIONES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS	97
8.3. LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	99
9. CONCLUSIÓN.....	101

REFERENCIAS	104
APENDICE A – Síntesis de la revisión del criterio ambiental	109
APENDICE B – Síntesis de la revisión del criterio estructural	110
APENDICE C – Síntesis de la revisión del criterio técnico	111
APENDICE D – Síntesis de la revisión del criterio social, tecnológico y económico	112
APENDICE E – Escalas de puntuación de las encuestas	113
APENDICE F – Encuestas realizada a expertos	114
ANEXO A – Información extraído de (WANG <i>et al.</i>, 2017)	142
ANEXO B – Información extraído de (MAC, BROUWER, SAMUEL-SEN, 2018)	143
ANEXO C – Información extraído de (SAFARI <i>et al.</i>, 2019)	144
ANEXO D – Información extraído de (XU <i>et al.</i>, 2020)	146
ANEXO E – Información extraído de (SZIMA <i>et al.</i>, 2021)	147
ANEXO F – Información extraído de (MIEDEMA <i>et al.</i>, 2017)	148

1. INTRODUCCIÓN

Las unidades generadoras son diseñadas para convertir diversas fuentes de energía primaria en electricidad, dependiendo de los objetivos energéticos en términos de costo, eficiencia y sostenibilidad, pueden utilizar recursos renovables como la energía hidráulica, la eólica, la solar o combustibles fósiles como el carbón. De acuerdo con lo publicado por la University of Calgary, las unidades generadoras a carbón o centrales termoeléctrica a carbón, son infraestructuras diseñadas para generar energía eléctrica mediante la combustión del carbón. Las mismas han sido responsables de suministrar el 40% de la energía global (2023).

La *International Energy Agency* (IEA, 2021) afirma que las unidades generadoras a carbón son responsables de alrededor del 40% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂). Por lo tanto, la reconversión de estas unidades para integrar fuentes de energía más limpias está cobrando gran relevancia como parte de la transición energética, ya que permite reducir las emisiones de carbono y promover alternativas más sostenibles. Según Bnamericas (2022), existen 3.128 unidades generadoras térmicas operando en Brasil, también se menciona que 10 corresponden a generadoras térmicas a carbón (ROGIERI *et al.*, 2023).

METRÓN *Energy* afirma que el 64 % de la capacidad eléctrica instalada en el Brasil corresponde a las hidroeléctricas, siendo esta la principal fuente de energía eléctrica, seguidamente el 22% corresponde a las centrales termoeléctricas (energía térmica obtenida con biomasa, gas natural, carbón mineral o combustible nuclear), el 14% restante es obtenida de las plantas eólicas y la energía importada de otros países (2023).

Según afirma el Centro de Estudios en Economía Sistémica (ECSIM, 2012), y teniendo en cuenta lo anterior es posible dimensionar la potencia instalada y operación, en referencia a los megavatios (MW) producidos. Las principales proveedoras de energía son las monumentales centrales hidroeléctricas con una producción de 79.752,5 MW equivalente al 65,9 %. A continuación, se encuentran las centrales termoeléctricas; donde aquellas que producen energía a partir de combustibles fósiles con 21.408 MW representan el 17,7 %, las que producen energía a partir de biomasa con 9.860 MW de producción corresponden al 8,1 % y las centrales termoeléctricas que combustionan otras materias inflamables producen 1.641 MW equivalentes a 1,4%. Seguidamente lo producido por pequeños sistemas hidráulicos (1 MW a 30 MW) y sistemas minihidráulicos (menores a 1 MW) generan 4.542 MW representando el 3,8 %; lo producido por dos centrales nucleares con 2.007 MW corresponden al 1,7%; y una usina eólica respectivamente a 1.886 MW equivale al 1,6%; finalmente encerrando la producción las centrales de energía fotovoltaica con 7,5 MW representa el 0,0%.

Bajo esa perspectiva, según el Ministerio de Minas y Energía de Brasil (MME, 2017), la creciente búsqueda e inclusión de fuentes de energía renovables alternativas para diversificar la matriz energética, está presente tanto en el escenario mundial como en el nacional, ya que además de satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica, esta diversificación también contribuye al proceso de descarbonización del sector eléctrico y promueve la sustentabilidad energética.

Referente a los sistemas de energías alternativas, la energía solar fotovoltaica muestra el mayor crecimiento actualmente en Brasil. En 2022, la generación de energía solar fotovoltaica centralizada, es decir, solo a partir de plantas solares, correspondió al 8,1% de la matriz eléctrica brasileña, convirtiéndose en la tercera mayor fuente de energía renovable de Brasil (ABSOLAR, 2022).

En contraste, tal como se explica en Inodú (2018), en Estados Unidos, varias unidades generadoras a carbón han cerrado o se han transformado ya que han perdido la competitividad en el mercado eléctrico frente a unidades de generación a gas natural a causa de la baja en costos de este combustible. Así mismo, otras centrales han requerido cerrar tras precisar elevadas inversiones para conseguir cumplir las actuales regulaciones de emisiones atmosféricas.

El compromiso por erradicar la generación a carbón a través de múltiples políticas e instrumentos se ha destacado en varios países europeos. Por lo que, estas centrales inician su evolución hacia una modalidad de operación en el cual su importancia radica en complementar a las energías renovables variables mediante el aprovisionamiento de reservas, y la alternativa de transformar su calidad de producción de forma rápida, competitiva y sostenible en el tiempo, lo que podría significar “[...]un próximo paso a la descarbonización del sistema eléctrico, sin mutar significativamente los sistemas termoelectricos existentes si no reconvirtiéndolos” (INODÚ, 2018, p.20).

Bajo ese contexto, y como se propone en Inodú (2018), las condiciones examinadas en la búsqueda de la reconversión de las unidades generadoras a carbón presentadas en este estudio se evalúan teniendo en cuenta los siguientes criterios: (1) ambiental, con especial énfasis en la reducción de las emisiones de gases de dióxido de carbono (CO₂); (2) estructural, en cuanto al nivel de reutilización de la infraestructura existente; (3) técnico, en términos de rendimiento y flexibilidad de las soluciones; (4) tecnológico, considerando la madurez tecnológica; (5) económico, enfocado al costo de la inversión; y (6) social, mediante una evaluación del impacto en el empleo.

La motivación de este estudio surge de la creciente necesidad de transformar los sistemas de generación eléctrica basados en carbón hacia configuraciones más sostenibles y eficientes, en consonancia con los objetivos climáticos internacionales. A medida que los países aceleran sus

agendas de descarbonización, muchas de las unidades generadoras a carbón aún desempeñan un papel estratégico en el suministro de energía, deben ser adaptadas en lugar de desmanteladas abruptamente, especialmente en regiones donde las limitaciones económicas, técnicas y de infraestructura dificultan la implementación inmediata de sistemas completamente renovables. En este contexto, se vuelve imprescindible contar con metodologías estructuradas capaces de evaluar de manera integral y comparativa las alternativas de reconversión.

A pesar del creciente número de estudios sobre la reconversión de centrales a carbón, persiste una marcada ausencia de evaluaciones integradas que combinen de manera sistemática el mapeo bibliográfico, la evaluación jerárquica y los métodos de ordenamiento por clasificación en un marco analítico unificado. De acuerdo con la revisión y el estudio de la literatura científica y tecnológica, no se han planteado propuestas similares a las características de este estudio, que apliquen de forma conjunta el método *Knowledge Development Process – Constructivist* (Proknow-C), el método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) y el método *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) para analizar alternativas tecnológicas de reconversión de infraestructura térmica. Esta brecha se acentúa en el contexto latinoamericano, donde la transición energética debe conciliar los objetivos de descarbonización con restricciones estructurales y socioeconómicas regionales.

En este sentido, el presente estudio introduce un enfoque metodológico innovador que integra estas tres herramientas de apoyo a la decisión, proporcionando un marco replicable para la identificación, evaluación y priorización de alternativas de reconversión. La contribución de este trabajo radica no solo en la innovación metodológica, sino también en su relevancia contextual, ofreciendo directrices estratégicas para la planificación energética ajustadas a los sistemas térmicos basados en carbón.

1.1. PROBLEMA Y OBJETIVOS

Por lo expuesto anteriormente, el presente trabajo evaluación de alternativas para promover la transición energética en unidades generadoras a carbón, con abordaje de apoyo multicriterio, aborda la siguiente interrogante de investigación: ¿Cuáles son las alternativas de mayor factibilidad para la reconversión de las unidades generadoras a carbón que promuevan la transición energética mediante la integración de fuentes de energía más sostenibles?

El objetivo es evaluar alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón, promoviendo la transición energética mediante la integración de fuentes de energía más sostenibles. A partir del objetivo se estableció los siguientes objetivos específicos:

- Presentar las bases teóricas con los principales estudios de la literatura científica y de propiedad intelectual, obteniendo las posibles alternativas para reconversión de las unidades generadoras a carbón, mediante el método Proknow-C.
- Evaluar cuantitativamente las alternativas obtenidas que promuevan la transición energética con integración de fuentes de energía más sostenibles, mediante criterios establecidos, empleando el método AHP.
- Obtener un ranking de los resultados obtenidos, con el fin de proponer las alternativas de mayor factibilidad para la reconversión de las unidades generadoras a carbón y/o el aprovechamiento de la estructura existentes, mediante la aplicación del método PROMETHEE.

1.2. JUSTIFICATIVA Y RELEVANCIA

La sustentabilidad y la transición energética son componentes críticos en el contexto energético global actual, donde la urgente necesidad de mitigar el impacto ambiental del sector eléctrico se ha convertido en una prioridad, un aspecto clave de esta transición es la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero principalmente el CO₂. La adopción de tecnologías y fuentes energéticas más limpias reflejan el imperativo de avanzar hacia la descarbonización y de promover un sistema energético más sostenible, es fundamental reemplazar progresivamente los combustibles fósiles tradicionales y transformarlos hacia un modelo más sostenible y eficiente

En el escenario internacional, Irena (2020) afirman la existencia de un aumento creciente del consumo y la demanda de la energía eléctrica, por lo que es imprescindible ampliar las fuentes renovables de energía. En ese sentido, si bien se prevé una tendencia de aumento en la generación renovable, también se espera que la demanda aumente, y se necesite un mayor uso de las centrales a carbón existentes.

Según lo expuesto en Inodú, (2018, p.18), el mercado internacional de la energía eléctrica ha emprendido la aplicación de distintas políticas para disminuir las emisiones de CO₂, entre las cuales es factible mencionar las siguientes medidas: (i) prohibir la generación a carbón; (ii) limitar la emisión de CO₂ mediante regulación de emisiones por unidad de energía producida; (iii) otorgar permisos o licencias para emisión de CO₂; (iv) impuestos por liberación de gases de efecto invernadero; (v) promover pactos colaborativos entre entidades públicas y privadas, o una mezcla de ambos.

La Unión Europea (UE) aprobó un plan voluntario inicial para certificar de forma efectiva la captura de carbono de buena calidad. Este plan es importante para que la UE logre su meta de ser el primer continente climáticamente neutro del mundo antes de 2050 (Comisión Europea, 2022). Retomando el contexto brasileño, según información de la Agencia Senado, el proyecto de ley que

regula el llamado mercado de carbono, el Mercado Brasileño de Reducción de Emisiones (MBRE), fue adoptado por la Comisión de Asuntos Económicos (CAE) del Senado brasileño (AGENCIA SENADO, 2022). Este proyecto de ley, que define el Sistema Brasileño para la gestión de emisiones de CO₂, establece el 'Crédito de Carbono' como un título de un activo intangible, negociable y fungible que representa una reducción o remoción de una tonelada de carbono equivalente (1 tCO₂e) (BRASIL, 2022).

Lo expuesto anteriormente supone que una política de impuestos al dióxido de carbono, convenientemente adaptada al objetivo de aminorar las emisiones de dióxido de carbono, conlleva a que varias unidades generadoras a carbón dejen de operar por circunstancias del mercado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que seguirá siendo necesario cierto grado de generación a carbón dentro del sistema eléctrico.

Por lo tanto, es preciso que las unidades generadoras a carbón adapten su operación de manera flexible, favoreciendo la transición hacia un sistema con menores emisiones de CO₂. En este contexto, surge la necesidad de comprender, desarrollar y evaluar soluciones que impulsen una mayor descarbonización del sistema eléctrico, sin la necesidad de una reestructuración completa de los sistemas térmicos existentes, sino adaptándolos a las características del escenario económico, climático y tecnológico actual. Por lo que, se aborda el presente estudio; evaluación de alternativas para promover la transición energética en unidades generadoras, con abordaje de apoyo multicriterio.

Esta transición enfrenta el desafío de transformar instalaciones sin comprometer la seguridad energética ni generar impactos sociales adversos, por lo que el análisis multicriterio emerge como una herramienta que permite evaluar de manera integral las múltiples dimensiones involucradas en esta reconversión. Como señala Calabrese *et al.* (2019), estos enfoques permiten gestionar efectivamente la multidimensionalidad inherente a los problemas energéticos, transformando datos complejos en evaluaciones estructuradas. Según Ridha *et al.* (2023) el uso de métodos de toma de decisiones multicriterio (*Multi-Criteria Decision Making* - MCDM) es esencial para clasificar y seleccionar alternativas mediante una configuración eficiente minimizando sesgos en la toma de decisiones complejas. Sin embargo su aplicación en estudios de reconversión energética ha sido limitada y carente de estandarización.

Este estudio busca responder a una brecha identificada: la falta de estudios sistemáticos que prioricen alternativas de reconversión energética sostenibles al ofrecer un enfoque innovador que combina rigurosidad analítica con aplicabilidad al evaluar las alternativas de reconversión a través de múltiples criterios interrelacionados, no solo identifica las opciones técnicamente viables, sino también aquellas que mejor equilibran los objetivos ambientales con las realidades económicas y

sociales. Superando los análisis unidimensionales predominantes, como advierte Vanatta (2022) los estudios previos ignoran el impacto social de la transición, centrándose únicamente en aspectos técnicos y económicos. Mientras que existen investigaciones aisladas sobre tecnologías específicas (biomasa, hibridación solar, captura de carbono), se carece de evaluaciones comparativas que ponderen simultáneamente la eficiencia técnica, el impacto ambiental y la equidad social, de estas soluciones.

El estudio ofrece un marco de evaluación flexible que puede adaptarse a diferentes contextos nacionales y regionales, ofreciendo a los tomadores de decisiones una herramienta estructurada. Más allá de su contribución académica, esta investigación tiene un potencial de impacto práctico, los hallazgos pueden informar el diseño de políticas públicas más efectivas, la planificación energética, guiar las inversiones hacia alternativas sostenibles, y promover la descarbonización del sector eléctrico sin sacrificar la equidad social ni la estabilidad energética. En un mundo que enfrenta la urgencia climática junto con demandas crecientes de energía, este tipo de aproximaciones integrales resultan absolutamente necesarias, además garantiza la consideración de las particularidades de cada contexto energético, al tiempo que se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015).

1.3. ORIGINALIDAD Y CONTRIBUCIÓN

De acuerdo con la revisión y el estudio de la literatura científica y tecnológica, no se han planteado propuestas similares a las características de este estudio, el cual aborda un enfoque multicriterio empleando conjuntamente varias técnicas metodológicas de evaluación para analizar las actuales unidades generadoras a carbón y obtener un ranking con el objetivo de proponer alternativas que favorezcan la transición a un sistema con menos emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente, el CO₂.

En la amplia gama de alternativas tecnológicas exploradas en la literatura, persiste una importante brecha de investigación: la ausencia de evaluaciones integradas y sistemáticas que evalúen y comparen estas soluciones utilizando marcos estandarizados de criterios múltiples. Este estudio presenta relevancia en el campo de la planificación energética sostenible y puede resumirse de la siguiente manera: i) Identificación sistemática de alternativas, ii) Integración de herramientas avanzadas de toma de decisiones multicriterio; iii) Apoyo a la toma de decisiones basado en la evidencia para responsables políticos e inversores. El marco propuesto por el estudio proporciona un modelo flexible y replicable que puede fundamentar el diseño de políticas públicas y estrategias de inversión en diferentes contextos nacionales.

Este estudio presenta contribuciones relacionadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que constituyen un llamado global a la acción para erradicar la pobreza, proteger el planeta y mejorar la calidad de vida y las oportunidades para todas las personas en el mundo. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que establece un plan para alcanzar estas metas en un plazo de 15 años (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS, 2015).

Específicamente, esta investigación está relacionada con el Objetivo 7: garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Este objetivo reconoce que la población mundial está en crecimiento y, con ella, también aumenta la demanda de energía, lo que hace imprescindible que esta llegue a toda la población global. Además, la energía debe ser sostenible para permitir un desarrollo que no comprometa a las generaciones futuras. Es crucial fomentar una transición energética que sea no solo sostenible, sino también justa, para alinear el crecimiento de la demanda energética con los objetivos climáticos globales. Una transición energética sostenible y justa ofrece la oportunidad de establecer las bases para una nueva economía sostenible y competitiva, creando nuevos empleos y aumentando la inversión, lo que a su vez impulsa la innovación (PACTO MUNDIAL, 2023).

Las contribuciones de este estudio relacionadas con los ODS anteriormente mencionados se resume de la siguiente manera: i) Contribución técnica: presentación de alternativas tecnológicas aplicables a la reconversión de las unidades generadoras que utilizan carbón como combustible primario y/o la reutilización de la infraestructura existente en dichas unidades de un modo significativo; ii) Contribución ambiental: propuestas que contribuyan a la descarbonización favoreciendo la transición a un sistema con menos emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente, dióxido de carbono; iii) Contribución económica: alternativas que permitan a las centrales termoeléctricas a seguir operando sin perder competitividad en el mercado eléctrico; iv) Contribución científica: con el estudio de alternativas con potencial de intercambio de experiencias en la región latinoamericana para el fortalecimiento de estudios específicos en el área de energías y sustentabilidad; y la mejora de la vinculación entre la investigación científica de manera tal que, exista una transferencia de investigación y resultados científicos aplicables a las unidades existentes.

1.4. ESTRUCTURA DE LA DISERTACIÓN

La presente disertación está estructurada en nueve capítulos principales que se desarrollan de manera lógica y secuencial, facilitando la comprensión del abordaje metodológico y la evolución del análisis realizado. A continuación, se describe brevemente el contenido de cada capítulo,

proporcionando una guía clara sobre la organización del estudio:

En el actual capítulo – Introducción, se contextualiza la problemática abordada, se establecen los objetivos de la investigación, se presenta la justificación, la relevancia del estudio, su originalidad y contribución y se describe la estructura general del documento, como también las consideraciones finales del capítulo.

En el segundo capítulo – Marco conceptual, se presentan los conceptos teóricos del estudio, incluyendo conceptos relacionados con la transición energética, la descarbonización, las tecnologías de generación eléctrica y los criterios que guían la evaluación de alternativas de reconversión. Se compone de cuatro secciones: los conceptos clave, las tecnologías y combustibles de reconversión, estudios que abordaron la reconversión y consideraciones finales.

En el tercer capítulo – Materiales y métodos, se describe el enfoque metodológico adoptado, los métodos utilizados, las herramientas aplicadas y la secuencia de etapas desarrolladas para alcanzar los objetivos de la investigación. Incluye además la descripción de los *softwares Total Decision y Visual PROMETHEE*, así como las consideraciones finales del capítulo.

En el cuarto capítulo – Método Proknow-C: Revisión sistemática, se detalla la aplicación del método Proknow-C para la identificación y análisis de artículos científicos y patentes relevantes, permitiendo establecer un portafolio bibliográfico sólido y actualizado. Se organiza en cuatro secciones: revisión de la literatura científica, revisión de la propiedad intelectual, análisis de la revisión sistemática y consideraciones finales.

En el quinto capítulo – Método AHP: Evaluación multicriterio, se detalla la aplicación del método AHP, se expone la estructura jerárquica utilizada, los criterios y subcriterios definidos, el análisis de decisión multicriterio con el método, aplicando datos bibliográficos y de expertos. Se desarrolla a través de cinco secciones que abordan desde las alternativas, criterios y estructura jerárquica, hasta la comparación de alternativas según la revisión sistemática y la encuesta a expertos, finalizando con las consideraciones finales del capítulo.

En el sexto capítulo – Método PROMETHEE: Ranking de preferencias, se presenta la aplicación del método PROMETHEE para clasificar las alternativas de reconversión en función de los pesos obtenidos, generando un ranking de preferencia que guía la toma de decisiones. Este capítulo incluye la ponderación de las alternativas, la definición de la función de preferencia, el cálculo de flujos y el ranking final.

En el séptimo capítulo – Resultados, se sintetizan los hallazgos obtenidos en las etapas anteriores, integrando los resultados de los métodos aplicados y destacando las alternativas de mayor factibilidad para la reconversión de unidades generadoras a carbón. Se subdivide en tres secciones

correspondientes a los métodos Proknow-C, AHP y PROMETHEE, además de una sección de consideraciones finales.

En el octavo capítulo – Discusión, se analizan e interpretan los resultados del estudio, se plantean implicaciones para las políticas públicas, se identifican limitaciones del estudio y se sugieren futuras líneas de investigación, además incluye una sección de las consideraciones finales.

En la Conclusión, se presentan las conclusiones generales del estudio, se destacan las contribuciones realizadas y se ofrecen recomendaciones para avanzar en la transición energética del sector eléctrico.

Además de estos capítulos, el documento cuenta con referencias bibliográficas pertinentes, así como apéndices y anexos que complementan la información presentada y respaldan la rigurosidad del estudio. Los apéndices incluyen la síntesis de la revisión sistemática, escalas de puntuación y encuestas aplicadas, mientras que los anexos presentan información adicional derivada de los estudios revisados.

2. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales e informaciones teóricas relevantes para el desarrollo de la investigación, facilitando la comprensión del estudio a lo largo del documento.

2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Como señalan Casau *et al.* (2021) el carbón; es uno de los combustibles fósiles más importantes y representa la principal fuente de combustible sólido a nivel mundial, cubre aproximadamente el 30% de la demanda global de energía primaria, y su papel ha evolucionado a lo largo de la historia, de ser un recurso ampliamente utilizado en todos los sectores económicos, pasó a ser empleado principalmente para la generación de electricidad. El carbón se convierte en un objetivo importante en cuanto a la mitigación del cambio climático debido a sus altas emisiones de CO₂ por unidad de energía térmica producida. Actualmente el cambio climático ocupa un lugar central, lo que ha llevado a que la eliminación gradual del carbón de la matriz energética global se convierta en una prioridad. Los gobiernos buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y limitar el desarrollo de las unidades generadoras a carbón y la infraestructura asociada.

Martínez (2024) menciona que las unidades generadoras a carbón; o centrales eléctricas de carbón producen electricidad a través de un proceso de combustión del carbón en varias etapas. Primero, el carbón se quema en una caldera para generar energía térmica, la cual se utiliza para calentar agua y convertirla en vapor a alta presión, este vapor se dirige hacia una turbina y produciendo energía mecánica de rotación. Posteriormente, un alternador transforma esta energía rotacional en energía eléctrica, que finalmente se distribuye a través de la red eléctrica. Una central eléctrica a carbón convencional emite alrededor de 1 kg de CO₂/kWh e, junto con otros gases de efecto invernadero (ZEDTWITZ, STEINFELD, 2003). Los crecientes compromisos globales de descarbonización exigen reducciones profundas de las emisiones de CO₂ de las unidades generadoras a base de carbón existentes.

Como señalan Cuji y Galarza (2022) la descarbonización; del segmento productor de energía contempla la desconexión de sistemas de generación convencional que hacen uso de combustibles fósiles; a cambio de introducir sistemas de generación renovables capaces de cubrir la demanda suplida por las fuentes convencionales, el sector energético es uno de los principales actores en la producción de GEI, lo que lo convierte en el principal sector a ser intervenido de manera no sólo ambiental sino también técnica.

La transición energética; puede definirse como un cambio significativo en el sistema

energético de un país, de una región, o incluso, a nivel global (LINARES, 2018). Implica abordar varios factores, como los recursos naturales, las políticas públicas, los conflictos sectoriales, el medioambiente, los derechos humanos, las estrategias empresariales, los avances tecnológicos, la diversificación productiva, la relación entre energía y distribución de la riqueza. Bertinat (2016) menciona que actualmente nos enfrentamos al desafío de lograr una transición que no solo sea efectiva, sino también justa. Esto implica reforzar la noción de patrimonio y adoptar una perspectiva que considere la energía como un derecho fundamental. El concepto de transición justa ha evolucionado para incorporar aspectos de equidad y justicia energética, ambiental y climática, e incluir elementos relacionados con la distribución de costos, riesgos y beneficios, como la contaminación del aire y los empleo (MAYFIELD, 2022).

Según lo descrito por Mac, Brouwer y Samuelsen (2018) la electricidad generada a partir de fuentes renovables tiende a tener costos más elevados y densidades de energía más bajas en comparación con los combustibles fósiles. Muchas de ellas, como la eólica y la solar, son inherentemente variables, ya que dependen de factores diurnos y estacionales, lo que exige la implementación de tecnologías complementarias para garantizar un equilibrio adecuado entre la generación y las fluctuaciones en la demanda del sistema eléctrico. Otro desafío importante es que muchos lugares con alto potencial de recursos renovables no están cerca de los centros de población, lo que implica la necesidad de modernizar la infraestructura de transmisión existente o construir nuevas redes. Debido a estos y otros obstáculos, un aumento significativo en la capacidad de energía renovable podría no ser camino a corto plazo.

Teniendo en cuenta la sostenibilidad económica, ambiental y social; las naciones desarrolladas como aquellas en vías de desarrollo han comprendido que el crecimiento económico debe ir de la mano con una menor presión sobre el medio ambiente. Han reconocido que es fundamental integrar estrategias climáticas y de desarrollo en diversos sectores para avanzar hacia un futuro sostenible. Además, garantizar un acceso más amplio y equitativo a la energía, minimizando el daño ambiental, se ha transformado en una responsabilidad social compartida por todos los países del mundo. Este enfoque promueve la sostenibilidad social, al asegurar que las comunidades más vulnerables tengan acceso a recursos energéticos limpios y asequibles, fomentando así un desarrollo inclusivo y justo (SAFARI *et al.*, 2019).

En cuanto a las tecnologías y combustibles con bajas emisiones de carbono; existen una variedad de estrategias de generación de energía que tienen el potencial de cubrir las futuras necesidades eléctricas mientras minimizan las emisiones contaminantes. Entre estas opciones se encuentra la generación basada en combustibles fósiles integrada con fuentes renovables y/o equipada

con sistemas de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC). Asimismo, reducir la demanda de electricidad mediante mejoras en la eficiencia de la generación, transmisión, distribución y uso final puede disminuir la necesidad de producción primaria, lo que a su vez reduce el consumo de combustibles y las emisiones, sin comprometer el suministro (MAC, BROUWER, SAMUELSEN, 2018).

2.2. TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES DE RECONVERSIÓN

Aunque existen otras opciones, las presentadas a continuación son reconocidas por su potencial para mitigar los gases de efecto invernadero, su cercanía a la madurez tecnológica, su posible expansión a corto y mediano plazo, y el respaldo de la literatura que evalúa sus impactos.

En este contexto, Kamble *et al.* (2019) conceptualizan la biomasa como un "recurso renovable de ciclo neutro de carbono" donde el CO₂ emitido durante su combustión es reabsorbido por el crecimiento de nueva biomasa. Mientras que, su uso en centrales termoeléctricas a carbón se describe como una "solución híbrida de transición" (Xu *et al.*, 2020), que aprovecha la infraestructura existente, pero requiere adaptaciones técnicas (molienda conjunta carbón-biomasa). Asimismo, Miedema *et al.* (2017) enfatizan su papel en la "descarbonización incremental", al permitir sustituir parcialmente el carbón (20-30%) sin excesivas modificaciones en las calderas.

Mac, Brouwer y Samuelsen (2018) definen al gas natural como un "combustible puente" en la transición energética, destacando su "alta flexibilidad operativa" para compensar la intermitencia de las renovables. Mientras que González *et al.* (2018) lo conceptualizan como un "facilitador técnico-económico", ya que su combustión puede emitir hasta 50% menos CO₂ que el carbón y puede implementarse en turbinas existentes con modificaciones menores. Sin embargo, Safari *et al.* (2019) advierten que su rol es "transitorio" y condicionado a la disponibilidad de infraestructura de gasoductos, limitando su aplicabilidad en regiones sin acceso a redes de distribución.

Mills (2018) describe la hibridación solar y carbón como un "acoplamiento sinérgico" donde la energía solar (torres de concentración o fotovoltaica) precalienta los fluidos, reduciendo el consumo de carbón. Jiang *et al.* (2022) lo amplían a un "sistema de generación híbrido de ciclo combinado", integrando almacenamiento térmico para garantizar estabilidad. Khanmohammadi *et al.* (2022) introducen el concepto de "multigeneración solar-termoeléctrica", donde la energía solar no solo genera electricidad, sino también hidrógeno, maximizando el uso de la infraestructura existente.

Szima *et al.* (2021) conceptualizan el hidrógeno como un "vector energético de cero emisiones" cuando se produce mediante electrólisis con renovables, pero destacan su producción actual mediante "gasificación de carbón con captura de carbono" como una etapa intermedia. Wei *et*

al. (2024) lo definen como un "modificador de la combustión", ya que su co-combustión con carbón reduce emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y mejora la eficiencia. No obstante, Li *et al.* (2019) señalan que su adopción está limitada por altos costos de producción y almacenamiento criogénico.

Lockwood (2017) y Wang *et al.* (2017) describen la captura de carbono como una "tecnología de mitigación de emisiones de última etapa", que intercepta el CO₂ postcombustión mediante solventes químicos. Rogieri *et al.* (2023) lo enmarcan en la "economía circular del carbono", donde el CO₂ capturado se almacena o reutiliza. Sin embargo, las referencias coinciden en que su viabilidad depende de "marcos regulatorios que internalicen los costos de carbono" (Wang *et al.*, 2017), ya que su implementación reduce la eficiencia neta de la planta (15-20%).

La literatura especializada destaca que la selección de tecnologías debe basarse en un "análisis multifactorial", considerando no solo aspectos técnicos y económicos, sino también políticos y sociales.

2.3. ESTUDIOS QUE ABORDARON LA RECONVERSIÓN

En cuanto a estudios previos que abordaron la reconversión y valoración energética; el estudio realizado por Mac, Brouwer y Samuelsen (2018), muestra que el reemplazo del carbón por gas natural en Estados Unidos (EE. UU.) entre 1995 y 2012 redujo emisiones de CO₂ (23%), NOx (40%) y dióxido de azufre (SO₂, 44%). Además, resaltan las ventajas del gas natural en sistemas combinados de refrigeración, calefacción y energía, maximizando la eficiencia mediante el uso de calor residual. Observando que el gas natural se posiciona como un combustible "puente" hacia un futuro con menos emisiones de carbono, ofreciendo una alternativa limpia y eficiente frente al carbón. Asimismo, Safari *et al.* (2019) evidencia que el gas natural es el combustible fósil más limpio y eficiente, con un contenido de carbono significativamente menor (15,3 Kg/GJ) en comparación con el carbón de coque (25,8 Kg/GJ), el carbón no coquizable (26,2 Kg/GJ) y el petróleo crudo (20 Kg/GJ). En plantas de ciclo combinado, reduce las emisiones de CO₂ a la mitad en comparación con las centrales de carbón, alcanzando eficiencias térmicas de hasta 65%. Además, el gas natural tiene el costo de capital nivelado más bajo, aproximadamente el 25% de todas las nuevas tecnologías de generación de electricidad. Estas ventajas ambientales y económicas se complementan con ventajas técnicas como la flexibilidad operativa para integrarse con fuentes renovables.

Los estudios de Miedema *et al.* (2017) afirma que la co-combustión de un 60% de biomasa con carbón puede reducir las emisiones de GEI en un significativo 48%, incrementando simultáneamente la participación de energía renovable en un 35%. No obstante, esta configuración presenta desafíos operativos, mostrando una disminución en la eficiencia energética global y un

mayor consumo de energía comparado con la operación exclusiva con carbón, que mantiene una eficiencia en la cadena de suministro del 41,2%. Contrastando estos hallazgos, la investigación de Xu *et al.* (2020) demuestra que sistemas avanzados de calderas de carbón pulverizado adaptados para co-combustión pueden alcanzar eficiencias térmicas del 92%, con una eficiencia en generación eléctrica del 45%. Estos resultados sugieren que las configuraciones híbridas, cuando se implementan con tecnologías adecuadas, pueden ofrecer ventajas tanto ambientales como operacionales.

El estudio presentado por Rogieri *et al.* (2023) evalúa la viabilidad de implementar tecnologías de CAC en el Complejo Termoeléctrico Jorge Lacerda, el mayor generador de energía a carbón en Brasil, considerando aspectos regulatorios, ambientales, financieros y sociales. Los resultados indican que la CAC podría ser una solución sostenible, dependiendo del desarrollo de marcos regulatorios, financiamiento e infraestructura. Sin embargo, como advierte Lockwood (2017) en el contexto europeo, la implementación de captura y almacenamiento de carbono enfrenta obstáculos significativos que limitan su adopción masiva. Las tecnologías actualmente disponibles, como los sistemas de depuración basados en aminas, presentan dos desventajas críticas: reducen la eficiencia energética de las plantas en aproximadamente un 10% y pueden incrementar los costos de generación eléctrica hasta en un 80%. Estos factores representan barreras económicas y técnicas considerables. Los estudios coinciden en señalar que, pese a los desafíos sigue siendo una opción valiosa para la descarbonización del sector, pero su implementación requiere políticas de apoyo y desarrollo tecnológico continuo.

Serrano, Olmeda y Petrakopoulou (2019) mencionan que las plantas de energía híbridas, que combinan fuentes convencionales y renovables, son una solución prometedora para reducir las emisiones de GEI y optimizar la generación eléctrica. Analizan la viabilidad termodinámica y económica de una planta híbrida que integra una planta de carbón con un campo de torres solares, comparándola con una planta de carbón convencional de similar capacidad. Los resultados muestran que la planta híbrida reduce las emisiones y el consumo de combustible en un 4,6%, alcanzando una eficiencia exergética del 35,8%, 1,6 puntos porcentuales más alta que la de la planta de carbón convencional. Sin embargo, el costo de capital por kilovatio para la planta híbrida es significativamente mayor (8050,32 \$/kW frente a 5979,69 \$/kW para la planta de carbón), debido al equipo adicional necesario. El costo nivelado de la electricidad de la planta híbrida es de 0,19 \$/kWh, reduciéndose a 0,12 \$/kWh cuando opera exclusivamente con carbón. Los resultados plantean un escenario de compensaciones donde las barreras económicas son significativas, pero potencialmente superables.

Según Szima *et al.* (2021), las plantas de Gasificación Integrada con Ciclo Combinado

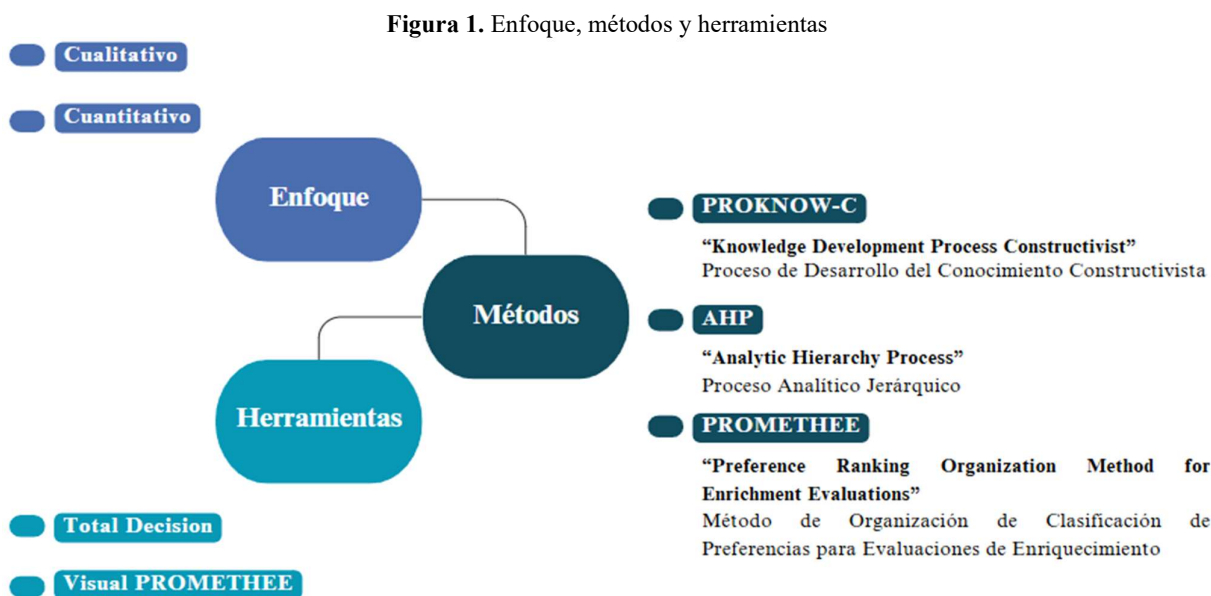
(Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC), que utilizan la tecnología de combustión por conmutación de gas y el desplazamiento de agua asistido por membrana para la producción flexible de energía e hidrógeno, ofrecen una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia. Estas plantas permiten generar energía flexible, lo que mejora el rendimiento económico en comparación con las plantas convencionales. La captura de carbono en estas plantas tiene un costo de evitación de 25 €/tonelada, mucho más bajo que el de las plantas con captura previa a la combustión (44 €/tonelada). Además, muestran una mejora significativa en el rendimiento económico, con un aumento de hasta un 11% en la tasa de rendimiento anual debido a su capacidad para operar durante períodos de baja generación de energía renovable y vender hidrógeno al mercado. Este enfoque flexible es clave para equilibrar la variabilidad de las energías renovables, siempre que exista un mercado para el hidrógeno producido.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describe el proceso metodológico diseñado para alcanzar los objetivos específicos planteados en la investigación, mediante la presentación del enfoque, los métodos empleados y las herramientas utilizadas.

3.1. DESARROLLO SECUENCIAL DE MÉTODOS

El estudio presenta un enfoque metodológico multicriterio que combina tanto el análisis cualitativo como el cuantitativo, a través de tres métodos para la evaluación de alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón: Proknow-C, AHP y PROMETHEE. En la Figura 1 se ilustra el enfoque, los métodos y las herramientas utilizadas.



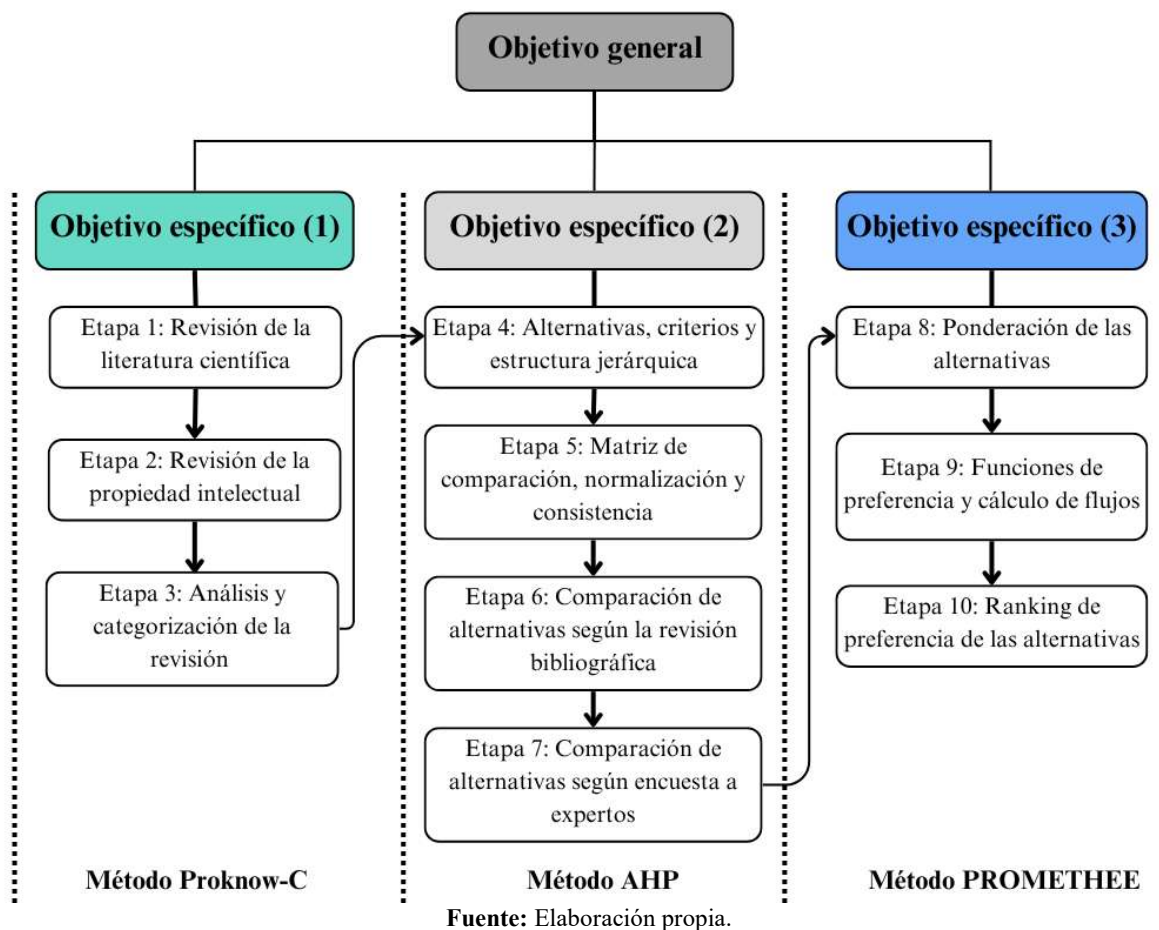
Fuente: Elaboración propia.

Estos métodos se seleccionaron por su demostrada aplicabilidad en contextos complejos de toma de decisiones. En primer lugar, se emplea el método Proknow-C, para identificar y estructurar la revisión sistemática de artículos científicos y patentes relevantes sobre alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón; seguidamente se utiliza el método AHP para evaluar cuantitativamente las alternativas identificadas, en base a los criterios de evaluación y finalmente se emplea el método PROMETHEE para obtener un ranking de preferencias de dichas alternativas permitiendo priorizar y clasificarlas según su rendimiento en cada dimensión evaluada. Cada método se encuentra desarrollado en su respectivo capítulo.

Se diseñó el proceso metodológico alineado directamente al objetivo general de este estudio: evaluar alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón, promoviendo la

transición energética mediante la integración de fuentes de energía más sostenibles. A partir del objetivo general se establecieron los objetivos específicos y sus respectivas etapas. La Figura 2 esquematiza el flujo metodológico, mostrando cómo cada objetivo se articula con el desarrollo secuencial de los métodos Proknow-C, AHP y PROMETHEE, conformando un enfoque integral y estructurado para el análisis propuesto.

Figura 2. Proceso metodológico para el cumplimiento de los objetivos



A continuación, en la Tabla 1 se describe el proceso metodológico de manera resumida, describiendo las diferentes etapas que componen el estudio y destacando las principales consideraciones relacionadas con su desarrollo, cada una de estas etapas son abordadas de forma detallada y específica en sus respectivos tópicos del documento, lo que permite una comprensión clara y progresiva de la metodología aplicada en esta investigación.

Tabla 1. Descripción de las etapas de investigación.

Etapas	Descripción
Etapa 1: Revisión de la literatura científica	Realizar la búsqueda y recopilación bibliográfica de la literatura científica y sintetizar los hallazgos clave para la reconversión de unidades generadoras a carbón.
Etapa 2: Revisión de la propiedad intelectual	Realizar la búsqueda y recopilación de la propiedad intelectual disponible respecto al tema y sintetizar los hallazgos clave.
Etapa 3: Análisis y categorización de la revisión	Analizar los hallazgos de la literatura científica y de las patentes categorizando las alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón propuestas en la revisión.
Etapa 4: Alternativas, criterios y estructura jerárquica	Presentar las alternativas de reconversión basadas en el resultado del Objetivo (1), establecer los criterios de evaluación de las alternativas y definir la estructura jerárquica de decisión.
Etapa 5: Matriz de comparación, normalización y consistencia	Construir las matrices de comparación pareada y cálculo de vectores propios para ponderación de criterios utilizando el <i>software Total Decision</i> .
Etapa 6: Comparación de alternativas según la revisión bibliográfica	Combinar los pesos de los criterios y las alternativas, según los datos recopilados de la revisión bibliográfica utilizando el <i>software Total Decision</i> .
Etapa 7: Comparación de alternativas según encuesta a expertos	Combinar los pesos de los criterios y las alternativas, según los datos recopilados de la encuesta a expertos utilizando el <i>software Total Decision</i> .
Etapa 8: Ponderación de las alternativas	Calcular la media ponderada entre los resultados del Objetivo (2) según la revisión bibliográfica y la encuesta a expertos obteniendo pesos consolidados.
Etapa 9: Funciones de preferencia y cálculo de flujos	Aplicar la función de preferencia y calcular los flujos de preferencia de cada alternativa utilizando el <i>software Visual PROMETHEE</i> .
Etapa 10: Ranking de preferencia de las alternativas	Presentar el ranking de alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón mediante el cálculo del flujo neto utilizando el <i>software Visual PROMETHEE</i>

Fuente: Elaboración propia.

Para asegurar una aplicación rigurosa y coherente de los métodos, el análisis se apoya en herramientas de *software* especializadas: *Total Decision* para la implementación del método AHP, y *Visual PROMETHEE* para la aplicación del método PROMETHEE. Estas plataformas permiten una evaluación cuantitativa precisa, así como la generación de representaciones gráficas claras que facilitan la comparación y el análisis de las alternativas.

3.2. HERRAMIENTA ESPECIALIZADA TOTAL DECISION

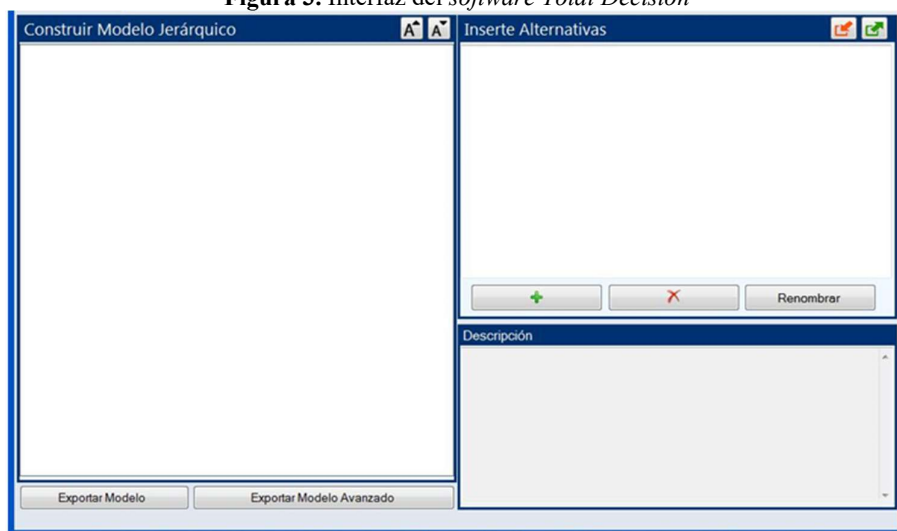
El *software Total Decision* es una herramienta especializada para la aplicación del método AHP, ampliamente utilizada en estudios de apoyo a la toma de decisiones multicriterio. Esta plataforma facilita la comparación estructurada entre alternativas y criterios mediante matrices de juicio pareado, permitiendo obtener de forma eficiente los vectores de ponderación y verificar la consistencia de las comparaciones. El sistema está estructurado en módulos que guían al usuario a través de cada etapa del proceso AHP, desde la definición del problema, la jerarquización de criterios y subcriterios, hasta la evaluación de alternativas y la obtención de resultados consolidados.

Como se detalla en el Manual de Usuario de *Total Decision* entre sus principales

funcionalidades se destacan: la generación automática de matrices de comparación, el cálculo de los pesos relativos y la verificación de la consistencia de los juicios. El manual proporciona orientaciones claras para cada paso del proceso, facilitando su correcta implementación en contextos académicos o profesionales (TOTAL DECISION, 2025).

En la Figura 3 se presenta la interfaz del *software Total Decision*, el cual resulta especialmente valioso en investigaciones académicas debido a su interfaz amigable, su precisión en los cálculos y su capacidad para manejar datos provenientes de diferentes fuentes, como revisiones bibliográficas y encuestas a expertos, como es el caso de esta investigación. Además, garantiza la trazabilidad y la reproducibilidad del análisis, elementos fundamentales en estudios científicos.

Figura 3. Interfaz del *software Total Decision*



Fuente: Extraído de (TOTAL DECISION, 2025).

3.3. HERRAMIENTA ESPECIALIZADA VISUAL PROMETHEE

El *software Visual PROMETHEE* es una herramienta especializada para la aplicación del método PROMETHEE, ampliamente utilizado en el análisis de decisiones multicriterio. Este método permite establecer un ranking de alternativas con base en preferencias entre pares, integrando criterios de evaluación de manera flexible y transparente. *Visual PROMETHEE* ofrece una interfaz gráfica intuitiva que facilita tanto la introducción de datos como la visualización de resultados, estas representaciones permiten comprender el orden de preferencia de las alternativas, el comportamiento de los criterios y sus influencias sobre las decisiones.

El Manual del Usuario de *Visual PROMETHEE* describe que el *software* está estructurado en etapas que incluyen: la definición de las alternativas y criterios, la asignación de pesos, la selección de funciones de preferencia para cada criterio, y el cálculo de los flujos positivos, negativos y netos,

los cuales permiten establecer el ranking final de las alternativas. El manual proporciona directrices detalladas sobre sus funcionalidades y la lógica de operación de cada módulo (VISUAL PROMETHEE, 2013)

En la Figura 4 se presenta la interfaz del *software Visual PROMETHEE*, el cual además de su precisión analítica, se destaca por su capacidad para representar gráficamente las alternativas y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia. Estas características lo convierten en una herramienta adecuada para contextos de investigación que requieren transparencia y robustez metodológica, como en el presente estudio.

Figura 4. Interfaz del *software Visual PROMETHEE*

	Industrial	Investment	Operations	Employment	Transportation	Environ. Imp.	Social Imp.
Unit	M\$	M\$	workers	5-point	impact	impact	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences							
Min/Max	min	min	min	max	min	min	
Weight	25.00	15.00	20.00	20.00	10.00	10.00	
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Level	Level	Level	
Thresholds	percentage	percentage	percentage	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	0.05	0.05	0.05	0.5	0.5	0.5	
- P: Preference	0.25	0.25	0.1	1.5	1.5	1.5	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics							
Minimum	74 €	7 €	95	2.0	1.0	1.0	
Maximum	128 €	12 €	175	5.0	4.0	4.0	
Average	98 €	9 €	139	3.6	2.4	2.2	
Standard Dev.	20 €	2 €	32	1.0	1.0	1.2	
Evaluations							
Site 1	74 €	12 €	175	average	high	low	
Site 2	86 €	9 €	170	good	low	very low	
Site 3	89 €	7 €	145	very good	very low	moderate	
Site 4	115 €	8 €	95	bad	low	high	
Site 5	128 €	10 €	110	good	moderate	very low	

All Industrial / Political / Environmental / Social /

Actions: 5 (5 active) Criteria: 6 (6 active) Scenarios: 4 (4 active) Locale: Belgium [€/.] Saved

Fuente: Extraído de (VISUAL PROMETHEE, 2013)

4. MÉTODO PROKNOW-C: REVISIÓN SISTEMÁTICA

El procedimiento metodológico descrito en esta sección tuvo como objetivo la búsqueda, selección y análisis de trabajos académicos y científicos de gran relevancia relacionados con la temática de la reconversión de las unidades generadoras a carbón, un área clave dentro de la transición energética. Este proceso se llevó a cabo utilizando el método Proknow-C, que corresponde a un enfoque sistemático y constructivista de revisión de la literatura científica. El Proknow-C es un método diseñado específicamente para organizar y estructurar la investigación bibliográfica (LINHARES *et al.*, 2019).

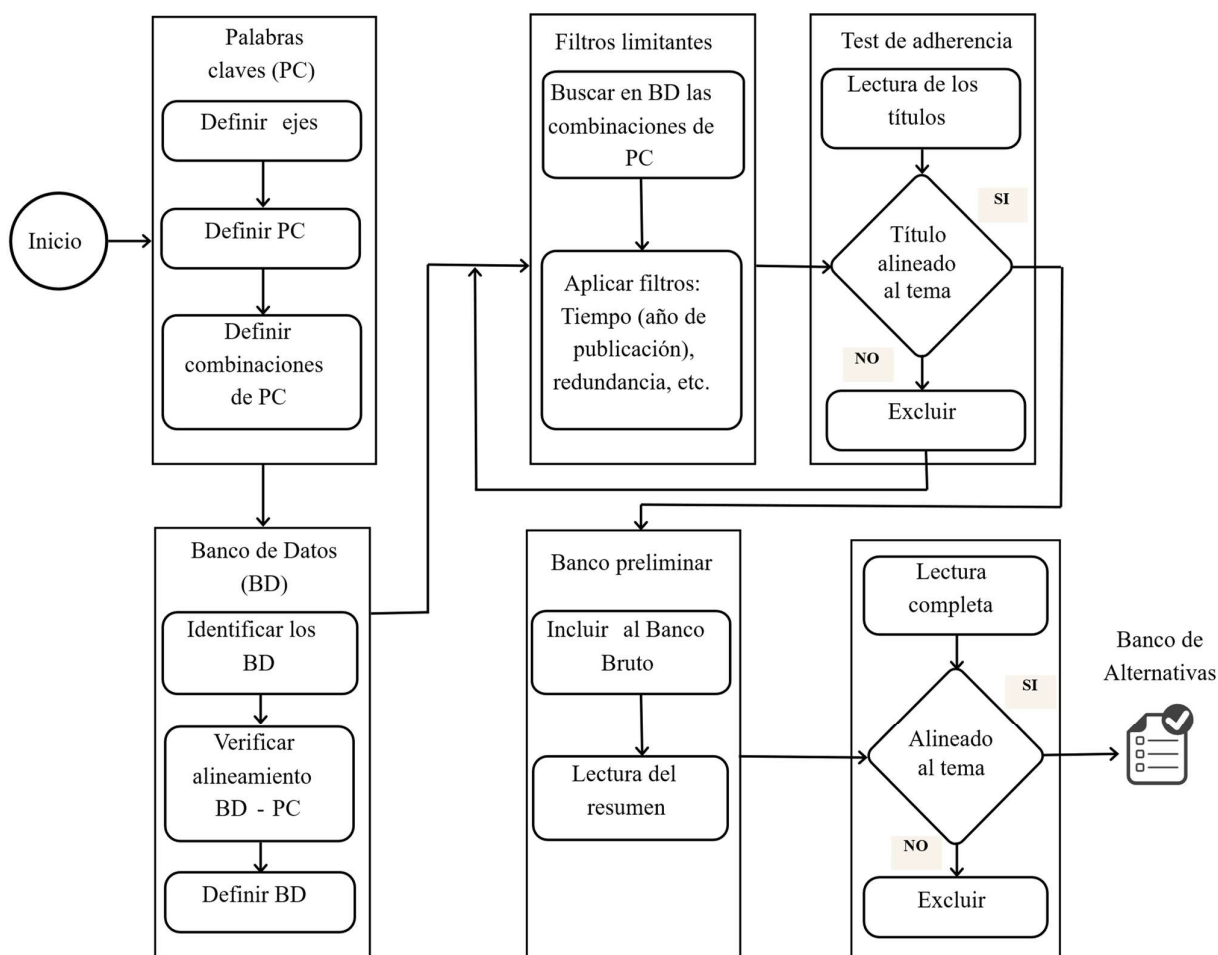
El objetivo principal de este método es garantizar una revisión eficiente y rigurosa, proporcionando una base sólida y fiable de artículos científicos que aborden de manera integral el tema de interés. Este enfoque permite no solo identificar los trabajos más relevantes y actualizados, sino también construir un portafolio bibliográfico cuidadosamente seleccionado que facilite el análisis profundo y la comparación de diversas alternativas para la reconversión de unidades generadoras a carbón. Además, este proceso contribuye a filtrar la información con criterios objetivos, asegurando la calidad y pertinencia de las fuentes utilizadas.

De este modo, se fortalece la fundamentación teórica del estudio y se establece un punto de partida sólido para la toma de decisiones informadas dentro del proceso de evaluación multicriterio. Asimismo, el método permite reconocer vacíos en la literatura, orientar futuras investigaciones y ofrecer una visión más estratégica de las tendencias científicas en el campo energético. La aplicación sistemática de Proknow-C también incrementa la trazabilidad del proceso de revisión, brindando transparencia metodológica y fortaleciendo la reproducibilidad del estudio. En consecuencia, se logra consolidar una base de conocimiento robusta que apoya con evidencia empírica el desarrollo de alternativas viables en la transición energética.

Mediante este proceso, se asegura que la revisión esté alineada con los objetivos de la investigación, ofreciendo un marco estructurado que permite tanto la organización de la literatura como su evaluación cualitativa y cuantitativa. Este método es esencial para asegurar que el estudio se sustente en las fuentes académicas más relevantes y autorizadas, permitiendo, que los hallazgos presentados sean tanto confiables como pertinentes dentro del contexto del análisis de la transición energética y la sostenibilidad, tal como se refleja en la Figura 5. Esta alineación metodológica contribuye a una mayor coherencia entre la fundamentación teórica y el desarrollo analítico del estudio. Además, permite identificar con precisión las contribuciones más significativas dentro del campo, así como las corrientes dominantes de investigación, garantizando una base sólida para establecer conexiones claras entre la teoría, los métodos aplicados y los resultados obtenidos.

Considerando que el objetivo general de este estudio es evaluar alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón, promoviendo la transición energética mediante la integración de fuentes de energía más sostenibles, se han definido los ejes de investigación que guían el desarrollo del estudio. En la Tabla 2 se presenta una estructura organizada donde la primera columna define los ejes de investigación, los cuales están directamente relacionados con los objetivos específicos y alineados de manera coherente con el objetivo general del estudio. La identificación de ejes es fundamental para garantizar que cada aspecto de la investigación esté orientado hacia la consecución de los resultados deseados. La segunda columna de la tabla ofrece una breve descripción de cada eje de investigación. Finalmente, la tercera columna proporciona una síntesis que integra la información de las dos columnas anteriores, facilitando una comprensión clara y estructurada de cómo cada eje se interrelaciona en el análisis.

Figura 5. Procesos del método Proknow-C.



Fuente: Elaboración propia adaptado de Linhares JE *et al.*, 2010.

Tabla 2. Ejes de investigación.

Ejes	Descripción	Síntesis
(1) Reconversión de unidades generadoras a carbón	Revisión de la literatura científica y de propiedad intelectual relevantes en la reconversión de unidades generadoras a carbón	Especificación
(2) Alternativas que promuevan la transición energética	Evaluación de alternativas, ponderando factores claves para integrar fuentes de energía que favorezcan la transición energética.	Fuentes energéticas
(3) Priorización multicriterio de alternativas	Análisis multicriterio y priorización de las alternativas, considerando criterios establecidos.	Métodos de análisis

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso detallado para la selección de las palabras clave (PC), que fueron identificadas con base en los ejes de investigación previamente definidos. Este paso resulta fundamental para garantizar que la búsqueda de información y la revisión de la literatura estén alineadas con los objetivos específicos del estudio. En la Tabla 3, se presentan estas palabras clave de manera estructurada, permitiendo visualizar claramente la relación entre cada conjunto de términos y los ejes específico de la investigación. Esta vinculación asegura una cobertura exhaustiva de la temática, optimizando la búsqueda y recuperación de información relevante. La elección de palabras clave adecuadas incrementa la precisión de la búsqueda facilitando el acceso a estudios pertinentes dentro del campo de la transición energética y la reconversión de las unidades generadoras a carbón.

Tabla 3. Palabras Clave (PC).

Eje (1)	(PC)
Especificación	"unidad generadora" OR "central eléctrica" "carbón" OR "termoeléctrica" OR "térmica" "reconversión" OR "modernización" OR "transición energética" OR "descarbonización"
Eje (2)	(PC)
Fuentes energéticas	"alternativas" OR "integración" OR "hibridación" "energía renovable" OR "fuentes limpias" OR "energía alternativa" OR "energía sostenible"
Eje (3)	(PC)
Métodos de análisis	"factibilidad" OR "viabilidad" OR "impacto" "método" OR "criterio" OR "análisis multicriterio" OR "AHP" OR "PROMETHEE"

Fuente: Elaboración propia.

4.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA CIENTÍFICA

En la búsqueda e investigación de la literatura científica se utilizó como banco de datos la plataforma especializada Scopus, reconocido por proporcionar una descripción integral de la producción científica global en los campos de la ciencia y la tecnología, el Portal de Periódicos

CAPES, una de las principales plataformas de acceso a publicaciones científicas en Brasil y *Google Académico* que permite realizar búsquedas amplias mediante un algoritmo similar al utilizado en las búsquedas generales de *Google*. Se utilizó la aplicación de operadores booleanos "OR" y "AND" en la combinación de palabras clave, seleccionadas estratégicamente de los ejes temáticos observados en la Tabla 3. Estos operadores fueron fundamentales para expandir y refinar la búsqueda de artículos que estuvieran alineados con los objetivos del estudio. Se emplearon tres idiomas principales: inglés, portugués y español, con el propósito de maximizar la cobertura y asegurar que la búsqueda incluya las investigaciones más relevantes y actualizadas a nivel global. Además, para garantizar que la información recogida fuera reciente y pertinente, se aplicó un límite temporal de 10 años, enfocándose en publicaciones comprendidas entre 2015 y 2024.

En cuanto a los ejes y palabras clave seleccionados, se realizaron 9 combinaciones para cubrir una amplia gama de temas relacionados con la reconversión de unidades generadoras a carbón y la transición energética. Como parte del proceso, se llevó a cabo una prueba de adherencia para evaluar si las palabras clave elegidas eran efectivas en la obtención de resultados relevantes y, de ser necesario, reducir el número de combinaciones para focalizar aún más la búsqueda, optimizando así el proceso. La búsqueda fue realizada el mes de diciembre del año 2024.

La búsqueda inicial arrojó un total de 4.850 resultados, de los cuales 2.676 correspondían a artículos científicos. Este amplio conjunto de documentos fue sometido a un proceso de filtrado riguroso con el fin de reducir el número de artículos a un tamaño manejable y alineado con los objetivos del estudio. El primer filtro aplicado fue el de tiempo, excluyendo los artículos anteriores a 2015, lo que resultó en 747 resultados. Posteriormente, se aplicó un filtro de redundancia, eliminando artículos repetidos o irrelevantes, lo que redujo el número a 311. A partir de este punto, se procedió con la lectura de los títulos, seleccionando 268 artículos. El siguiente paso fue un filtro basado en la alineación temática, en el que se excluyeron 191 artículos que no correspondían directamente con los objetivos de la investigación, quedando 77. Finalmente, se realizó una lectura detallada de los resúmenes para asegurar que los artículos restantes estuvieran completamente alineados con el tema de estudio. De este proceso, se identificaron 38 artículos relevantes, y tras la lectura completa de cada uno, se excluyeron aquellos que no cumplían con los criterios de investigación.

Como resultado, se estableció un Portafolio Bibliográfico compuesto por 26 artículos científicos como base para la investigación. En la Tabla 4 se presenta la primera parte de los artículos seleccionados, que corresponde del artículo (1) al artículo (13). Estos trabajos fueron escogidos en función de su relevancia temática, rigor metodológico y aporte específico al proceso de reconversión de unidades generadoras a carbón.

Tabla 4. Artículos Científicos seleccionados parte uno.

Ítem	Título	Contribución	Referencia
(1)	Una revisión de las tecnologías de captura de CO ₂ postcombustión en centrales eléctricas de carbón	Evalúa tecnologías de captura postcombustión, sus eficiencias y limitaciones operativas, proporcionando base técnica para la alternativa de instalación de sistemas de captura de carbono.	(WANG <i>et al.</i> , 2017)
(2)	Revisión de la flexibilidad operativa y las emisiones de las centrales eléctricas de gas y carbón en un futuro con crecientes renovables	Presenta comparaciones de emisiones y flexibilidad entre plantas de gas y carbón, fundamentales para la evaluación de la conversión a gas natural y de la hibridación carbón-gas.	(GONZALEZ, KIRSTEN, PRCHLIK, 2018)
(3)	El papel del gas natural y su infraestructura en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora de la calidad del aire regional y la integración de recursos renovables	Destaca el rol del gas como combustible de transición, su compatibilidad con energías renovables y su infraestructura. Sustenta la alternativa de conversión total a gas natural y la hibridación carbón-gas.	(MAC, BROUWER, SAMUELSEN, 2018)
(4)	Integración de la sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas: un método AHP difuso para la selección de cuestiones de sostenibilidad relevantes	Justifica el uso del método AHP en la priorización de criterios complejos de sostenibilidad, fortaleciendo el enfoque metodológico del presente estudio.	(CALABRESE <i>et al.</i> , 2019)
(5)	Gas natural: ¿un combustible de transición para la transformación del sistema energético sostenible?	Sustenta el gas como solución transitoria eficiente. Proporciona evidencias para la evaluación de la conversión total a gas natural y de la hibridación carbón-gas natural.	(SAFARI <i>et al.</i> , 2019)
(6)	Cogasificación de carbón y biomasa: una tecnología energética limpia emergente: situación y perspectivas de desarrollo en el contexto indio	Revisa tecnologías de co-gasificación, su eficiencia y retos técnicos, relevantes para la alternativa de conversión total a biomasa y la co-combustión carbón-biomasa.	(KAMBLE <i>et al.</i> , 2019)
(7)	Tecnología de generación de energía mediante co-combustión de carbón y biomasa: estado actual, desafíos e implicaciones políticas	Detalla los requisitos técnicos, beneficios y desafíos regulatorios de la co-combustión de carbón con biomasa, proporcionando evidencia para esta alternativa.	(XU <i>et al.</i> , 2020)
(8)	Una revisión comparativa de las tecnologías de captura de carbono de próxima generación para las centrales eléctricas de carbón	Analiza tecnologías emergentes de captura con solventes avanzados y eficiencia energética. Sustenta la factibilidad de la alternativa de instalación de sistemas de captura de carbono.	(LOCKWOOD, 2017)
(9)	¿Renovar, reducir o volverse más eficiente? La contribución climática de la co-combustión de biomasa en una central eléctrica de carbón	Proporciona evidencia cuantitativa de reducción de emisiones GEI y eficiencia energética asociada a la co-combustión carbón-biomasa.	(MIEDEMA <i>et al.</i> , 2017)
(10)	Un enfoque sistemático para la evaluación de la energía renovable utilizando un proceso de jerarquía analítica	Apoya el uso del AHP en contextos energéticos multicriterio, sirviendo de referencia metodológica para la jerarquización de criterios y alternativas.	(BUDAK <i>et al.</i> , 2019)
(11)	Encontrar sinergias entre las energías renovables y el carbón: producción flexible de energía e hidrógeno a partir de plantas IGCC avanzadas con captura integrada de CO ₂	Proporciona base técnica para la alternativa de cogeneración de carbón e hidrógeno, destacando el uso de plantas IGCC con producción flexible de energía e hidrógeno.	(SZIMA <i>et al.</i> , 2021)
(12)	Combinación de energía solar con centrales eléctricas de carbón o co-combustión de gas natural	Evalúa beneficios operativos de integrar energía solar con plantas a carbón, relevante para las alternativas de hibridación carbón-solar y de hibridación carbón-gas natural.	(MILLS, 2018)
(13)	Análisis comparativo de un novedoso sistema de multigeneración asistido por torre solar con ciclo de energía de recompresión de CO ₂ , generador termoelectrónico y unidad de producción de hidrógeno	Describe sistemas de multigeneración basados en energía solar, incluyendo generación eléctrica e hidrógeno. Fundamenta técnicamente la alternativa de hibridación carbón-solar.	(KHAN-MOHAMMADI <i>et al.</i> , 2022)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Artículos Científicos seleccionados parte dos.

Ítem	Título	Contribución	Referencia
(14)	Potencial de las centrales eléctricas de co-combustión de biomasa y carbón en Indonesia: un análisis PESTEL	Analiza factores estratégicos y regulatorios que afectan la viabilidad de la hibridación de carbón y biomasa.	(SUGIYONO <i>et al.</i> , 2022)
(15)	Análisis del rendimiento de una central eléctrica de carbón alimentada por energía solar con torre y almacenamiento de energía térmica	Evalúa el impacto técnico y económico de sistemas híbridos solar-carbón, proporcionando datos relevantes para la hibridación de carbón y energía solar.	(JIANG <i>et al.</i> , 2022)
(16)	Hibridación innovadora de los sistemas de toma de decisiones de triple objetivo y multicriterio de PROMETHEE-II y de dos archivos para la configuración óptima del sistema híbrido de energía renovable	Demuestra la utilidad de PROMETHEE II para optimizar configuraciones energéticas, respaldando su aplicación metodológica en este estudio.	(RIDHA <i>et al.</i> , 2023)
(17)	¿Se benefician los propietarios de viviendas cuando las centrales eléctricas de carbón cambian al gas natural? Evidencias de Pekín, China	Evalúa externalidades positivas del cambio a gas, como el aumento en el valor de propiedades cercanas, aportando al criterio social y a la conversión total a gas natural.	(MEI <i>et al.</i> , 2021)
(18)	Los costos de reemplazar los empleos de las plantas de carbón con empleos locales en lugar de distantes en eólicos y solares en los Estados Unidos	Proporciona evidencia empírica sobre la transición justa y la sustitución de empleos, alimentando el criterio social en todas las alternativas con impacto laboral.	(VANATTA <i>et al.</i> , 2022)
(19)	Descarbonización de centrales térmicas de carbón: captura y almacenamiento de carbono aplicado a un complejo termoeléctrico en Brasil	Evalúa la viabilidad técnica, regulatoria y económica de la instalación de sistemas de captura de carbono en el contexto latinoamericano.	(ROGIERI <i>et al.</i> , 2023)
(20)	Estudio experimental y análisis termodinámico de la producción de hidrógeno mediante gasificación química regenerativa de carbón en dos etapas	Sustenta la factibilidad de tecnologías avanzadas de hidrógeno, como la gasificación regenerativa, relevante para la cogeneración de carbón e hidrógeno.	(LI, HE, LI, 2019)
(21)	Análisis técnico y económico de la conversión de una central térmica de carbón existente en una central híbrida asistida por energía solar	Brinda soporte técnico y económico para justificar la integración solar en plantas de carbón, evaluando eficiencia y retorno de la inversión.	(ÇETIN, AVCI, 2020)
(22)	Conversión de carbón a biomasa como camino hacia la sostenibilidad: un escenario hipotético en la central de Pego (Abrantes, Portugal)	Estudio de caso real sobre la conversión total a biomasa en Europa, útil para estimar viabilidad operativa y económica.	(CASAU <i>et al.</i> , 2021)
(23)	Evaluación energética y económica de una planta de energía híbrida que combina carbón y energía solar	Sustenta cuantitativamente los beneficios de la hibridación de carbón y energía solar en términos de eficiencia exergética y reducción de emisiones.	(SERRANO, OLMEDA, PETRAKOPOULOU, 2019)
(24)	El retorno de las centrales de combustión térmica de carbón: viabilidad y evaluación ambiental en caso de conversión a otro combustible o modernización de un sistema de escape	Analiza estrategias para mantener la infraestructura existente mediante modernización o conversión de combustible, vinculado al criterio estructural de reutilización.	(CHICHERIN, ZHUKOV, KUZNETSOV, 2024)
(25)	Evaluación de la eficiencia de conversión de energía y la tasa de emisiones de GEI de las centrales eléctricas de carbón, gas natural y biomasa en Malasia	Ofrece valores comparativos clave sobre eficiencia energética y emisiones de CO ₂ para la conversión total a gas natural, conversión total a biomasa y hibridación de carbón y biomasa.	(AHMAD <i>et al.</i> , 2021)
(26)	Simulación numérica de la distribución de la co-combustión de hidrógeno sobre las características de combustión y la liberación de NOx en la caldera de una central eléctrica de 660 MW	Informa los desafíos técnicos y operacionales de la cogeneración de carbón e hidrógeno en calderas grandes, incluyendo efectos sobre la combustión y emisiones de NOx.	(WEI <i>et al.</i> , 2024)

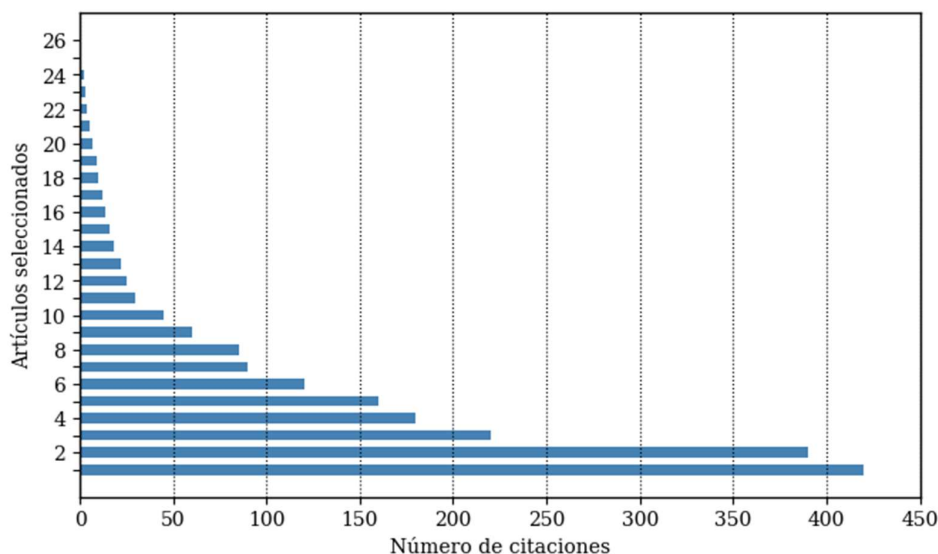
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se presenta la segunda parte de los artículos científicos seleccionados, que corresponde del artículo (14) al artículo (26). Completando así la recopilación bibliográfica, proporcionando una visión amplia y diversa sobre las posibles alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón. Los artículos incluidos abarcan diversas tecnologías y enfoques, desde la integración de energías renovables hasta métodos de captura, así como también la hibridación del carbón con otras fuentes energéticas, contribuyendo así a un análisis fundamentado dentro del estudio.

La organización del portafolio facilita su consulta posterior y respalda las decisiones metodológicas adoptadas en las siguientes etapas del estudio. Además, este conjunto bibliográfico permite establecer comparaciones, enriqueciendo la contextualización de los resultados y fortaleciendo la validez del enfoque propuesto.

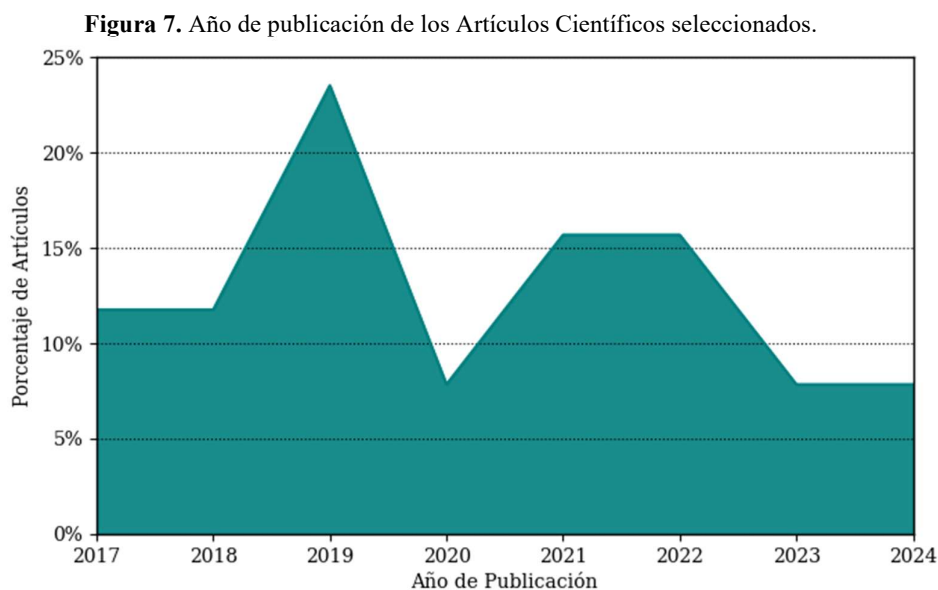
Seguidamente la Figura 6 muestra el número de citas que han recibido los 26 artículos científicos seleccionados en la revisión sistemática. Este indicador es clave para evaluar la relevancia y el impacto de cada artículo dentro del ámbito académico y tecnológico. Los artículos con un mayor número de citas suelen ser referencias fundamentales en el área, lo que sugiere que sus hallazgos han sido ampliamente utilizados y reconocidos por la comunidad científica. En el contexto de este estudio, la Figura 6 contribuye a respaldar la solidez del portafolio bibliográfico seleccionado mediante el método Proknow-C, asegurando que las fuentes utilizadas sean de alto impacto y pertinencia en la investigación sobre la reconversión de unidades generadoras a carbón. Esto refuerza la validez de los datos y metodologías aplicadas en la evaluación de alternativas para la transición energética.

Figura 6. Número de citaciones de los Artículos Científicos seleccionados



Fuente: Elaboración propia

La Figura 7 presenta la distribución de los años de publicación de los 26 artículos científicos seleccionados en la revisión sistemática. Este análisis permite identificar la actualidad y relevancia de las investigaciones utilizadas como base para el estudio. En cuanto a su contribución, la Figura 7 respalda el portafolio bibliográfico al garantizar que las fuentes seleccionadas reflejan los avances en tecnología y estrategias de descarbonización asegurando que el estudio esté fundamentado en investigaciones actualizadas, alineadas con los desafíos actuales del sector energético.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada artículo seleccionado, estos artículos han sido seleccionados por su relevancia y contribución al tema de estudio, proporcionando perspectivas valiosas sobre las alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón. Cada descripción resalta los aspectos más importantes y los resultados claves obtenidos, lo cual permite una comprensión de las distintas soluciones y enfoques presentados en la literatura actual.

Bajo ese contexto, Wang *et al.* (2017) mencionan que la reducción de emisiones de CO₂ es un desafío global en el que las centrales eléctricas de carbón representan una fuente significativa y consideran la captura de carbono por tecnología de poscombustión un método viable, destacando la absorción química como una opción implementable a corto plazo, aunque con un alto consumo energético.

Los resultados de González, Kirsten y Prchlik (2018) muestran que las centrales eléctricas a gas natural son más eficientes en términos de velocidad y emisiones menores que las plantas a carbón. Sin embargo, en su carga mínima, las plantas a gas son menos flexibles, produciendo más emisiones de NO_x y monóxido de carbono (CO) que las plantas a carbón.

El estudio realizado por Mac, Brouwer, Samuelsen (2018), muestra que reemplazar el carbón con gas natural en EE. UU. entre 1995 y 2012 redujo emisiones de CO₂ (23%), NO_x (40%) y SO₂ (44%). Además, resaltan las ventajas del gas natural en sistemas combinados de refrigeración, calefacción y energía, maximizando la eficiencia mediante el uso de calor residual. Observando que el gas natural se posiciona como un combustible "puente" hacia un futuro con menos emisiones de carbono, ofreciendo una alternativa limpia y eficiente frente al carbón.

El artículo de Calabrese *et al.* (2019) aborda la necesidad de integrar la sostenibilidad en la planificación estratégica empresarial, en consonancia con los Objetivos De Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y propone el uso del método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para priorizar los aspectos de sostenibilidad que son más relevantes, permitiendo una evaluación completa de las áreas de sostenibilidad, como responsabilidad social, medio ambiente y gobernanza.

Safari *et al.* (2019) evidencia que el gas natural es el combustible fósil más limpio y eficiente, con un contenido de carbono significativamente menor (15,3 Kg/GJ) en comparación con el carbón de coque (25,8 Kg/GJ), el carbón no coquizable (26,2 Kg/GJ) y el petróleo crudo (20 Kg/GJ). En plantas de ciclo combinado, reduce las emisiones de CO₂ a la mitad en comparación con las centrales de carbón, alcanzando eficiencias térmicas de hasta 65%. Además, el gas natural tiene el costo de capital nivelado más bajo, aproximadamente el 25% de todas las nuevas tecnologías de generación de electricidad.

Kamble *et al.* (2019) destacan que la cogasificación de carbón y biomasa emerge como una tecnología prometedora, logrando alta eficiencia termodinámica y bajas emisiones de CO₂, superando la gasificación de carbón puro. La biomasa, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, mejora la tasa de gasificación y favorece una combustión más eficiente.

Xu *et al.* (2020) evidencia que la co-combustión de biomasa con tecnología de caldera de carbón pulverizado logra una eficiencia térmica del 92% y una eficiencia de generación de energía del 45%, demostrando que la combinación de carbón y biomasa presenta ventajas tanto técnicas como económicas. Estos resultados son clave para evaluar el rendimiento de tecnologías híbridas que integran fuentes renovables en las plantas termoeléctricas existentes.

El artículo realizado por Lockwood (2017) menciona que la implementación de captura y almacenamiento de carbono enfrenta barreras significativas, especialmente en Europa, debido a altos costos y limitaciones técnicas, ya que las tecnologías actuales, como la depuración con aminas, reducen la eficiencia energética de las plantas en un 10% y pueden aumentar los costos de electricidad en hasta un 80%.

Miedema *et al.* (2017) afirma que la co-combustión de un 60% de biomasa con carbón

aumenta el transporte de masa en comparación con el uso exclusivo de carbón, pero reduce las emisiones de GEI, con una disminución del 48% en las emisiones y un aumento del 35% en la energía renovable. Sin embargo, el uso de biomasa conlleva una disminución en la eficiencia energética general y un aumento en el consumo de energía. La eficiencia total de la cadena de suministro es más alta cuando se utiliza solo carbón, con un 41,2%.

El estudio realizado por Budak *et al.* (2019) utiliza el método de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y desarrolla un enfoque sistemático que combina aportes de expertos y análisis de datos para identificar las fuentes de energía más sostenibles para tres ciudades. Las conclusiones reflejan patrones globales en la investigación y desarrollo de energías renovables.

Según Szima *et al.* (2021), las plantas de gasificación con ciclo combinado, que utilizan tecnología de combustión por conmutación de gas y el desplazamiento de agua asistido por membrana para la producción flexible de energía e hidrógeno, ofrecen una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia. Estas plantas permiten generar energía flexible, lo que mejora el rendimiento económico en comparación con las plantas convencionales. La captura de CO₂ en estas plantas tiene un costo de evitación de 25 €/tonelada, mucho más bajo que el de las plantas con captura previa a la combustión (44 €/tonelada). Además, muestran una mejora significativa en el rendimiento económico, con un aumento de hasta un 11% en la tasa de rendimiento anual debido a su capacidad para operar durante períodos de baja generación de energía renovable y vender hidrógeno al mercado. Este enfoque flexible es clave para equilibrar la variabilidad de las energías renovables, siempre que exista un mercado para el hidrógeno producido.

El artículo de Mills (2018) analiza la central de Cameo, donde se realizó un programa piloto de siete meses en el que se integró energía solar con una caldera de carbón existente. Los resultados fueron positivos, ya que la eficiencia general de la planta aumentó en más del 1%, y se redujo la demanda de carbón y las emisiones de CO₂ (~600 tCO₂), NO_x (>900 kg) y SO₂ (2450 kg). El proyecto demostró que la integración de energía solar con una unidad de carbón es factible y no interfiere con las operaciones normales de la planta. Sin embargo, la cuota solar ha sido baja debido a que la integración se realizó en plantas de carbón a menudo obsoletas. Si se diseñara una nueva planta híbrida desde el principio, se podría lograr una mayor participación solar, alcanzando entre un 30% y un 40%.

El artículo de Khanmohammadi, Kizilkan, Musharavati (2022) presenta un sistema innovador de generación de energía multigeneración alimentado por una torre solar, que integra seis subsistemas: un ciclo Brayton de recompresión de dióxido de carbono supercrítico (sCO₂), un ciclo de refrigeración por absorción amoníaco-agua, generación de hidrógeno, generación de vapor, un

proceso de secado y un generador termoeléctrico. Se evalúa termodinámicamente en tres ubicaciones: Doha (Catar), Isparta (Turquía) y Teherán (Irán). Los resultados revelan que el sistema supera en eficiencia al ciclo Brayton básico; siendo la producción de energía adicional: 64,59 kW en Doha, 47,33 kW en Isparta y 52,25 kW en Teherán; el incremento en eficiencia energética: 32,29 % (Doha y Teherán) y 32,28 % (Isparta). El análisis paramétrico demuestra que el diseño responde de manera eficaz a diversas condiciones operativas, destacando a Doha como la ubicación más favorable.

Sugiyono *et al.* (2022) menciona que Indonesia impulsa la co-combustión de biomasa en plantas de carbón para alcanzar el 23% de energía renovable en su matriz energética para 2025. Este impulso tiene un potencial de 18,1 GW en 114 plantas, y requiere 9 millones de toneladas de biomasa anuales, fomentando un mercado eficiente y sostenible. Sin embargo, es necesario desarrollar la cadena de suministro, estandarizar especificaciones técnicas y asegurar precios accesibles de electricidad. Una aceleración del 10% en la capacidad de co-combustión contribuiría a la reducción de emisiones.

Jiang *et al.* (2022) analizan el rendimiento de una central de carbón alimentada por energía solar, la cual emplea energía solar de alta temperatura para calentar el vapor de recalentamiento extraído de la caldera y energía solar de baja temperatura para calentar el agua de alimentación de la caldera. El sistema permite reducir el consumo de carbón entre 39,85 g/kWh y 35,25 g/kWh dependiendo de la carga y alcanza hasta un 28,62% de eficiencia de conversión de energía solar a electricidad a plena carga. El análisis económico muestra que el sistema es más rentable en regiones con alta radiación y en términos de protección ambiental se consigue una reducción en las emisiones de CO₂, alcanzando 526,739.55 toneladas menos de CO₂ en un año.

El estudio presentado por Ridha *et al.* (2023) muestra un enfoque mejorado utilizando el método PROMETHEE II para evaluar y clasificar configuraciones óptimas en sistemas fotovoltaicos y turbinas eólicas para suministro de energía rural, se utiliza un método combinado que incluye PROMETHEE II y un mecanismo de toma de decisiones grupales para ordenar las soluciones del Frente de Pareto (*Pareto front* - PF) obtenidas, evaluando su consistencia y estabilidad. Los resultados muestran que el enfoque propuesto logra soluciones óptimas de alta diversidad y convergencia rápida, permitiendo la clasificación y selección del sistema.

Mei *et al.* (2021) amplían la comprensión del impacto económico y ambiental de la conversión de centrales de carbón a gas natural, examinando, los efectos en la calidad del aire y el valor de las propiedades cercanas. Mediante un modelo de triple diferencia aplicado a datos inmobiliarios (2011-2015) y registros de centrales, identificaron que esta transición incrementó en 11% el precio de las propiedades adyacentes, por mejoras en la calidad del aire. Específicamente, se registró una

disminución del 4,9% en el material particulado (*Particulate Matter* – PM) y del 5,2% en las emisiones de SO₂.

El estudio de Vanatta *et al.* (2022) propone un modelo de optimización para analizar la viabilidad técnica y los costos asociados con la sustitución de empleos en plantas de carbón por empleos locales en las industrias de energía eólica y solar, promoviendo una transición energética justa. Los resultados muestran que es factible reemplazar la generación de carbón y los empleos correspondientes con inversiones locales en energías renovables en los Estados Unidos. Aunque el emplazamiento local de las energías renovables aumenta los costos de reemplazo en un 5% a un 33%, estos costos son relativamente modestos en comparación con los costos generales de la transición energética. Este estudio contribuye a la literatura sobre la transición justa al explorar los factores técnicos, económicos y sociales involucrados en la sustitución de empleos en las plantas de carbón.

El estudio presentado por Rogieri *et al.* (2023) evalúa la viabilidad de implementar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC) en el Complejo Termoeléctrico Jorge Lacerda, el mayor generador de energía a carbón en Brasil, considerando aspectos regulatorios, ambientales, financieros y sociales. Los resultados indican que la CAC podría ser una solución sostenible, dependiendo del desarrollo de marcos regulatorios, financiamiento e infraestructura. Este modelo podría replicarse en otras plantas para promover estándares de bajas emisiones de carbono.

El hidrógeno, considerado un combustible estratégico limpio está ganando mayor relevancia, el estudio de Li, He y Li (2019) propone un proceso innovador de producción de hidrógeno basado en una gasificación de carbón regenerativa química, que reemplaza la gasificación tradicional con un enfoque en dos etapas; coquización y gasificación con vapor. Este diseño recupera el 15 a 20% del calor sensible del gas de síntesis mediante reacciones termoquímicas y elimina la necesidad de una unidad de separación de aire al utilizar vapor como oxidante. Como resultado, la eficiencia de conversión de carbón a hidrógeno mejora del 58,9% al 71,6%, y el consumo energético disminuye de 183,8 MJ/kg a 151,2 MJ/kg.

Çetin y Avci (2020) analizan la viabilidad técnica y económica de integrar sistemas solares de concentración en una central eléctrica de carbón existente. En términos económicos, el período de recuperación de la inversión depende de las emisiones y el ahorro de combustible. Se encontró que el ahorro máximo anual de combustible es de 7003,667 toneladas y las emisiones se reducen en 7748,849 toneladas de CO₂ al año. El estudio también revela que el periodo de amortización podría ser de 7 años si el precio unitario del campo solar es de 132 €/m² o si el soporte de las energías renovables es de 0,225 €/kWh.

La investigación de Casau *et al.* (2021) examina la viabilidad de reemplazar el carbón por

biomasa en la Central Eléctrica de Pego, determinó que el volumen necesario de biomasa para mantener la planta funcionando exclusivamente con biomasa es de 904.862 toneladas de biomasa seca, lo que es mucho menor al volumen de crecimiento anual de biomasa de especies locales como el pino marítimo y el eucalipto. La transición a biomasa reduciría las emisiones de GEI en comparación con el carbón. En 2019, la central de Sines utilizó 1.412.339 toneladas de carbón, lo que representó el 12% de las emisiones nacionales de GEI, mientras que la planta de Pego utilizó 689.419 toneladas, con un 5% de las emisiones. Además, la reestructuración industrial, transformando la planta de carbón a biomasa, puede ayudar a mitigar el impacto económico y social en la región del Medio Tajo, donde la tasa de desempleo era del 5,6% en 2020.

Serrano, Olmeda y Petrakopoulou (2019) mencionan que las plantas de energía híbridas, que combinan fuentes convencionales y renovables, son una solución prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y optimizar la generación eléctrica. Analizan la viabilidad termodinámica y económica de una planta híbrida que integra una planta de carbón con un campo de torres solares, comparándola con una planta de carbón convencional de similar capacidad. Los resultados muestran que la planta híbrida reduce las emisiones y el consumo de combustible en un 4,6%, alcanzando una eficiencia exergética del 35,8%, 1,6 puntos porcentuales más alta que la de la planta de carbón convencional. Sin embargo, el costo de capital por kilovatio para la planta híbrida es significativamente mayor (8050,32 \$/kW frente a 5979,69 \$/kW para la planta de carbón), debido al equipo adicional necesario. El costo nivelado de la electricidad de la planta híbrida es de 0,19 \$/kWh, reduciéndose a 0,12 \$/kWh cuando opera exclusivamente con carbón.

El estudio de Chicherin, Zhukov y Kuznetsov (2024) evalúa mejoras en unidades generadoras a carbón desde las perspectivas ambiental y económica, analizando la conversión a gas natural y biomasa. Se consideran el consumo de energía, costos y reducción de emisiones CO₂ y PM. Los resultados destacan que la biomasa reduce un 50% las emisiones de CO₂, mientras que el gas natural genera menos PM y emisiones más limpias en general. La combinación de filtración avanzada y desulfuración ofrece la mayor reducción de emisiones (43%), aunque requiere una inversión significativa de 14,2 mil millones de euros. Estas alternativas permiten cumplir estándares ambientales y diversificar fuentes de combustible.

Ahmad *et al.* (2021) compararon el desempeño energético y ambiental de centrales de carbón, gas natural y biomasa. Los resultados indican que la central de biomasa tuvo la menor eficiencia energética (6,47%), mientras que la central de gas natural con turbina de ciclo combinado destacó con la mayor eficiencia (48,35%) y una tasa de emisión de 0,32 kg de CO₂e/kWh.

El estudio de Wei *et al.* (2024) simuló la co-combustión de hidrógeno y carbón en una planta

de 660 MW, analizando temperatura, combustión y emisiones. Una mayor altura de inyección de hidrógeno redujo la diferencia de temperatura en la zona principal, mientras que una menor altura aumentó las emisiones de NOx. El coeficiente de aire óptimo fue 1,15, minimizando el impacto en el horno. Los resultados destacan que las propiedades del hidrógeno afectan significativamente la combustión.

En general, los estudios tienden a analizar cada alternativa de forma aislada, sin integrar múltiples criterios relevantes como madurez tecnológica, viabilidad económica, impacto ambiental y adecuación a infraestructuras existentes, dentro de un marco comparativo estructurado. Esta fragmentación dificulta la identificación de soluciones óptimas en contextos con restricciones específicas, como los países en desarrollo. Por ello, se identifica la necesidad de aplicar métodos multicriterio integradores, que permitan evaluar de manera jerárquica, ponderada y contextualizada las alternativas de reconversión energética más viables, superando así las limitaciones metodológicas observadas en la literatura existente. La literatura actual sobre reconversión de plantas termoeléctricas a carbón presenta enfoques fragmentados, donde muchos estudios abordan soluciones tecnológicas específicas sin articular evaluaciones comparativas integradas.

Por lo que, el presente estudio propone un marco que combina AHP y PROMETHEE, lo que permite no solo ponderar criterios con base en comparaciones por pares validadas (AHP), sino también generar un ordenamiento robusto y visualmente interpretable de las alternativas (PROMETHEE). Esta combinación metodológica responde directamente a las limitaciones observadas en la literatura, ofreciendo una herramienta reproducible, sensible a dimensiones y ajustable a contextos con restricciones estructurales y sociales.

4.2. REVISIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

En esta sección, se presenta el proceso de búsqueda, análisis y descripción de los registros internacionales de patentes de propiedad intelectual. Tal actividad es estratégica para la planificación de la presente investigación que tiene como propósito el estudio de las alternativas para la reconversión de las unidades generadoras carbón. Considerando la generalidad comúnmente utilizada en las solicitudes y registros de propiedad intelectual, con el fin de expandir el alcance de la investigación, se describe el proceso de búsqueda de patentes relativas a métodos, dispositivos y sistemas otorgados internacionalmente y relacionados con el tema.

Para la investigación se utilizó como bases de datos; *Patenscope* de *World Intellectual Property Organization* (WIPO) y *Google Patents*. Se utilizó operadores booleanos “OR” y “AND” en la combinación de palabras claves entre los ejes. Para los ejes de investigación y PC seleccionadas,

se realizó la prueba de adherencia para verificar si las palabras clave elegidas son asertivas y verificar la posibilidad de reducir el número de combinaciones.

La búsqueda inicial arrojó un total de 1.255 resultados, seguidamente al obtener los resultados se llevó a cabo un riguroso proceso de filtrado, en el que se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para garantizar la relevancia y calidad de los documentos. Los criterios de inclusión comprendieron términos de búsqueda en texto completo, alineación del título, reconocimiento científico y alineación al tema. Los criterios de exclusión incluyeron documentos redundantes y repetidos como aquellos con fecha de publicación anterior al umbral definido. Siendo estructurado el proceso de filtrado en tres etapas.

La Primera etapa – Filtro de redundancia y alineación temática: en esta fase inicial se eliminaron documentos duplicados y se evaluó la correspondencia del título con el tema de estudio. Los criterios de inclusión comprendieron patentes cuyo título guardaba una relación directa con la temática de investigación, los criterios de exclusión incluyeron patentes redundantes o repetidas. Resultando en 516 patentes seleccionadas.

La Segunda etapa – Filtro de reconocimiento científico y temporalidad: en esta fase se aplicaron criterios de calidad y actualidad, considerando la clasificación científica y la fecha de publicación. Los criterios de inclusión comprendieron patentes con reconocimiento en estratos A1, A2, A3, A4, B1 o B2. Los criterios de exclusión incluyeron patentes publicadas antes del año 2017. Resultando posteriormente al filtro aplicado en 107 patentes seleccionadas.

La Tercera etapa – Filtro de alineación temática específica: en esta fase se realizó una revisión detallada del contenido para verificar su pertinencia con el objeto de estudio. Los criterios de inclusión comprendieron patentes alineadas específicamente con los objetivos de la investigación. Resultando en 13 patentes seleccionadas para el análisis final.

Estas patentes han sido organizadas en la Tabla 6 según el nombre de la patente, su número y el Reconocimiento Científico (RC) asociado a cada una. Esta organización permite una evaluación detallada y sistemática de las tecnologías relacionadas con las unidades generadoras a carbón. La selección de estas patentes es de gran importancia, ya que reflejan avances significativos en el campo. Además, permiten identificar tendencias tecnológicas emergentes, enfoques innovadores aplicados en otros contextos, y posibles soluciones que pueden ser adaptadas o transferidas. Su análisis en conjunto con la literatura científica aporta una visión integral que refuerza la solidez del proceso de selección de alternativas de reconversión. Esta complementariedad entre fuentes científicas y tecnológicas amplía la perspectiva del estudio, fortalece la base de conocimiento y respalda la elección de soluciones con mayor potencial de implementación.

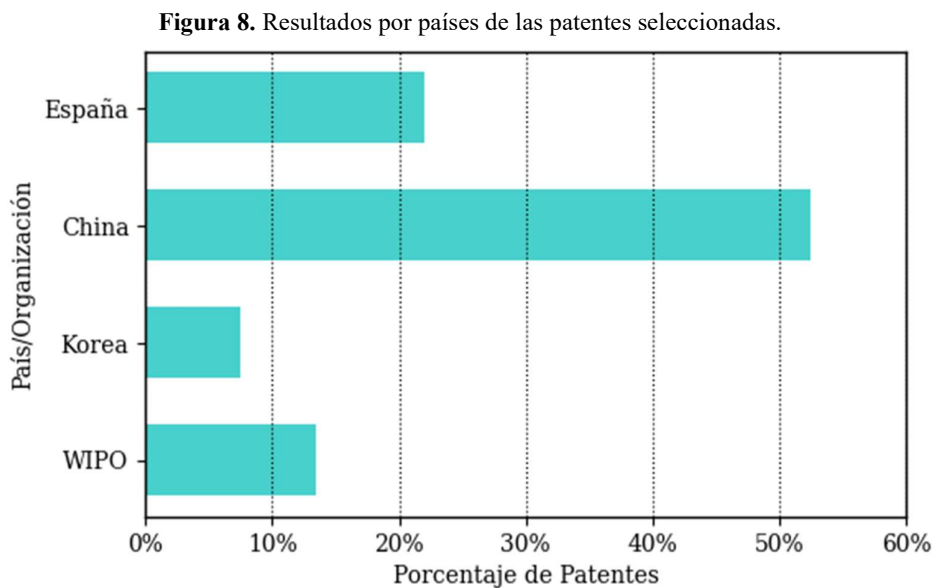
Tabla 6. Patentes seleccionadas.

Ítem	Patente	RC	Disponible en	Referencia
(1)	Sistema de integración sinérgica de fuentes de electricidad de origen renovable no gestionable y bombas de calor de dióxido de carbono en centrales termoeléctricas. ES2893976	B2	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(ROVIRA <i>et al.</i> , 2022)
(2)	Método de combustión para líquido rico en hidrógeno de alta concentración. WO2019131765	A2	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(MOTAI, WADA, 2019)
(3)	Método de programación de optimización del sistema de captura de CO2 para centrales eléctricas de carbón a gran escala basado en inteligencia artificial. CN113341716	B	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(MINGLIANG, PEIZHI, 2021)
(4)	Central eléctrica de carbón que acopla el método de generación de energía de combustión directa de biomasa. CN110388639	A	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(CHENGJUN, 2019)
(5)	Método y sistema de cálculo para la reducción de las emisiones de CO2 de la biomasa de co-combustión de una central eléctrica de carbón. CN116502393	A	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(XIAODONG <i>et al.</i> , 2023)
(6)	Sistema y procedimiento de captura y almacenamiento de dióxido de carbono de los gases de combustión. ES2618290	B1	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(FERREIRO, 2017)
(7)	Planta termoeléctrica alimentada con calor ambiental y enfriada mediante regasificación de gas natural licuado. ES2580879	B2	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(ROMERO, 2017)
(8)	Sistema de generación y funcionamiento de energía solar de tipo recalentamiento secundario y método de operación. CN109185085	B	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(YONG <i>et al.</i> , 2019)
(9)	Caldera de central eléctrica de carbón de tipo ganancia de energía solar acoplada al extremo de la fuente. CN113091041	A	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(LIN <i>et al.</i> , 2021)
(10)	Sistema integrado de ahorro de carbón con calor solar de torre de alta temperatura que complementa la planta de energía alimentada por carbón. CN106918030	A	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(LIQIANG <i>et al.</i> , 2017)
(11)	Sistema para llevar a cabo la emisión de bajo contenido de carbono de una planta de energía quemada por carbón al tomar como portador hidrógeno verde. CN118300174	A	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(YANCHAO <i>et al.</i> , 2024)
(12)	Combustible moldeado con biomasa de alto calorífico para sustitución del carbón para central termoeléctrica mediante el uso de subproducto de aceite vegetal y técnica de moldeo por compresión de alta eficiencia y método para su fabricación. KR1020200069865	A	<i>Patenscope</i>	(SEONG <i>et al.</i> , 2020)
(13)	Sistema para la producción circular de hidrógeno y oxígeno con retroalimentación de residuos de energías térmicas, recuperados en la etapa del motor stirling y en la etapa de electrólisis. WO2023035089	A1	<i>Patenscope</i> <i>Google Patents</i>	(HERNÁNDEZ, 2023)

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a los países de origen de las patentes seleccionadas, los cuales se detallan en la Figura 8. Esta visualización permite observar la distribución geográfica de las patentes, proporcionando una perspectiva clara sobre los países más activos en la innovación relacionada con las alternativas de reconversión. Este análisis resulta fundamental para identificar los principales centros de innovación y evaluar la pertinencia de los

avances tecnológicos en el ámbito energético global. Permite resaltar a los países que están liderando de manera activa la transición energética, lo que subraya su papel clave en la promoción de soluciones sostenibles y en el impulso de cambios hacia fuentes de energía más eficientes.



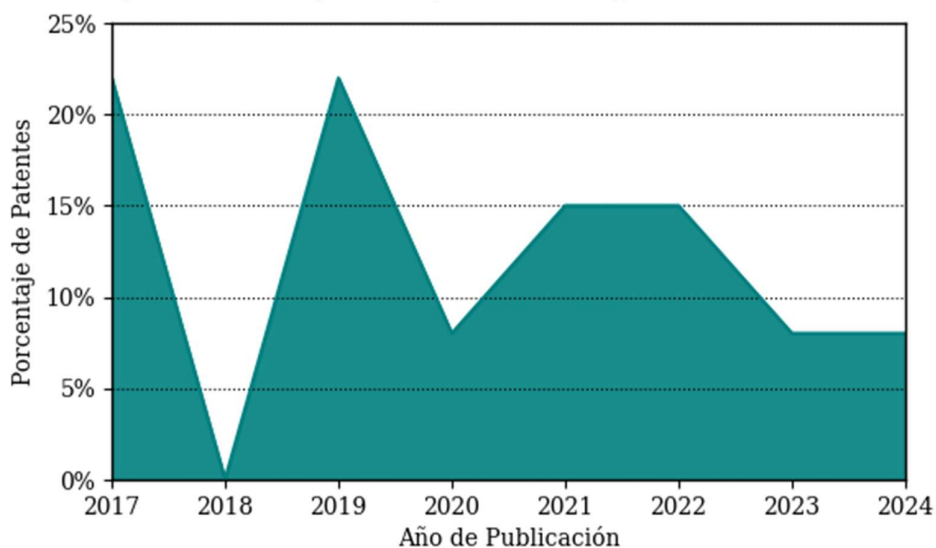
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9 se presentan los resultados relativos a los años de publicación de las patentes seleccionadas, los cuales ofrecen una visión detallada del tiempo de evolución de las innovaciones tecnológicas en el ámbito energético, proporcionando una comprensión más profunda sobre las tendencias de desarrollo tecnológico a lo largo del tiempo y su impacto en el contexto de la transición energética. Este gráfico resulta clave para analizar la evolución temporal de las tecnologías, permitiendo identificar si su desarrollo ha sido constante. Esta información es fundamental para evaluar la vigencia y relevancia de las tecnologías identificadas, proporcionando una perspectiva sobre su potencial impacto en la transición hacia un modelo energético más sostenible.

Seguidamente, se presenta el gráfico que muestra los resultados según el Reconocimiento Científico (RC) al cual corresponden las patentes seleccionadas, el cual se ilustra en la Figura 10. Este gráfico ofrece una visión clara de la distribución del reconocimiento científico entre las patentes analizadas, permitiendo identificar aquellas que han tenido un mayor impacto en la comunidad académica. El Reconocimiento Científico es un indicador clave para evaluar la relevancia y el grado de citación de las patentes en estudios científicos, lo que refleja su contribución al desarrollo del conocimiento en el área. Estos resultados son fundamentales para destacar las tecnologías con una base científica sólida y un alto potencial de aplicación, facilitando la identificación de desarrollos con mayor respaldo académico y relevancia en la investigación. Este enfoque proporciona un valor

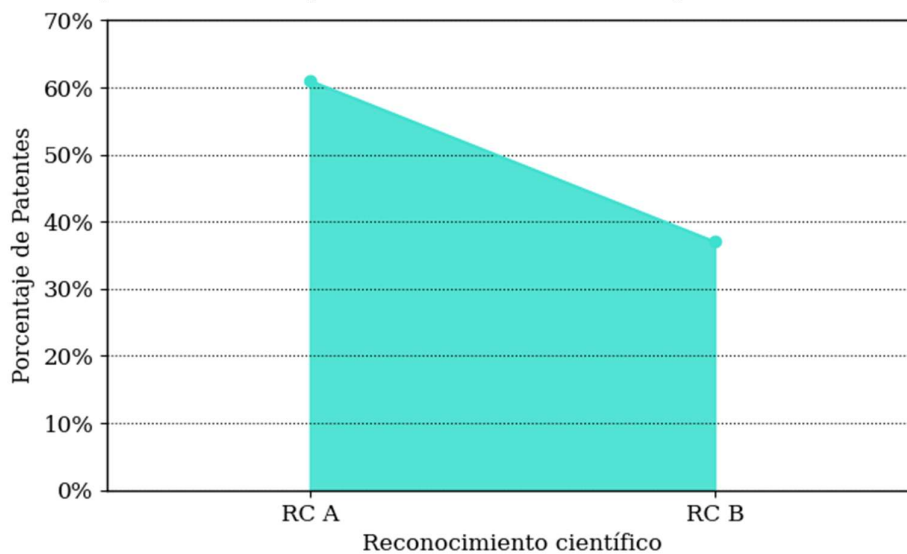
significativo al análisis tecnológico, permitiendo una toma de decisiones más informada en el proceso de selección e implementación de soluciones innovadoras.

Figura 9. Resultados por año de publicación de las patentes seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Resultados por reconocimiento científico de las patentes seleccionadas.

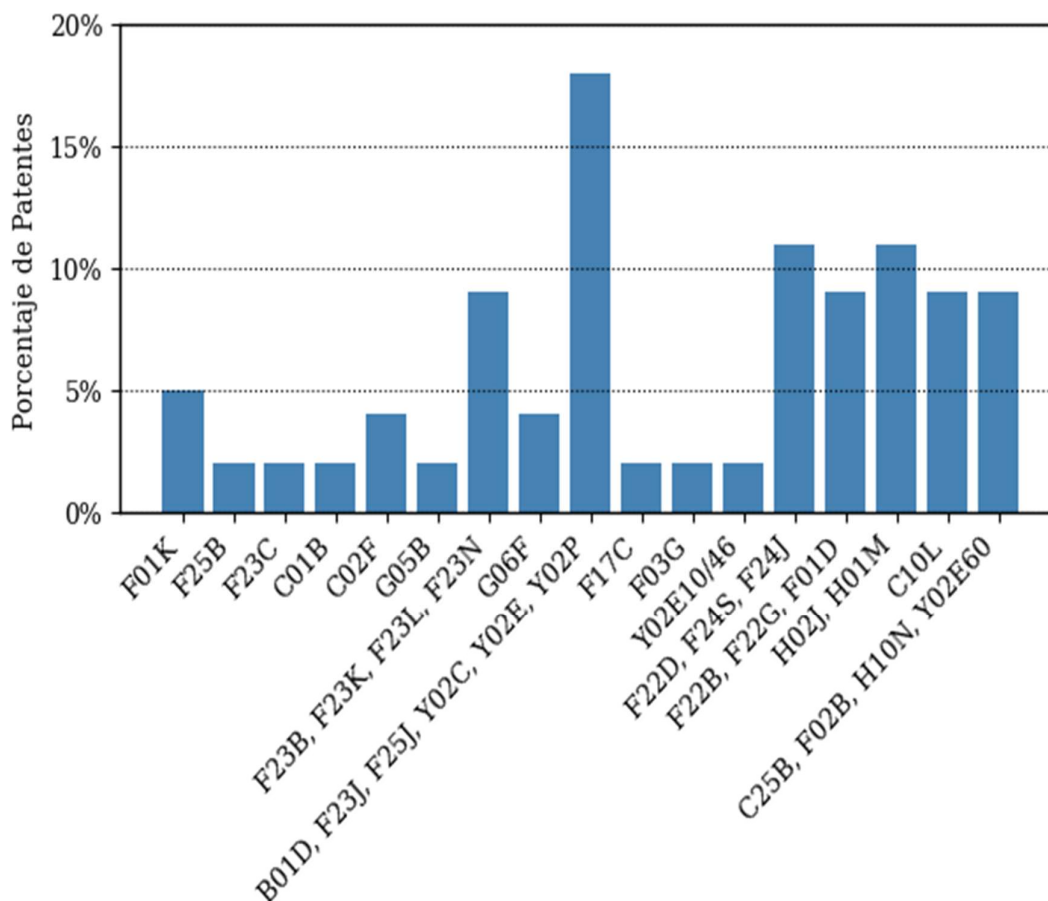


Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presenta el gráfico que ilustra los resultados según la clasificación internacional de las patentes seleccionadas, el cual se detalla en la Figura 11. Este gráfico ofrece una visión clara de cómo se distribuyen las patentes en diferentes categorías internacionales, permitiendo identificar las áreas tecnológicas predominantes. La clasificación internacional de patentes es un indicador clave para evaluar las tendencias y la especialización tecnológica de los desarrollos más

relevantes en este ámbito.

Figura 11. Resultados por clasificación internacional de las patentes seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia

Estos resultados son fundamentales para identificar áreas clave de innovación y desarrollo tecnológico, permitiendo destacar aquellas tecnologías con un mayor potencial de implementación inmediata. Este enfoque proporciona un valor significativo al proceso de búsqueda de soluciones tecnológicas viables y de fácil adopción, facilitando la toma de decisiones informadas.

A continuación, se presenta la Tabla 7, que ofrece una descripción general de la clasificación de las patentes seleccionadas. Esta tabla organiza y detalla las patentes en función de su clasificación internacional, proporcionando una visión clara de las áreas tecnológicas específicas en las que se han centrado los desarrollos. Esta información es crucial, ya que permite identificar las tendencias y las áreas de mayor innovación dentro del sector energético. Además, facilitar la evaluación de la aplicabilidad de las tecnologías en diferentes contextos, lo que resulta clave para determinar su potencial de implementación y contribución.

Tabla 7. Descripción de la clasificación de las patentes seleccionadas

Clasificación	Descripción General
F01K	Máquinas o motores de vapor; plantas de energía de vapor.
F25B	Máquinas, plantas o sistemas de refrigeración.
F23C	Combustión de combustibles; quemadores.
C01B	Química inorgánica; compuestos inorgánicos.
C02F	Tratamiento de agua, aguas residuales o lodos.
G05B	Sistemas de control o regulación.
F23B, F23K, F23L, F23N	Combustión de combustibles sólidos; alimentación de combustibles; control de combustión.
G06F	Procesamiento de datos; sistemas informáticos.
B01D, F23J, F25J, Y02C, Y02E, Y02P	Separación de gases; captura de carbono; tecnologías ambientales.
F17C	Almacenamiento o distribución de gases o líquidos.
F03G	Motores de energía no mecánica (por ejemplo, energía solar).
Y02E10/46	Tecnologías de energía solar térmica.
F22D, F24S, F24J	Calentamiento de agua; sistemas de energía solar.
F22B, F22G, F01D	Generación de vapor; turbinas.
H02J, H01M	Sistemas de almacenamiento y distribución de energía; pilas de combustible.
C10L	Combustibles líquidos; combustibles no fósiles.
C25B, F02B, H10N, Y02E60	Electrólisis; motores de combustión interna; termoelectricidad; tecnologías de energía.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta cada patente que se encuentran en la Tabla 6, con la numeración correspondiente del (1) al (13), se exponen las patentes seleccionadas, con el fin de profundizar en su relevancia e impacto dentro de la investigación,

- (1) ES2893976. Sistema de integración sinérgica de fuentes de electricidad de origen renovable no gestionable y bombas de calor de dióxido de carbono en centrales termoeléctricas. La patente aborda un sistema que integra eficientemente energía renovable a una central termoeléctrica convencional. Este sistema utiliza una fuente renovable intermitente que incluye: un área de paneles fotovoltaicos, un sistema de almacenamiento térmico, una bomba de calor de dióxido de carbono supercrítico y un intercambiador de calor de descarga. Su objetivo es añadir energía sostenible a la central (ROVIRA *et al.*, 2022).
- (2) WO2019131765. Método de combustión para líquido rico en hidrógeno de alta concentración. La invención propone un líquido auxiliar de combustión de alta concentración de hidrógeno, diseñado para su uso en diversas aplicaciones industriales como plantas de energía a carbón, plantas de biomasa, plantas siderúrgicas y calderas de gran escala. Este líquido, derivado de agua enriquecida con hidrógeno, es seguro, económico, y puede producirse en masa con un suministro estable a largo plazo. Además, su utilización elimina la emisión de CO₂ y la generación de cenizas residuales, lo que lo convierte en una solución innovadora (MOTAI, WADA, 2019).

- (3) CN113341716. Método de programación de optimización del sistema de captura de CO₂ para centrales eléctricas de carbón a gran escala basado en inteligencia artificial. La invención describe un método basado en inteligencia artificial para optimizar la programación del sistema de captura de CO₂ en centrales eléctricas de carbón a gran escala. La optimización se realiza mediante un enfoque bayesiano, lo que permite resolver la función objetivo de forma eficiente y en tiempo real, considerando la economía, la seguridad y la sostenibilidad ambiental del sistema. Como resultado, este método posibilita la reducción de costos operativos totales y mejora el rendimiento económico y ambiental del sistema de captura de CO₂, contribuyendo significativamente a la descarbonización y al cumplimiento de los objetivos globales (MINGLIANG, PEIZHI, 2021).
- (4) CN110388639. Central eléctrica de carbón que acopla el método de generación de energía de combustión directa de biomasa. La invención presenta un método para generar energía mediante la combustión directa de biomasa acoplada a una central eléctrica a carbón. Este enfoque combina materiales de biomasa, como residuos agrícolas y forestales, con carbón pulverizado en las etapas de pretratamiento y combustión. La mezcla combinada es transportada a una cámara de combustión, donde se utiliza para la generación de energía. Este método permite integrar biomasa y carbón en un sistema de generación de energía compartida, optimizando la combustión y reduciendo el impacto ambiental (CHENGJUN, 2019).
- (5) CN116502393. Método y sistema de cálculo para la reducción de las emisiones de CO₂ de la biomasa de co-combustión de una central eléctrica de carbón. La presente invención; calcula el ahorro de carbón con base en la energía generada por la biomasa y estima la cantidad de carbón que es reemplazada; calcula la reducción de CO₂ usando el ahorro de carbón, el contenido elemental de carbono en el mismo y la tasa de oxidación del carbono, determinado la disminución en las emisiones de dióxido de carbono tras la combustión mixta. Proporciona un método de balance de calor aplicando un modelo de balance energético para evaluar de manera equivalente el reemplazo de carbón con biomasa y calcular la reducción de emisiones asociadas (XIAODONG *et al.*, 2023).
- (6) ES2618290. Sistema y procedimiento de captura y almacenamiento de dióxido de carbono de los gases de combustión. La patente aborda un sistema y su procedimiento; diseñados con el objetivo de capturar y almacenar el dióxido de carbono procedente de los gases de combustión generados por unidades termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles, como carbón, fuel oil, diésel, gasolina, etanol y gas natural. Este sistema representa un avance significativo en la mitigación de emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo a la transición hacia prácticas energéticas más sostenibles (FERREIRO, 2017).

- (7) ES2580879. Planta termoeléctrica alimentada con calor ambiental y enfriada mediante regasificación de gas natural licuado. La planta termoeléctrica de esta invención se centra en la generación de energía eléctrica utilizando calor ambiental de fuentes como el agua de mar, ríos, lagos o aire atmosférico, y emplea la regasificación del gas natural licuado como método de enfriamiento, su objetivo es optimizar este proceso de regasificación para funcionar como sistema de enfriamiento, aprovechando el calor residual y el calor ambiental. (ROMERO, 2017).
- (8) CN109185085. Sistema de generación y funcionamiento de energía solar de tipo recalentamiento secundario y método de operación. La invención describe un sistema híbrido que combina energía solar con generación de energía en centrales eléctricas de carbón mediante un proceso de recalentamiento secundario. Este sistema incluye un campo de captación solar, conectados de manera que el calor solar se utiliza para recalentar el vapor. Esto aumenta la eficiencia de generación de energía al elevar la temperatura media de absorción de calor y mejora el rendimiento térmico del sistema. Además, mejora la eficiencia de conversión de la energía solar en electricidad. La tecnología busca complementar las capacidades de generación de energía a carbón con la integración de energía solar, promoviendo así un enfoque más sostenible y eficiente (YONG et al, 2019).
- (9) CN113091041. Caldera de central eléctrica de carbón de tipo ganancia de energía solar acoplada al extremo de la fuente. La invención detalla una caldera para centrales eléctricas a carbón que incorpora un sistema de ganancia solar acoplado en su extremo de fuente. Este diseño incluye un colector de calor solar, un calentador de alta presión, una cámara de combustión, una bomba de alimentación de agua y una válvula reguladora. El colector de calor solar y el calentador de alta presión están conectados mediante una tubería que lleva el calor a la cámara de combustión. El agua deseada es conducida por una bomba de alimentación y dividida en dos trayectos: uno hacia el colector de calor solar a través de una válvula reguladora y otro hacia el calentador de alta presión. Este diseño permite un acoplamiento eficiente entre la energía solar y la caldera de carbón (LIN et al., 2021).
- (10) CN106918030. Sistema integrado de ahorro de carbón con calor solar de torre de alta temperatura que complementa la planta de energía alimentada por carbón. La invención presenta un sistema integrado de ahorro de carbón que combina el uso de calor solar de tipo torre de alta temperatura con una central eléctrica alimentada por carbón. El sistema aprovecha un esquema de dos etapas que incluye sobrecalentamiento y recalentamiento simultáneos del vapor, aumentando la temperatura de recolección de calor solar mediante un colector tipo torre. Este diseño aborda los problemas de fluctuaciones en la turbina de vapor al introducir calor solar en el

sistema, estabilizando su funcionamiento. Además, mejora la eficiencia de utilización del calor solar de alta temperatura, optimizando las ventajas termodinámicas y económicas respecto a sistemas integrados tradicionales (LIQIANG *et al.*, 2017).

- (11) CN118300174. Sistema para llevar a cabo la emisión de bajo contenido de carbono de una planta de energía quemada por carbón al tomar como portador hidrógeno verde. Esta invención describe; la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis alimentada por fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento y transporte de hidrógeno, esenciales para garantizar su disponibilidad y uso eficiente, celdas de combustible de hidrógeno, que generan energía limpia complementando la producción eléctrica, captura y conversión de CO₂ en productos químicos verdes como metanol y amoníaco. El sistema propuesto transforma el CO₂ emitido por plantas de carbón en productos químicos sostenibles, reduciendo significativamente las emisiones de carbono y acercándose a un modelo de "carbonización cero" en la generación de energía y en la producción de combustibles (YANCHAO *et al.*, 2024).
- (12) KR102020006986512. Combustible moldeado con biomasa de alto calorífico para sustitución del carbón en centrales termoeléctricas mediante el uso de subproducto de aceite vegetal y técnica de moldeado por compresión de alta eficiencia y método para su fabricación. La invención desarrolla un combustible moldeado de biomasa (4.000-4.300 kcal/kg) para reemplazar carbón en termoeléctricas, superando la 3.900 kcal/kg de biombras convencionales. El proceso incluye: secado para controlar humedad, mezcla con aceites vegetales mediante agitación térmica, y compresión para moldear el producto. Posteriormente, se enfría para eliminar calor por fricción y se clasifica para remover defectos. Este método garantiza alta productividad y calidad, siendo idóneo para uso termoeléctrico (SEONG *et al.*, 2020).
- (13) WO2023035089. Sistema para la producción circular de hidrógeno y oxígeno con retroalimentación de residuos de energías térmicas, recuperados en la etapa del motor Stirling y en la etapa de electrólisis. La invención describe un sistema compuesto por subsistemas que convierten la energía calórica residual en electricidad para alimentar un electrolizador de hidrógeno. El uso de tecnologías del hidrógeno representa un cambio significativo en la forma de utilizar la energía, al ofrecer mayor eficiencia y reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Su capacidad de almacenamiento lo convierte en un complemento ideal para fuentes de energía renovable que operan de manera intermitente, como la energía solar o eólica (HERNÁNDEZ, 2023).

Esta etapa de mapeo de literatura y patentes desempeña un papel fundamental en la identificación de tecnologías de alto potencial, respaldadas por el rigor científico y la madurez

tecnológica. Proporcionando una base sólida para las siguientes etapas del estudio, garantizando que la toma de decisiones se base en evidencia sólida y actualizada, tanto del ámbito académico como industrial.

4.3. ANÁLISIS DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Con base en los resultados obtenidos, en la investigación de anterioridad de la propiedad intelectual y de la literatura científica, se busca obtener las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, mediante la categorización de los resultados obtenidos. Este proceso permite agrupar las tecnologías según su enfoque funcional y tipo de fuente energética involucrada. De este modo, se logra una organización más clara y coherente de las posibles soluciones, facilitando su análisis en las siguientes etapas de la investigación.

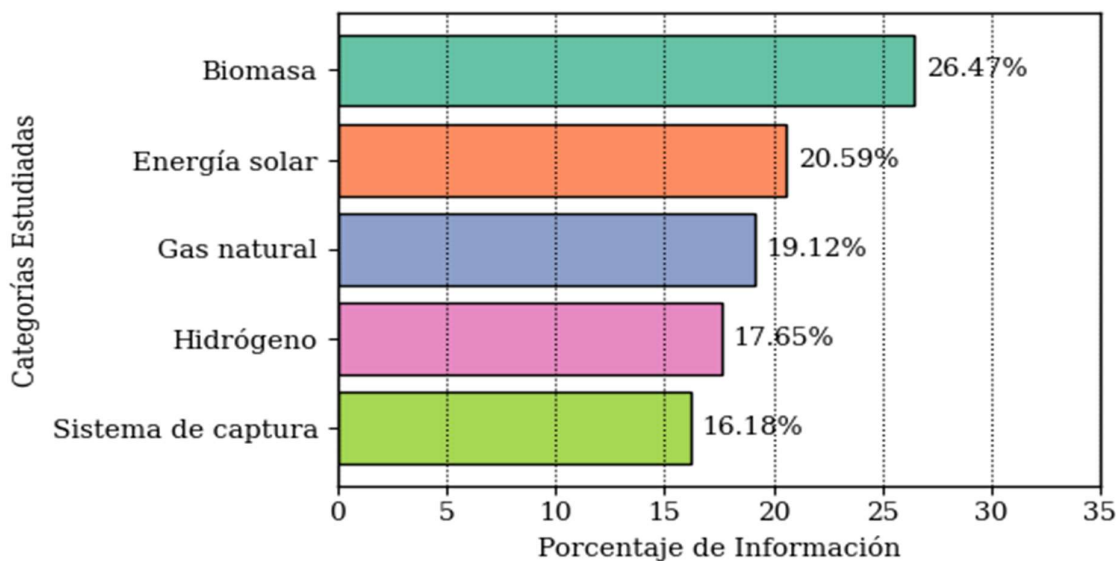
En el proceso de categorización se utilizó la herramienta *Voyant Tools*, la cual se puede aplicar para identificar temas en textos científicos; ampliar las posibilidades de lectura de textos de varios autores; identificar las palabras más enunciadas y observar cómo cambiaron las palabras en diferentes períodos de la obra de los autores. En este estudio se utilizó la herramienta para la identificación de las palabras más enunciadas, para las cuales se realizaron pruebas verificando si las palabras son asertivas, tomando la posibilidad de reducir el número de palabras conectoras, considerando las palabras más asertivas conforme el tema investigado. Este procedimiento permitió identificar patrones de lenguaje técnico frecuentes y facilitar la agrupación temática de los documentos. Además, contribuyó a reforzar la coherencia del análisis al enfocar la atención en términos clave vinculados directamente a las tecnologías de reconversión energética.

Inicialmente, el análisis se centró en los primeros 75 términos más enunciados, con el objetivo de obtener un panorama general sobre los conceptos predominantes en los textos analizados. Posteriormente, para lograr una visión más precisa y enfocada en las ideas clave, se depuró el conjunto a los 25 términos más representativos, como se muestra en la Figura 12. Esta depuración permitió refinar el proceso de categorización, facilitando la identificación de las alternativas más relevantes para la reconversión de las unidades generadoras a carbón. Al reducir la cantidad de términos, se fortaleció la coherencia temática del análisis y se estableció conexiones más claras entre los términos técnicos y las posibles aplicaciones tecnológicas dentro del marco de la transición energética.

El análisis léxico del estudio reveló que las palabras con mayor frecuencia de enunciación y relevancia conceptual fueron las siguientes: carbón (como eje central de la investigación), central (referido a las plantas generadoras), energía (en su contexto global), eléctrica (como forma de energía), combustión (mecanismo de generación), solar (fuente renovable), gas natural (como

Posteriormente, al cuantificar las categorías estudiadas, se determina el porcentaje de documentos correspondiente a cada una de ellas. Este análisis integró tanto los artículos como las patentes, lo que permitió obtener una visión más completa y representativa de la distribución de la información. Los resultados de esta cuantificación se presentan en la Figura 13, facilitando una comprensión clara de cómo se distribuyen los contenidos relevantes a lo largo de las diferentes fuentes consideradas en la investigación. Esta representación gráfica permite identificar las tecnologías con mayor respaldo en la literatura y aquellas que, aunque emergentes, presentan un crecimiento en el ámbito de la innovación. Este análisis fortalece el proceso de selección de alternativas al basarse en evidencia cuantitativa proveniente de fuentes complementarias.

Figura 13. Distribución de patentes y artículos por cada categoría.



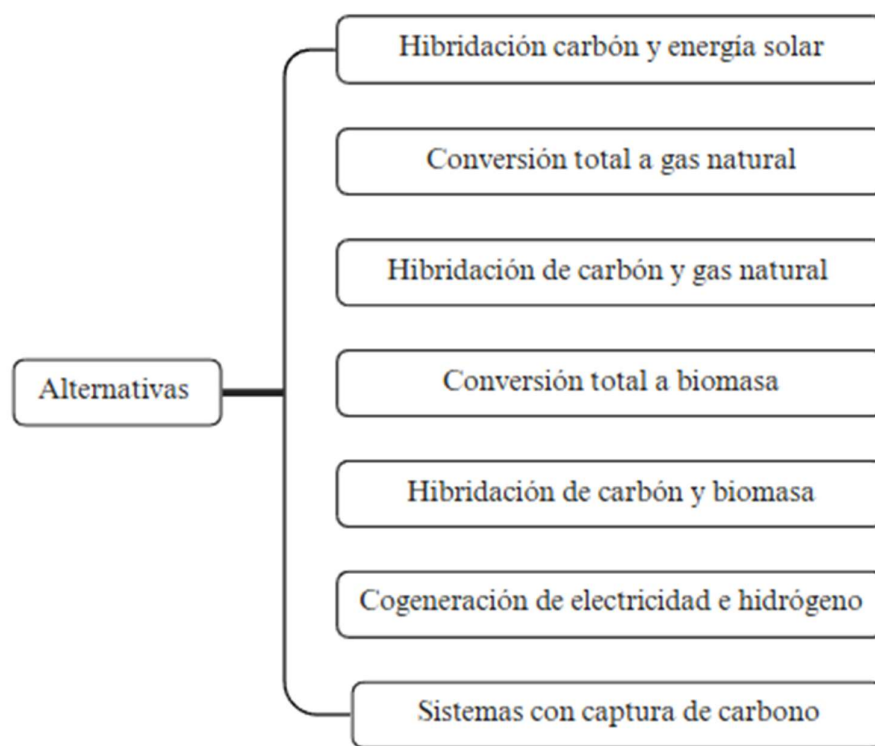
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, mediante la lectura exhaustiva de los documentos seleccionados y un análisis minucioso de su contenido, se identificaron las posibles alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, conforme a los enfoques abordados en la revisión sistemática. El proceso implicó no solo la extracción de términos clave, sino también la interpretación del contexto en el que las alternativas fueron propuestas o implementadas. Esta etapa resultó fundamental para consolidar un conjunto representativo de opciones de reconversión que respondan a los desafíos actuales de sostenibilidad y eficiencia energética. Las alternativas obtenidas son presentadas de forma visual en la Figura 14.

Las alternativas de reconversión energética estudiadas según la bibliografía de literatura científica y antecedentes de propiedad intelectual, utilizando Proknow-C, ofrecen diversas opciones

para reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la eficiencia en la generación de energía en las unidades generadoras a carbón. Estas alternativas incluyen; conversión total a biomasa e hibridación de carbón y biomasa (26,47%); hibridación carbón y energía solar (20,59%); conversión total a gas natural e hibridación de carbón y gas natural (19,12%); la conversión a cogeneración de electricidad e hidrógeno (17,65%) y el sistema de captura de carbono (16,18%). La hibridación de carbón y gas natural o biomasa permite combinar combustibles, como el carbón con fuentes de energía más limpias, lo que resulta en una reducción de las emisiones de CO₂ y la obtención de una mayor flexibilidad. Por otro lado, la conversión total a gas natural o biomasa implica reemplazar por completo el combustible actual, lo que puede conducir a una reducción significativa de las emisiones. La hibridación de carbón y energía solar, combina diferentes fuentes de energía para lograr una menor dependencia del carbón y reducir las emisiones asociadas. Los sistemas de captura de carbono permiten reducir las emisiones mediante tecnologías que capturan el CO₂ producido en la combustión del carbón. Por último, la conversión a cogeneración de electricidad e hidrógeno ofrece la producción simultánea de electricidad e hidrógeno, lo que puede aumentar la flexibilidad operativa al utilizar el hidrógeno como vector energético.

Figura 14. Alternativas para la reconversión de unidades generadoras a carbón.



Fuente: Elaboración propia

En resumen, estas alternativas de reconversión energética proporcionan opciones viables para abordar el problema de las emisiones y promover un sistema energético más sostenible y limpio. La alternativa más adecuada depende de factores como los objetivos específicos de reducción de emisiones y eficiencia técnica. Lo cual se presenta en las siguientes etapas de este estudio, con los métodos AHP para evaluar cuantitativamente las alternativas y PROMETHEE para ranquearlas, en términos: (1) ambiental, con énfasis en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y generación de residuos; (2) estructural, en cuanto al nivel de reutilización de la infraestructura existente; (3) técnico, en términos de rendimiento y flexibilidad de las soluciones; (4) tecnológico, considerando la madurez tecnológica; (5) económico, enfocado en el costo de la implementación; y (6) social , mediante el impacto en el empleo.

5. MÉTODO AHP: EVALUACIÓN MULTICRITERIO

El procedimiento metodológico descrito en esta sección tuvo como objetivo la evaluación cuantitativa de las alternativas obtenidas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón que promuevan la transición energética con integración de fuentes de energía más sostenibles, empleando el método AHP. El método AHP es una técnica de toma de decisiones multicriterio que permite descomponer un problema complejo en una jerarquía de criterios y subcriterios, simplificando la comparación entre diferentes factores y proporciona independencia para cuantificar los criterios y las alternativas relacionadas con el objetivo general del estudio. El método fue desarrollado por T.L. Saaty (SAATY,1987).

El AHP presentado por Saaty se conoce como un AHP convencional basado en la comparación por pares, la técnica permite determinar factores cuantitativos y cualitativos a través de cálculos de prioridades numéricas utilizando una matriz de comparación, su enfoque principal es apoyar la toma de decisiones mediante el uso de medidas de consistencias, la condición de consistencia es estricta para mantener la racionalidad de las intensidades de las preferencias entre los elementos comparados. El método se fundamenta en la revisión de un problema complejo en una jerarquía clara de alternativas y criterios, lo que facilita una comparación sistemática y detallada de los elementos involucrados. Esta jerarquización permite analizar las alternativas en función de criterios definidos, proporcionando una visión integral del problema. Una de las características clave del proceso es la comparación pareada de los elementos, lo que permite determinar con mayor claridad la importancia relativa de cada uno de ellos.

La Tabla 9 presenta la escala de importancia definida por Saaty, un elemento clave en el proceso de toma de decisiones multicriterio. Esta escala se utiliza para determinar la intensidad de la relación entre dos elementos, permitiendo establecer de manera cuantitativa cuán significativa es una opción en comparación con otra en función de un conjunto de criterios predefinidos. La escala de Saaty, que va del 1 al 9, es fundamental para la comparación por pares de criterios y alternativas, un proceso que se lleva a cabo para asignar un peso relativo a cada uno de los elementos involucrados en el análisis. Esta escala tiene una estructura jerárquica que se traduce en valores numéricos que reflejan las diferencias en importancia entre los elementos. Un valor de 1 indica que los dos elementos comparados son igualmente importantes, mientras que un valor de 9 refleja una importancia extrema de un elemento sobre el otro. Estos valores intermedios permiten capturar matices en las comparaciones, proporcionando un marco flexible y preciso para expresar la intensidad de las relaciones entre los criterios y alternativas evaluadas.

A través de esta metodología, el objetivo es asegurar que las decisiones tomadas sean objetivas

y fundamentadas, garantizando que la relevancia de cada alternativa se refleje con precisión. Esta jerarquía busca minimizar sesgos subjetivos, asegurando que las decisiones se basen en una evaluación rigurosa, para obtener resultados confiables y transparentes. Este enfoque, basado en las ecuaciones y principios de SAATY (1987), ofrece un marco sólido para la toma de decisiones en entornos complejos, permitiendo un proceso riguroso de validación que asegura la robustez de las decisiones finales y sigue las ecuaciones presentadas en la Tabla 10.

Tabla 9. Escala de importancia definida por Saaty.

Intensidad de Importancia	Definición	Explicación
1	Misma Importancia	Ambas actividades contribuyen igualmente al objetivo.
3	Importancia débil	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte	Una actividad es fuertemente favorecida sobre la otra; su dominio de importancia se demuestra en la práctica.
9	Importancia absoluta	La evidencia favorece una actividad sobre la otra con el más alto grado de certeza.
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios	Cuando se busca una condición de compromiso entre dos definiciones.
Valores recíprocos	Si una actividad recibe un valor comparado con j , como reciprocidad, j recibirá el valor recíproco al compararlo con i .	

Fuente: Elaboración propia adaptado de SAATY,1987.

Tabla 10. Resumen del método AHP

Resumen del método AHP según SATTY		
Nº de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. (1)	$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{vmatrix}$	Construcción de matrices: Expresa la intensidad con que un indicador domina o es dominado por los demás.
Ec. (2)	$W_i = \left(\prod_{i=1}^n W_{ij} \right)^{1/n}$	Cálculo de autovectores: Utilizada para el cálculo de la medida o peso de cada indicador.
Ec. (3)	$T = \left \frac{W_1}{\sum W_i}; \frac{W_2}{\sum W_i}; \frac{W_3}{\sum W_i} \right $	Normalización de autovectores: Da como resultado la medida o peso de cada indicador.
Ec. (4)	$\lambda_{max} = T \times W$	Valor propio máximo: Relaciona la matriz y los pesos de los indicadores.
Ec. (5)	$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)}$	Índice de Consistencia: Indica el grado de consistencia de la matriz y los indicadores.
Ec. (6)	$RC = \frac{IC}{CA}$	Razón de Consistencia: Valida la consistencia en razón del orden de la matriz. Valido si $RC < 0,10$

Fuente: Elaboración propia adaptado de SAATY,1987.

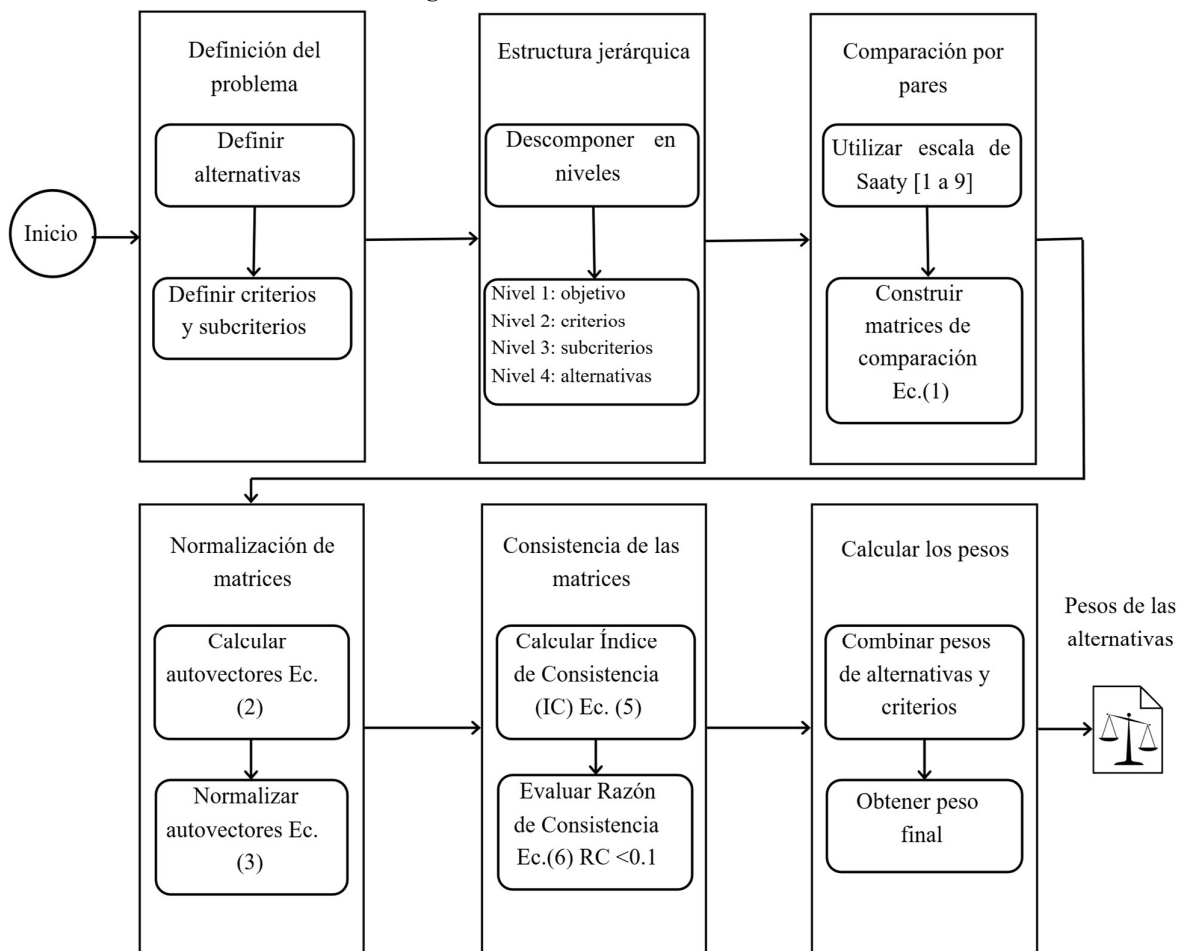
Las ecuaciones presentadas en la Tabla 10 se desarrollan dentro de un proceso estructurado que se ilustra en la Figura 15. Este proceso proporciona un enfoque sistemático y organizado para evaluar las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, utilizando el proceso de Jerarquía Analítica. Dicho proceso garantiza que cada alternativa sea evaluada de manera objetiva y rigurosa, permitiendo una comparación exhaustiva y fundamentada de las diferentes opciones disponibles para la reconversión.

En este estudio, se utiliza el *software Total Decision* para desarrollar los cálculos de las ecuaciones, aplicando las siguientes fases: i) construcción de la estructura jerárquica: definición de los criterios de evaluación y las alternativas de reconversión, ii) matriz de comparación por pares; comparación de cada criterio y alternativa en función de su importancia relativa, iii) cálculo de vectores propios, para calcular los pesos relativos de cada criterio y alternativa, normalizando la matriz de comparación, iv) obtención del puntaje final: los pesos obtenidos, se combinan para generar un puntaje final para cada alternativa. El uso de *Total Decision* presenta un manejo de las matrices de comparación y el cálculo de los pesos de manera eficiente y estructurada, asegurando una evaluación cuantitativa precisa de las alternativas.

El estudio adopta un enfoque sistemático integrado en un sistema de apoyo a la toma de decisiones para evaluar alternativas utilizando el AHP, la metodología integra el conocimiento de expertos y el análisis de datos, su implementación se puede ampliar y adaptar para otras decisiones complejas que involucran aportes de expertos y análisis detallados. De acuerdo con Calabrese *et al.* (2019) los métodos de toma de decisiones multicriterio son capaces de manejar de manera efectiva la multidimensionalidad, la complejidad y la subjetividad inherentes a los temas relacionados con la sostenibilidad.

El estudio integra datos de la revisión bibliográfica y los aportes de expertos, recopila, normaliza y analiza dos conjuntos de datos, el primero incluyen ponderaciones para los criterios de evaluación y de las alternativas de reconversión según el análisis de datos de la bibliografía estudiada y el segundo conjunto corresponde a los datos recolectado de encuestas a expertos en el dominio de la energía con conocimiento del tema analizado. A continuación, se desarrollan las etapas de la investigación que corresponden al método.

Figura 15. Procesos del método AHP



Fuente: Elaboración propia

5.1. ALTERNATIVAS, CRITERIOS Y ESTRUCTURA JERÁRQUICA

En esta etapa se consolidaron las alternativas de reconversión propuestas en la literatura e identificadas con el método Proknow-C, mediante la categorización de las alternativas y son presentadas en la Tabla 11.

Tabla 11. Alternativas de reconversión para las unidades generadoras a carbón

Alternativas	Descripción
A1: Alternativa 1	Conversión total a gas natural
A2: Alternativa 2	Conversión total biomasa
A3: Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural
A4: Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa
A5: Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno
A6: Alternativa 6	Hibridación carbón y energía solar
A7: Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono
A8: Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior

Fuente: Elaboración propia

Se llevó a cabo un análisis de las alternativas, enfatizando cómo se alinean con los objetivos de transición energética hacia fuentes más sostenibles. Este análisis consideró estudios previos que evaluaron la efectividad de dichas alternativas en contextos similares al de las unidades generadoras a carbón. Los estudios fueron analizados por su relevancia y criterios identificados, lo cuales fueron clasificados según los aspectos ambientales, estructurales, tecnológicos, económicos y sociales que más incidían en la viabilidad de las propuestas. Se establecieron los criterios de evaluación de las alternativas, conforme a los estudios analizados. La Tabla 12 expone los criterios identificados y los subcriterios que lo conforman.

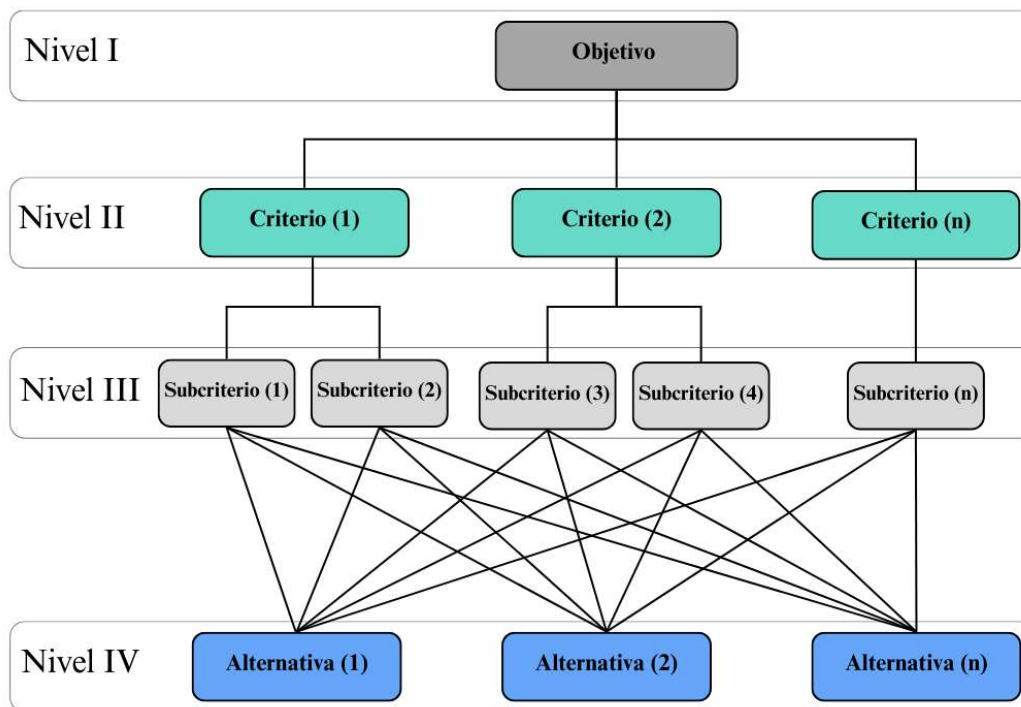
Tabla 12. Criterios y definición de subcriterios.

Criterios	Subcriterios
C1: Ambiental	Emisiones de dióxido de carbono y generación de residuos
C2: Estructural	Reutilización de la infraestructura
C3: Técnico	Flexibilidad en la operación y rendimiento
C4: Tecnológico	Madurez tecnológica
C5: Económico	Costo de implementación
C6: Social	Generación de empleos

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, se estableció la estructura jerárquica de decisión, la cual constituye un elemento fundamental dentro del proceso de evaluación multicriterio. Esta estructura se organiza de manera sistemática y está compuesta por los objetivos generales del estudio, los criterios que permiten evaluar cada alternativa, los subcriterios que detallan aspectos específicos de cada criterio, y finalmente, las alternativas. Todos estos elementos se distribuyen de manera ordenada en los diferentes niveles de jerarquía, identificados como Nivel I, Nivel II y Nivel III, tal como se ilustra en la Figura 16, proporcionando una representación visual clara y coherente del esquema de decisión implementado.

Figura 16. Estructura jerárquica por niveles.



Fuente: Adaptado de Hernández; Solano y Ferreira, 2021.

5.2. MATRIZ DE COMPARACIÓN, NORMALIZACIÓN Y CONSISTENCIA

En esta etapa se definió la matriz de comparación que permite calcular los pesos relativos de cada criterio y subcriterios mediante el proceso de normalización y cálculo de vectores propios del método AHP. A través de la comparación por pares se establece la importancia relativa entre los elementos del 1 al 9 según la escala de SAATY presentada en la Tabla 8.

La matriz representa la comparación entre criterios y alternativas donde se combina los pesos de cada alternativa del Nivel IV con cada elemento del Nivel II que corresponde a los criterios en cuestión. Por lo tanto, las alternativas se comparan entre sí, en cuanto al desempeño en cada uno de los criterios como se observa en la Tabla 13, lo que permite encontrar el valor de cada solución y establecer prioridades.

Tabla 13. Matriz de comparación.

Criterios (C) Alternativas (A)	C1	C2	C3	C _m
A ₁	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{1m}
A ₂	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{2m}
A ₃	a_{31}	a_{31}	a_{33}	a_{3m}
...
A _n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	a_{nm}

Fuente: Elaboración propia

A través de esta estructura, se obtiene la matriz de comparación presentada en la ecuación (1) que sirven como base para el análisis posterior. El siguiente paso consiste en calcular los autovectores de estas matrices según la ecuación (2), que reflejan el peso relativo de cada alternativa en función de los criterios establecidos. Posteriormente, estos valores son normalizados para garantizar que todos los pesos se ajusten a un rango adecuado y sean comparables entre sí mediante la ecuación (3). El proceso de validación también es crucial, y para ello se utiliza el Índice de Consistencia (IC) ecuación (5) y la Razón de Consistencia (RC) según la ecuación (6). Estos indicadores permiten verificar si las comparaciones realizadas son coherentes y lógicas. Si la RC es menor a 0,10 o al 10% se considera que las comparaciones son consistentes, lo que valida la confiabilidad del modelo y refuerza la calidad del análisis. Este proceso se lleva a cabo en el *software Total Decision* que asegura una evaluación cuantitativa precisa de las alternativas.

5.3. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS SEGÚN LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

En primer lugar, se realiza el análisis comparativo de las alternativas de reconversión basada en la revisión de la literatura científica consolidada en los Apéndices de la investigación y basada en los datos obtenidos de los resultados presentados por los estudios previos recopilados en los Anexos de la investigación. En este análisis se sintetizaron los hallazgos; los cuales fueron procesados en el *software Total Decision* utilizando el método de comparación pareada y la escala de Saaty de la Tabla 8 para construir la matriz, permitiendo una valoración objetiva de cada alternativa mediante pesos normalizados y consistencia estadística, garantizando así una selección robusta basada en análisis y estándares de toma de decisiones.

5.4. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS SEGÚN ENCUESTA A EXPERTOS

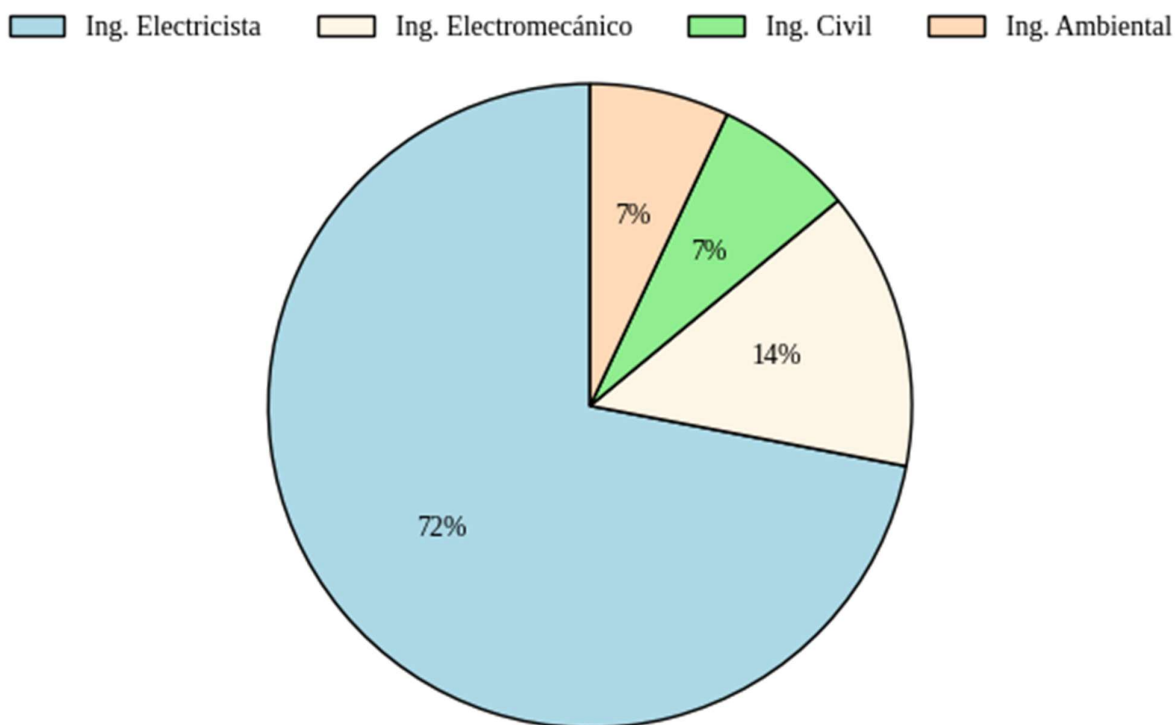
En esta sección se aplicó una metodología paralela para comparar las alternativas, basada en los resultados de las encuestas realizadas a expertos del sector energético documentadas en los Apéndices de la investigación, donde se seleccionó a la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) como organismo clave para la aplicación del instrumento; las respuestas de los especialistas fueron procesadas mediante el mismo enfoque multicriterio en el *software Total Decision*, utilizando comparación pareada y la escala de Saaty para generar la matriz de valoración, lo que permitió contrastar los hallazgos teóricos con la percepción experta y validar así los resultados bajo un enfoque integral que combina evidencia documental y criterio especializado.

La ANDE (1964) es la entidad responsable de operar el sistema eléctrico paraguayo abarcando la generación, la transmisión, distribución y la comercialización de la energía. Su objeto primordial

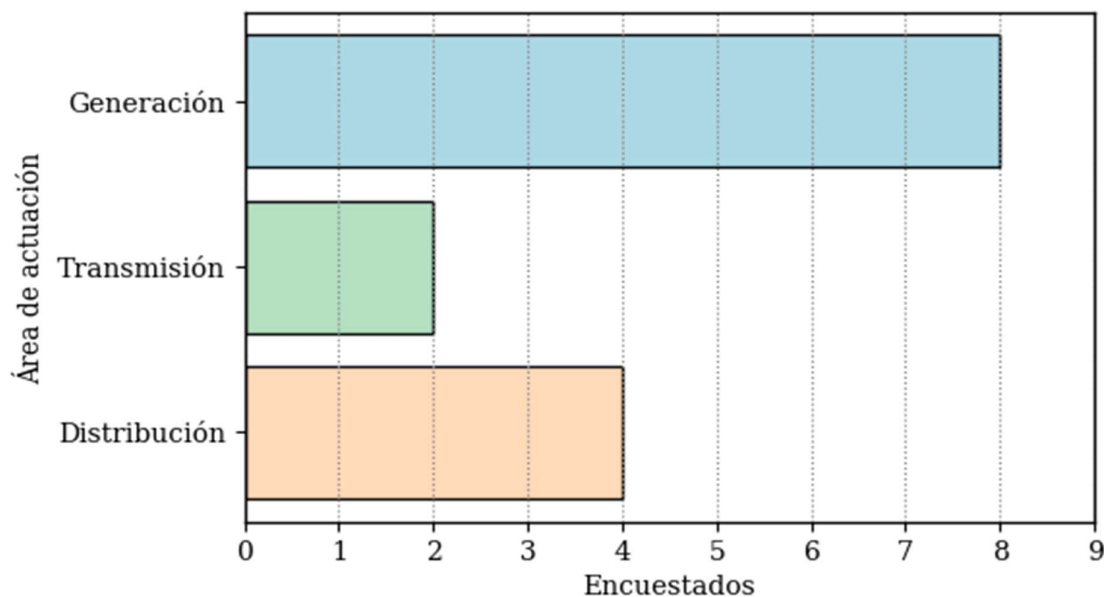
es satisfacer en forma adecuada las necesidades de energía eléctrica del país, con el fin de promover su desarrollo económico y fomentar el bienestar de la población, mediante el aprovechamiento preferente de los recursos naturales de la Nación. Cuenta con profesionales altamente calificados con conocimientos especializados en diversas áreas del sector energético, el cuestionario se envió a 27 expertos y 14 de ellos han proporcionado respuestas, la Figura 17 resume las profesiones de los 14 expertos.

Los expertos encuestados en este estudio pertenecen a distintas áreas de actuación del sector eléctrico, lo cual garantiza una diversidad de perspectivas y conocimientos técnicos en la evaluación de las alternativas de reconversión. Estos profesionales desempeñan funciones en ámbitos como la generación, transmisión y distribución de la energía. La representatividad de sus perfiles permite enriquecer el análisis multicriterio con opiniones fundamentadas en la experiencia práctica y la realidad del sistema eléctrico. Estos perfiles se reflejan gráficamente en la Figura 18, donde se presenta la distribución de los encuestados según su área de especialización. Los perfiles técnicos incluidos contribuyen significativamente a la robustez y validez de los resultados obtenidos

Figura 17. Profesiones de los encuestados



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Área de actuación de los encuestados.

Fuente: Elaboración propia

Los cuestionarios se diseñaron siguiendo las directrices del método AHP, con el objetivo de garantizar una evaluación estructurada y coherente de cada alternativa considerada en el estudio. Cada experto participante proporciona un puntaje de desempeño específico para cada alternativa, permitiendo así cuantificar su percepción y juicio sobre el grado de cumplimiento de los criterios establecidos. La encuesta sintetiza las ocho alternativas seleccionadas y los criterios previamente definidos, de manera que la evaluación se realiza de forma organizada y consistente. La calificación otorgada por el experto a cada alternativa para un criterio determinado corresponde a un puntaje de desempeño, el cual se asigna conforme a la escala de Saaty y se registra en la celda ubicada en la intersección del criterio y la alternativa correspondiente, tal como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Matriz de comparación según encuesta a expertos.

A/C	C1	C2	...	C _m
A ₁	Puntuación [1 al 9]	Puntuación [1 al 9]	...	Puntuación [1 al 9]
A ₂
A ₃
...
A _n

Fuente: Elaboración propia.

6. MÉTODO PROMETHEE: RANKING DE PREFERENCIAS

El procedimiento metodológico descrito en esta sección tiene como objetivo ranquear las alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón, mediante la aplicación del método PROMETHEE. El método PROMETHEE es una técnica de evaluación multicriterio que se utiliza para obtener un ranking de alternativas en función de las preferencias entre ellas, es un modelo de toma de decisiones de clasificación superior que fue desarrollado por Jean-Pierre Brans (BRANS, VINCKE, 1985).

De acuerdo con Ridha *et al.* (2023), los métodos de toma de decisiones multicriterio resultan fundamentales para sistematizar la evaluación y selección de alternativas mediante un marco estructurado que garantiza soluciones óptimas. Este estudio propone un enfoque híbrido que integra los métodos, combinando sus ventajas comparativas: el AHP establece los pesos jerárquicos de los criterios mediante comparaciones pareadas, mientras que PROMETHEE realiza un ranking detallado de las alternativas mediante funciones de preferencia. Esta metodológica permite un análisis robusto al incorporar tanto la ponderación consistente de criterios como la evaluación comparativa avanzada, generando soluciones óptimas respaldadas por un tratamiento integral de los datos.

PROMETHEE demuestra especial eficacia por su estabilidad ante variaciones en los datos de entrada y su rigor matemático en la identificación de soluciones óptimas, cuyas ecuaciones clave se detallan operacionalmente en la Tabla 15.

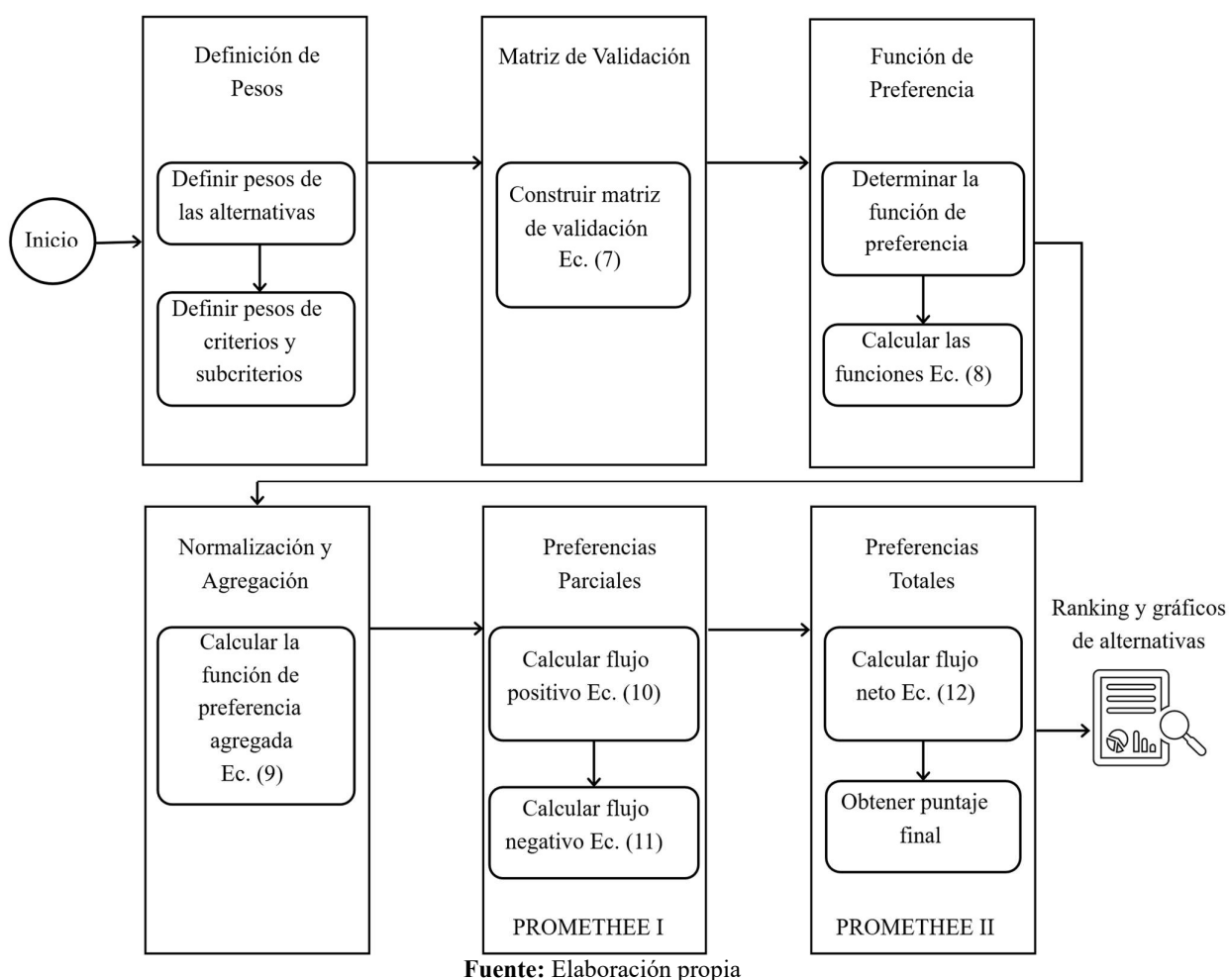
Tabla 15. Resumen del método PROMETHEE

Resumen del método PROMETHEE		
Nº de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. (7)	$\begin{bmatrix} A/C & C_1 & C_2 & \dots & C_m \\ a_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$	Matriz de validación: Representa los pesos de las alternativas (filas) según cada criterio criterios (columnas).
Ec. (8)	$Pd_{(max)}(a_1, a_2) = f(a_1) - f(a_2)$ $Pd_{(min)}(a_1, a_2) = f(a_2) - f(a_1)$	Pd(máx.): Representa la función de preferencia máxima entre dos alternativas (a_1) y (a_2). Pd(mín.): Representa la función de preferencia mínima entre dos alternativas (a_1) y (a_2).
Ec. (9)	$\pi(a_1, a_2) = \sum_{j=1}^{k+l} P_j(a_1, a_2)w_j$	Agregación: Combina las preferencias de todos los criterios ponderados para comparar las alternativas.
Ec. (10)	$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$	Flujo positivo: Mide cuánto una alternativa (a) domina a las demás.
Ec. (11)	$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$	Flujo negativo: Mide cuánto una alternativa (a) es dominada por las demás.
Ec. (12)	$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$	Flujo neto: Calcula la preferencia neta de una alternativa (a).

Fuente: Elaboración propia adaptado de BRANS, VINCKE, 1985.

Las ecuaciones expuestas en la Tabla 15 son presentadas en un proceso estructurado en la Figura 19, la cual permite un abordaje sistemático para la obtención del ranking y la representación gráfica de las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón aplicando el método PROMETHEE. Esta figura sintetiza de manera clara las etapas lógicas del análisis, desde la entrada de datos hasta el cálculo de los flujos de preferencia netos. Además, proporciona una guía visual útil para comprender el método y facilita la interpretación para responsables de la toma de decisiones, fortaleciendo así la aplicabilidad práctica del modelo

Figura 19. Procesos del método PROMETHEE



En conjunto, la Tabla 16 y la Figura 19 conforman el núcleo operativo del análisis que sustenta los resultados obtenidos en este estudio. Esta estructura facilita la asignación de pesos relativos a cada elemento del problema, garantizando una representación coherente de las prioridades de decisión.

El método PROMETHEE procesa estos resultados mediante la integración de los pesos AHP mediante media aritmética ponderada y la aplicación de funciones de preferencia específicas para

cada criterio, generando así un ranking final fiable de alternativas. Además, permite un análisis gráfico intuitivo que refuerza la interpretación de los resultados, brindando soporte visual a los tomadores de decisión. Su capacidad de adaptación a diferentes contextos y tipos de variables lo convierte en una herramienta versátil para estudios energéticos complejos.

Para aplicar este método, se emplea el *software Visual PROMETHEE*, proporcionando una interfaz visual y analítica para la evaluación de decisiones complejas. Este *software* permite llevar a cabo las siguientes fases: i) selección de las funciones de preferencia: permite definir funciones de preferencia para cada criterio, que reflejan las preferencias entre las alternativas, ii) cálculo de los flujos de preferencia: el *software* calcula los flujos positivos y negativos para cada alternativa, lo que permite cuantificar la preferencia de una alternativa sobre otra, iii) generación del ranking: se ordenan las alternativas en función de los flujos de preferencia, generando un ranking de las alternativas más favorables a las menos favorables, iv) visualización: el *software Visual PROMETHEE* proporciona una representación visual que permite contrastar gráficamente el desempeño multidimensional de cada alternativa. A continuación, se desarrollan las etapas de la investigación que corresponden al método.

6.1. PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

A partir del establecimiento de los pesos de las alternativas por cada criterio, según la revisión bibliográfica y la encuesta realizada a expertos se obtiene la conjunción de ambos análisis mediante la media aritmética, según la Ecuación 13.

La integración de los pesos asignados a cada alternativa es derivada tanto del análisis bibliográfico como de las encuestas a expertos mediante un proceso de consolidación matemática, específicamente la media aritmética ponderada (Ecuación 13) entre: los valores normalizados obtenidos de la comparación según la revisión sistemática de literatura, y la comparación resultante del juicio experto de la ANDE. Este enfoque híbrido garantiza que la jerarquización final refleje tanto la evidencia técnica documentada como la experiencia práctica de los especialistas del sector, equilibrando así el conocimiento teórico con las consideraciones operativas.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (13)$$

Siendo \bar{X} la media aritmética que integra los dos conjuntos de datos analizados. Esta operación de premediación ponderada genera los coeficientes definitivos que permite establecer la matriz de evaluación (Ecuación 7) y habilita el cálculo de los flujos de preferencia (Ecuaciones 10,11 y12).

6.2. FUNCIÓN DE PREFERENCIA Y CALCULO DE FLUJOS

Una vez establecidos los pesos relativos de las alternativas en relación con los criterios previamente definidos, el siguiente paso es transferir los datos al *software* especializado, como se muestra en la Figura 20. Este paso es crucial, ya que implica la introducción de toda la información cuantitativa que se utiliza para realizar los cálculos y comparaciones posteriores. A continuación, se define la función de preferencia que se emplea en el análisis. En este caso, se selecciona de manera óptima la función de preferencia lineal, la cual es altamente efectiva para mantener la estabilidad y la coherencia de los resultados a lo largo del proceso de evaluación. La función de preferencia lineal permite una comparación clara y directa entre las alternativas, facilitando la identificación de las más favorables según los criterios establecidos.

Después de seleccionar la función de preferencia adecuada, se procede a calcular la preferencia de cada criterio para cada par de alternativas según la ecuación (8), lo que constituye el núcleo del método PROMETHEE. Este proceso asegura que las alternativas sean evaluadas de manera rigurosa y que los resultados sean consistentes con los objetivos de la investigación, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones.

Figura 20. Definición de la función de preferencia y cálculo de flujos

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scenario1	Dióxido de c...	Residuos	Infraestruct...	Flexibilidad	Rendimiento	Madurez tec...	Costo de imp...	Empleos
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences								
Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max
Weight	0,25	0,08	0,28	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	0,130	0,220	0,220	0,220	0,180	0,280	0,220	0,210
- P: Preference	0,300	0,520	0,420	0,580	0,420	0,540	0,520	0,530
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics								
Minimum	0,156	0,179	0,072	0,021	0,018	0,051	0,102	0,016
Maximum	0,536	0,533	0,533	0,458	0,289	0,541	0,536	0,455
Average	0,256	0,288	0,443	0,247	0,186	0,274	0,330	0,303
Standard Dev.	0,115	0,123	0,143	0,144	0,080	0,146	0,142	0,140
Evaluations								
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 1	0,156	0,452	0,506	0,458	0,205	0,541	0,368	0,204
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 2	0,238	0,210	0,514	0,188	0,197	0,404	0,360	0,285
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 3	0,168	0,290	0,533	0,453	0,200	0,346	0,446	0,286
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 4	0,212	0,179	0,524	0,195	0,112	0,287	0,443	0,285
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 5	0,180	0,216	0,468	0,281	0,196	0,174	0,191	0,448
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 6	0,297	0,228	0,442	0,279	0,289	0,242	0,190	0,455
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 7	0,257	0,197	0,486	0,105	0,268	0,145	0,102	0,445
<input checked="" type="checkbox"/> Alternativa 8	0,536	0,533	0,072	0,021	0,018	0,051	0,536	0,016

Fuente: Elaborado en el *software Visual PROMETHEE*

6.3. RANKING DE PREFERENCIA DE LAS ALTERNATIVAS

Posteriormente se obtiene el flujo positivo (ϕ^+) y negativo (ϕ^-) para cada alternativa, cuya formulación matemática queda expresada en la ecuación (10) y la ecuación (11) respectivamente. El positivo denota cómo la alternativa supera a las demás, mientras que el negativo se refiere a cómo la alternativa es superada por otras. A partir de estos valores se calcula el flujo neto (ϕ) como la diferencia entre ambos representada en la ecuación (12). El flujo neto permite obtener un ranking claro de las alternativas, donde una mayor puntuación indica una alternativa más favorable, mientras que una puntuación más baja refleja una mayor dominancia de otras alternativas sobre ella. El ranking resultante proporciona una visión integral de las alternativas evaluadas, facilitando la identificación de la opción más prometedora para la reconversión de las unidades generadoras a carbón.

7. RESULTADOS

Este apartado expone los resultados clave de la investigación, presentando el análisis de las alternativas de reconversión evaluadas mediante el proceso multicriterio. Además, se consolidan los argumentos que respaldan las soluciones más prometedoras.

7.1. RESULTADOS DEL MÉTODO PROKNOW-C

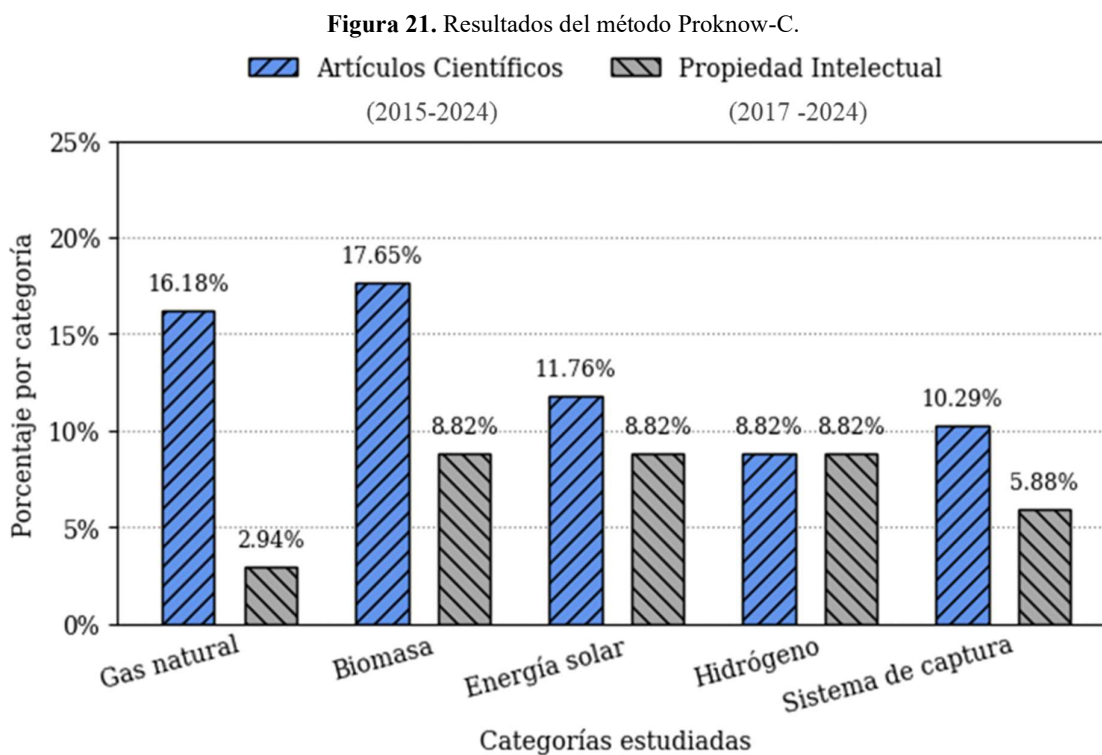
En esta sección se presenta el cumplimiento del Objetivo Específico (1) con sus respectivas etapas y resultados obtenidos.

Etapas 1 - Revisión de la literatura científica: Esta revisión da como resultado la identificación y análisis de **26 artículos científicos**, el análisis evidenció que las alternativas más estudiadas en la literatura científica incluyen biomasa, gas natural y energía solar. Estos hallazgos confirman el consenso científico sobre estas alternativas como pilares para la transición energética y justifican su inclusión prioritaria en el análisis comparativo.

Etapas 2 - Revisión de la propiedad intelectual: Esta revisión da como resultado la identificación de **13 patentes**. Los resultados revelan que las tecnologías con mayor desarrollo patentado incluyen biomasa, hidrógeno y energía solar. Aunque la cantidad de patentes es menor en comparación con la literatura científica, la presencia de registros demuestra que estas tecnologías han sido desarrolladas en términos de innovación tecnológica y complementan la evidencia académica, destacando el traslado del conocimiento científico a aplicaciones industriales.

Etapas 3- Análisis y categorización de la revisión: A partir del análisis sistemático de fuentes científicas y tecnológicas, se identificaron **5 categorías** prioritarias como principales alternativas para la reconversión de unidades generadoras a carbón siendo estas; la biomasa, el gas natural, la energía solar, el hidrogeno y los sistemas de captura de carbono. Se evidencia que el gas natural y la biomasa son las opciones con mayor respaldo en términos científicos, mientras que el hidrógeno y los sistemas de captura de carbono emergen como alternativas relevantes en la innovación tecnológica.

La Figura 21 representa los resultados obtenidos mediante el método Proknow-C, evidenciando los estudios identificados en la revisión de la literatura científica y en la revisión de la propiedad intelectual integrando los 26 artículos científicos y 13 patentes analizados, que permitieron formar las categorías prioritarias como principales alternativas para la reconversión de unidades generadoras a carbón. Estos resultados respaldan el cumplimiento del objetivo específico 1 y proporciona una base sólida para la evaluación de opciones en las etapas posteriores del estudio.



La figura presenta los resultados porcentuales obtenidos mediante el método Proknow-C, diferenciando las categorías de tecnologías relacionadas con la reconversión de unidades generadoras a carbón, según dos fuentes de conocimiento: artículos científicos y documentos de propiedad intelectual. Se observa que la categoría con mayor representación en la literatura científica es la biomasa (17,65%), seguida por el gas natural (16,18%) y la energía solar (11,76%). En contraste, en el ámbito de la propiedad intelectual, los mayores porcentajes se distribuyen de manera más uniforme, destacando la energía solar, hidrógeno y biomasa, todas con un 8,82%. Cabe destacar que el gas natural, a pesar de su alta representación en artículos científicos, muestra una baja presencia en patentes (2,94%), mientras que el hidrógeno alcanza una proporción equivalente en ambos tipos de fuentes (8,82%). Este análisis comparativo evidencia las tecnologías con mayor respaldo teórico frente a aquellas con mayor desarrollo aplicado, lo que permite identificar áreas de convergencia y brechas entre el conocimiento académico y el desarrollo tecnológico. En conjunto, estos resultados fortalecen la selección de alternativas en el estudio, reflejando tendencias en investigación e innovación.

7.2. RESULTADOS DEL MÉTODO AHP

En esta sección se presenta el cumplimiento del Objetivo Específico (2) con sus respectivas

etapas y resultados obtenidos.

Etapa 4 - Alternativas, criterios y estructura jerárquica: En esta etapa se definió la estructura jerárquica para la evaluación de las alternativas, consolidando los hallazgos del objetivo específico (1). Basada en la estructura jerárquica de la Figura 14 se organizan los componentes en cuatro niveles: **(I) el objetivo general del estudio, (II) los criterios de evaluación, (III) los subcriterios específicos y (IV) las alternativas a ser evaluadas.** Los cuales se presenta en la Tabla 16 que establece el marco de decisión multicriterio permitiendo relacionar y evaluar los distintos factores involucrados.

Tabla 16. Definición del Nivel I, II, III y IV.

Nivel I: Objetivo general	
Evaluar alternativas para la reconversión de las unidades generadoras a carbón promoviendo la transición energética	
Nivel II: Criterios	Nivel III: Subcriterios
C1: Ambiental	Emisiones de dióxido de carbono Generación de residuos
C2: Estructural	Reutilización de la infraestructura
C3: Técnico	Flexibilidad Rendimiento
C4: Tecnológico	Madurez tecnológica
C5: Económico	Costo de implementación
C6: Social	Generación de empleo
Nivel IV: Alternativas	
A1: Alternativa 1	Conversión total a gas natural
A2: Alternativa 2	Conversión total biomasa
A3: Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural
A4: Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa
A5: Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno
A6: Alternativa 6	Hibridación carbón y energía solar
A7: Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono
A8: Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior

Fuente: Elaboración propia

Etapa 5 - Matriz de comparación, normalización y consistencia: Se desarrolló la matriz de comparación de los criterios de evaluación, se aplicó el proceso de normalización y se calcularon los vectores propios, garantizando que los resultados sean matemáticamente consistentes a través del método AHP utilizando el *software Total Decision*, como se muestra en la Figura 22.

Cabe mencionar que la reducción de emisiones de gases de dióxido de carbono y la reutilización de la infraestructura son aspectos fundamentales en este estudio. Todas las alternativas presentadas consideran el aprovechamiento parcial o total de las instalaciones actuales, excepto el caso de la opción de cierre y reaprovechamiento posterior. No se han considerado alternativas que no

involucren la reutilización de la infraestructura ni contribuyan al proceso de descarbonización, por lo que los criterios ambiental y estructural presentan una importancia central en el análisis. Seguidamente, la viabilidad técnica ocupa un lugar primordial en este estudio, ya que determina la posibilidad real de implementar cada alternativa de manera efectiva y eficiente, esta viabilidad abarca aspectos como los efectos sobre el rendimiento, la flexibilidad operativa y la adaptabilidad de las soluciones. Considerando lo anterior, se define la escala de importancia de los criterios, utilizando el *software Total Decision*, el cual permite una evaluación multicriterio rigurosa y sistemática.

Figura 22. Matriz de comparación de criterios.

Ratio de Inconsistencia: 0.05 %

Ambiental	Estructural	Técnico	Tecnológico	Económico	Social
1	1.21	2.34	4.02	4.02	4.02
	1	2.09	3.48	3.48	3.48
		1	1.91	1.91	1.91
			1	1	1
				1	1
					1

Fuente: Elaborado en el *software Total Decision*

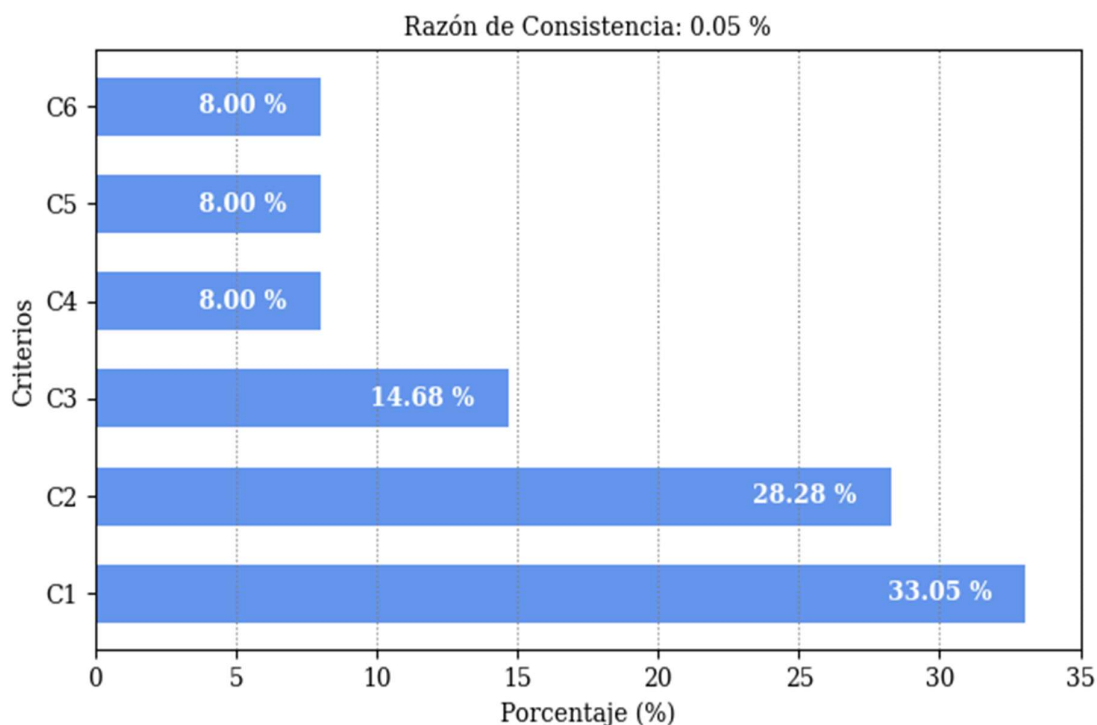
La Figura 23 presenta la ponderación porcentual de los criterios y se observa que el criterio ambiental tiene el mayor peso ($C1=33,05\%$), seguido del criterio estructural ($C2=28,28\%$) y el técnico ($C3=14,68\%$). En menor medida, los criterios tecnológicos, económicos y sociales tienen la misma importancia relativa ($C4, C5$ y $C6=8,00\%$ cada uno). Además, se destaca que la razón de consistencia es de $0,05\%$ lo que indica una alta coherencia en los juicios de comparación realizados, validando la confiabilidad del proceso. De este modo, se cumple con lo establecido en esta etapa, asegurando que los criterios priorizados guíen de manera objetiva la evaluación de las alternativas.

Etapa 6 - Comparación de alternativas según la revisión bibliográfica: Se comparan cuantitativamente las alternativas al combinar los pesos previamente calculados de los criterios con los valores asignados a cada alternativa, basándose en la revisión bibliográfica. La matriz, representa la comparación entre criterios y alternativas, por lo tanto, las alternativas se comparan entre sí, en cuanto al desempeño en cada uno de los criterios, lo que permite encontrar el peso de cada solución.

Esta matriz de comparación se presenta en la Tabla 17, la cual fue elaborada conforme a los resultados del *software Total Decision*. La tabla en términos generales, indica que ninguna alternativa domina en todos los criterios simultáneamente, algunas alternativas como A8 priorizan el beneficio ambiental, otras como A1 y A3 destacan por su madurez tecnológica y estructural, y otras como A5 y A7 equilibran mejor el impacto social. Se destaca la utilidad de esta matriz para revelar

compensaciones entre criterios, lo cual es esencial en escenarios de transición energética donde no existe una alternativa óptima en todos los aspectos, sino soluciones que implican compromisos estratégicos confirmando la necesidad de un enfoque multicriterio como el utilizado.

Figura 23. Resultados de criterios por el método AHP.



Fuente: Adaptado del software *Total Decision*

Tabla 17. Comparación de las alternativas según la revisión bibliográfica.

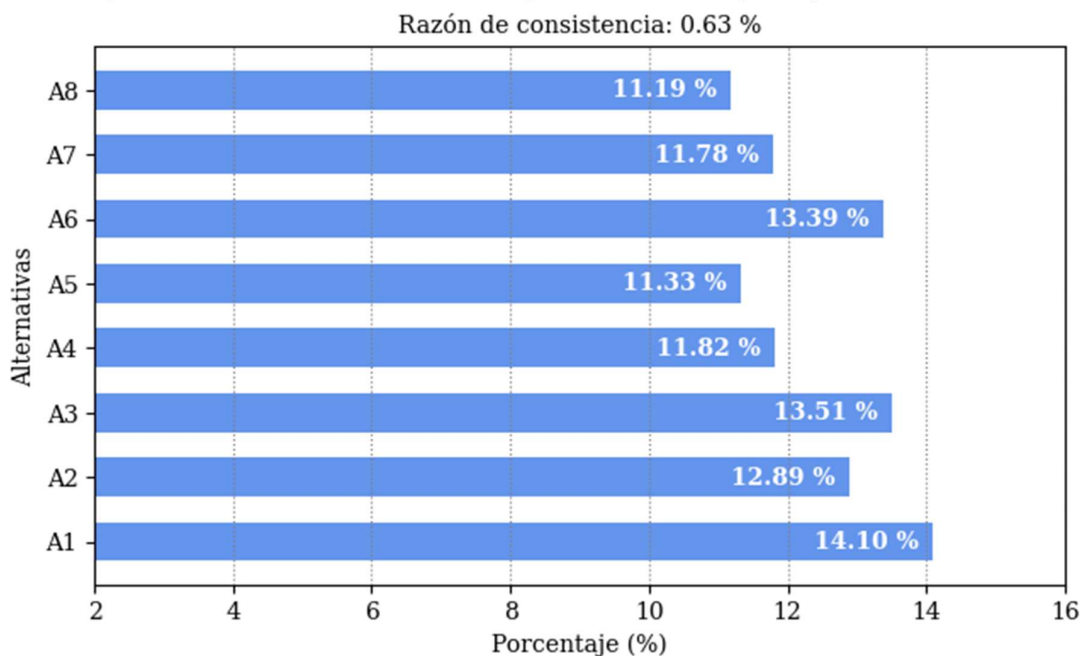
Criterios	Ambiental	Estructural	Técnico	Tecnológico	Económico	Social		
Alternativas	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos	Reutilización de la infraestructura	Flexibilidad	Rendimiento	Madurez tecnológica	Costo de implementación	Disminución de empleos
A1	0,275	0,830	0,944	0,833	0,333	1,000	0,667	0,333
A2	0,408	0,360	0,964	0,333	0,333	0,738	0,667	0,500
A3	0,275	0,523	1,000	0,833	0,333	0,612	0,833	0,500
A4	0,356	0,302	0,984	0,333	0,167	0,514	0,833	0,500
A5	0,299	0,376	0,890	0,500	0,333	0,287	0,333	0,833
A6	0,519	0,392	0,826	0,500	0,500	0,422	0,333	0,833
A7	0,439	0,337	0,923	0,167	0,500	0,237	0,167	0,833
A8	1,000	1,000	0,106	0,000	0,000	0,066	1,000	0,000

Fuente: Adaptado del software *Total Decision*.

La Figura 24 presenta los resultados porcentuales obtenidos para las alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón según la revisión bibliográfica. Estos valores permiten

identificar las opciones que han sido más respaldadas por la literatura científica en términos de viabilidad y potencial para la transición energética, reflejando su relevancia en la literatura científica revisada. Los resultados indican que la Alternativa 1 - Conversión total a gas natural, obtiene el mayor peso (A1=14,10%), seguida de la Alternativa 3- Hibridación de carbón y gas natural (A3=13,51%), la Alternativa 6 - Hibridación carbón y energía solar (A6=13,39%), la Alternativa 2 - Conversión total biomasa (A2=12,89%) y Alternativa 4 - Hibridación de carbón y biomasa (A4=11,82%). Por otro lado, las alternativas con menor peso relativo son la Alternativa 7 - Sistemas con captura de carbón (A7=11,78%), la Alternativa 5 - Cogeneración de electricidad e hidrógeno (A5=11,33%), y la Alternativa 8 - Cierre y reaprovechamiento posterior (A8=11,19%). Un aspecto fundamental del modelo es la razón de consistencia, el cual se muestra con un valor de 0,63% indicando que las comparaciones realizadas mantienen una alta coherencia y confiabilidad en la asignación de pesos a cada alternativa. Esto refuerza la validez de los resultados obtenidos y su aplicabilidad en el proceso de toma de decisiones.

Figura 24. Resultados de las alternativas según la revisión bibliográfica por el método AHP



Fuente: Adaptado del *software Total Decision*

Etapa 7 - Comparación de alternativas según encuesta a expertos: Se realiza la comparación de las alternativas basada en las encuestas realizada a expertos de la ANDE, utilizando el *software Total Decision* que permitió estructurar la comparación de manera rigurosa y garantizar la coherencia del proceso de evaluación. Los cuestionarios se prepararon de acuerdo con las reglas del AHP y los expertos proporcionaron los puntajes de desempeño para cada alternativa.

Posteriormente se calcularon y normalizaron las medias de las respuestas de los 14 expertos.

Esta matriz de comparación se presenta en la Tabla 18, la cual fue elaborada conforme a los resultados del *software Total Decision*. En la tabla se observa que alternativas, como A2 y A6, destacan en criterios ambientales; otras, como A1 y A4, reflejan mayor solidez en aspectos tecnológicos y estructurales; mientras que A5 y A7 se orientan hacia un mejor equilibrio en los criterios sociales. La matriz permite visualizar estas compensaciones, donde las decisiones no responden a una única solución óptima, sino a diferentes dimensiones de sostenibilidad. Al basarse tanto en la opinión experta como en un tratamiento metodológico estructurado, los resultados aportan robustez y confiabilidad al análisis multicriterio.

Tabla 18. Comparación de las alternativas según la encuesta a expertos

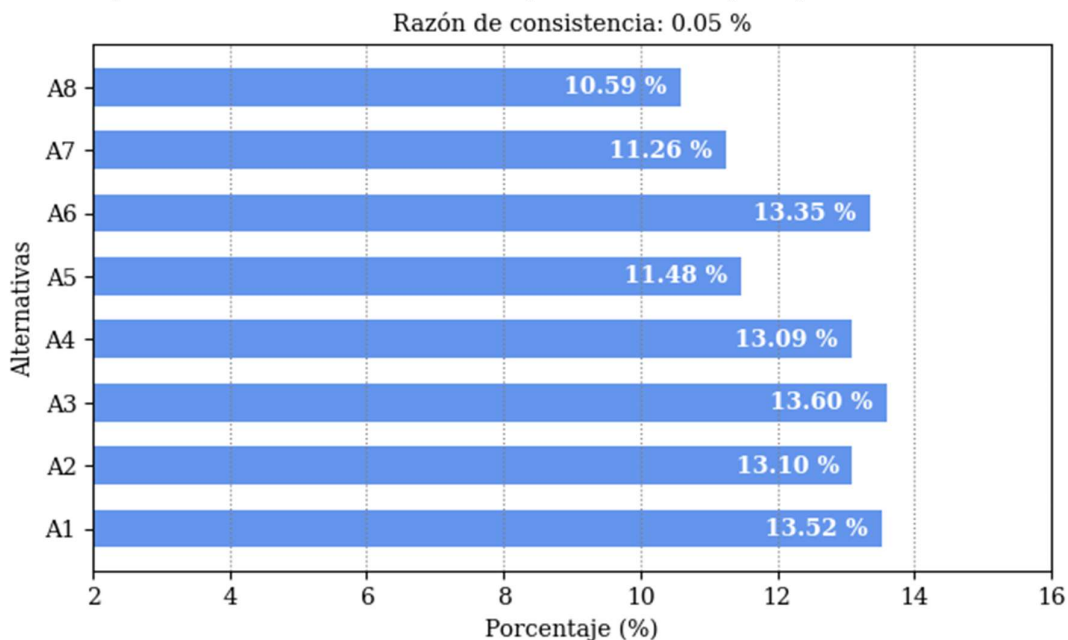
Criterios	Ambiental	Estructural	Técnico	Tecnológico	Económico	Social		
Alternativas	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos	Reutilización de la infraestructura	Flexibilidad	Rendimiento	Madurez tecnológica	Costo de implementación	Disminución de empleos
A1	0,036	0,073	0,069	0,082	0,076	0,083	0,070	0,074
A2	0,069	0,060	0,064	0,043	0,061	0,070	0,054	0,071
A3	0,061	0,056	0,065	0,072	0,066	0,080	0,058	0,072
A4	0,069	0,056	0,064	0,056	0,058	0,061	0,054	0,070
A5	0,061	0,056	0,046	0,063	0,059	0,060	0,049	0,064
A6	0,074	0,065	0,058	0,058	0,077	0,061	0,046	0,076
A7	0,076	0,056	0,049	0,044	0,036	0,052	0,038	0,056
A8	0,072	0,066	0,039	0,043	0,035	0,036	0,071	0,032

Fuente: Adaptado del *software Total Decision*

La Figura 25 presenta los resultados porcentuales obtenidos para las alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, según la encuesta a expertos. En esta evaluación, la Alternativa 3 - Hibridación de carbón y gas natural, presenta el mayor peso (A3=13,60%), seguida de la Alternativa 1 - Conversión total a gas natural (A1=13,52%), la Alternativa 6 - Hibridación carbón y energía solar (A6=13,35%), la Alternativa 2 - Conversión total biomasa (A2=13,10%) y la Alternativa 4 - Hibridación de carbón y biomasa (A4=13,09%). Por otro lado, las alternativas con menor peso relativo son la Alternativa 5 - Cogeneración de electricidad e hidrógeno (A5=11,48%), la Alternativa 7 - Sistemas con captura de carbón (A7=11,26%) y la Alternativa 8 - Cierre y reaprovechamiento posterior (A8=10,59%). Además, la razón de consistencia del modelo es de 0,05% lo que indica una alta coherencia en las comparaciones realizadas en la matriz de comparación. Este nivel refuerza la solidez y confiabilidad de los resultados obtenidos, asegurando que las ponderaciones asignadas a cada alternativa sean representativas dentro del marco de análisis multicriterio. El cumplimiento de esta etapa fortalece la validez del estudio al incorporar

conocimiento técnico y experiencia en la selección de alternativas.

Figura 25. Resultados de las alternativas según la encuesta a expertos por el método AHP



Fuente: Adaptado del *software Total Decision*

7.3. RESULTADOS DEL MÉTODO PROMETHEE

En esta sección se presenta el cumplimiento del Objetivo Específico (3) con sus respectivas etapas y resultados obtenidos.

Etap 8 - Ponderación de las alternativas: Se llevo a cabo la ponderación de las alternativas, a partir de los pesos obtenidos según la revisión bibliográfica y la encuesta realizada a expertos mediante la conjunción de ambos análisis por la media aritmética, que representa las soluciones óptimas y permite establecer la matriz de decisión presentada en la Tabla 19. Este enfoque garantiza que la jerarquización final refleje tanto la evidencia técnica documentada como la experiencia práctica de los especialistas del sector, equilibrando así el conocimiento teórico con las consideraciones operativas.

Etap 9- Funciones de preferencia y cálculo de flujos: En esta etapa se configuraron las funciones de preferencia específicas para procesar la combinación de pesos previamente establecida, utilizando el *software Visual PROMETHEE* como herramienta computacional. El análisis generó los flujos de preferencia para cada alternativa, cuantificando mediante los flujos positivos (ϕ^+) su capacidad de dominancia sobre las demás opciones, mientras que los flujos negativos (ϕ^-) reflejaron su grado de subordinación frente a otras alternativas.

Estos resultados se presentan en la Tabla 20, donde puede comparar el desempeño positivo y

negativo de las alternativas. Se observa que alternativas, como A1 y A3, presentan un desempeño positivo destacado, reflejando su potencial. Alternativas como A2, A4 y A6 muestran flujos positivos y negativos más equilibrados, indicando un desempeño intermedio. Por otro lado, A5 y A7 evidencian compromisos en aspectos de subordinación, sugiriendo que podrían requerir estrategias complementarias para mejorar su competitividad. Finalmente, la Alternativa A8 refleja un escenario que, aunque tiene impacto estratégico positivo, también implica importantes compromisos en términos de transición energética.

Tabla 19. Peso total de las alternativas de reconversión.

Criterios	Ambiental		Estructural		Técnico	Tecnológico	Económico	Social
Alternativas	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos	Reutilización de la infraestructura	Flexibilidad	Rendimiento	Madurez tecnológica	Costo de implementación	Disminución de empleos
A1	0,156	0,452	0,506	0,458	0,205	0,541	0,368	0,204
A2	0,238	0,210	0,514	0,188	0,197	0,404	0,360	0,285
A3	0,168	0,290	0,533	0,453	0,200	0,346	0,446	0,286
A4	0,212	0,179	0,524	0,195	0,112	0,287	0,443	0,285
A5	0,180	0,216	0,468	0,281	0,196	0,174	0,191	0,448
A6	0,297	0,228	0,442	0,279	0,289	0,242	0,190	0,455
A7	0,257	0,197	0,486	0,105	0,268	0,145	0,102	0,445
A8	0,536	0,533	0,072	0,021	0,018	0,051	0,536	0,016

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Flujos positivos y negativos de cada alternativa

Alternativa	Descripción	(ϕ^+)	(ϕ^-)
A1	Conversión total a gas natural	0,0791	0,0422
A2	Conversión total a biomasa	0,0472	0,0431
A3	Hibridación de carbón y gas natural	0,0627	0,0370
A4	Hibridación de carbón y biomasa	0,0497	0,0455
A5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	0,0459	0,0517
A6	Hibridación carbón y energía solar	0,0473	0,0349
A7	Sistemas con captura de carbono	0,0512	0,0708
A8	Cierre y reaprovechamiento posterior	0,2741	0,3319

Fuente: Adaptado del *software Visual PROMETHEE*.

Etapa 10 - Ranking de preferencia de las alternativas: El proceso de evaluación culminó con la diferencia entre los flujos positivos y negativos que permiten obtener el flujo neto (ϕ) para cada alternativa. El flujo neto proporciona un ranking claro de las alternativas, donde valores positivos más altos indican una alternativa más favorable, valores intermedios señalan opciones con potencial condicionado, y valores bajos o negativos reflejan limitaciones.

En la Tabla 21 se presenta el ranking derivado de la aplicación del método que expone la clasificación final de preferencias, mediante la obtención del flujo neto (ϕ) cabe destacar que cuanto

mayor sea el flujo neto, mejor es la alternativa. Las alternativas A1 y A3 lideran la clasificación, las alternativas A6, A4 y A2 presentan resultados intermedios, indicando un potencial condicionado que podría optimizarse mediante medidas complementarias. Finalmente, A5, A7 y A8 muestran flujos netos bajos, reflejando limitaciones en su desempeño y mayores desafíos para su implementación.

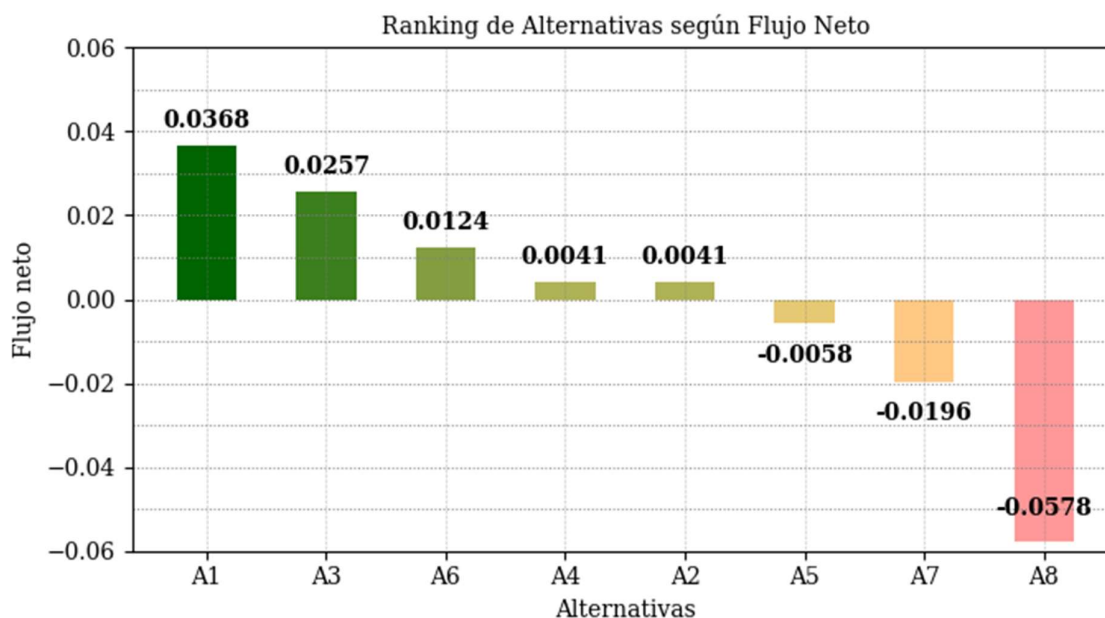
Mediante el procesamiento de los flujos de preferencia en el *software Visual PROMETHEE*, se generó la Figura 26 que presenta gráficamente el ranking de las alternativas de reconversión. Esta representación no solo confirma los resultados numéricos de las tablas anteriores, sino que facilita la identificación el desempeño relativo de cada alternativa.

Tabla 21. Ranking de las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón.

Ranking	Alternativa	Descripción	(ϕ)
1	A1	Conversión total a gas natural	0,0368
2	A3	Hibridación de carbón y gas natural	0,0257
3	A6	Hibridación carbón y energía solar	0,0124
4	A4	Hibridación de carbón y biomasa	0,0041
5	A2	Conversión total a biomasa	0,0041
6	A5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	-0,0058
7	A7	Sistemas con captura de carbono	-0,0196
8	A8	Cierre y reaprovechamiento posterior	-0,0578

Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Resultado gráfico de las Alternativas por el método PROMETHEE



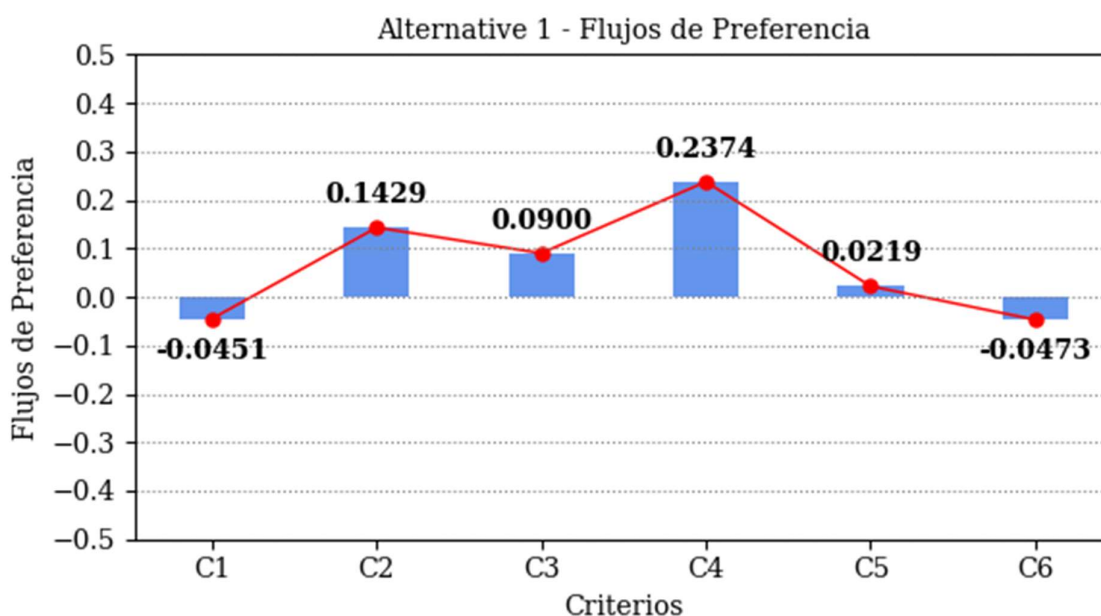
Fuente: Adaptado del *software Visual PROMETHEE*

Como se muestra en la Figura 26, la Alternativa 1 - Conversión total a gas natural (A1, $\phi=0,0368$) ocupa la mejor posición en comparación con las demás, seguida de la Alternativa 3 - Hibridación de carbón y gas natural (A3, $\phi=0,0257$) y luego la Alternativa 6 - Hibridación carbón y energía solar (A6= $\phi=0,0124$). La Alternativa 4 - Hibridación de carbón y biomasa (A4, $\phi=0,0041$) y la Alternativa 2 - Conversión total a biomasa (A2, $\phi=0,0041$) se encuentra en una posición intermedia, con un flujo positivo similar pero inferior a las tres primeras. Por otro lado, la Alternativa 5 - Cogeneración de electricidad e hidrógeno (A5, $\phi=-0,0058$) y la Alternativa 7 - Sistemas con captura de carbono (A7, $\phi=-0,0196$) presentan valores negativos, lo que indica que sus debilidades superan a sus fortalezas. Finalmente, la Alternativa 8 - Cierre y reaprovechamiento posterior (A8, $\phi=-0,0578$) ocupa la última posición en el ranking, con el flujo negativo más alto, lo que sugiere que es la opción menos favorable dentro del análisis realizado.

Así mismo, se generaron representaciones gráficas para cada alternativa, enriqueciendo el análisis al proporcionar una herramienta para la toma de decisiones con evidencia multidimensional. Estos gráficos son presentados a continuación.

La Figura 27 presenta el resultado gráfico de la Alternativa 1 - Conversión total a gas natural, en la cual se observa que el aspecto tecnológico presenta un desempeño positivo destacado (C4, $\phi=0,2374$), seguido del estructural (C2, $\phi=0,1429$) y el técnico (C3, $\phi=0,0900$). En contraste, el criterio ambiental muestra un impacto negativo (C1, $\phi=-0,0451$), mientras que el económico (C5, $\phi=0,0219$) y el social (C6, $\phi=-0,0473$) presentan una menor incidencia.

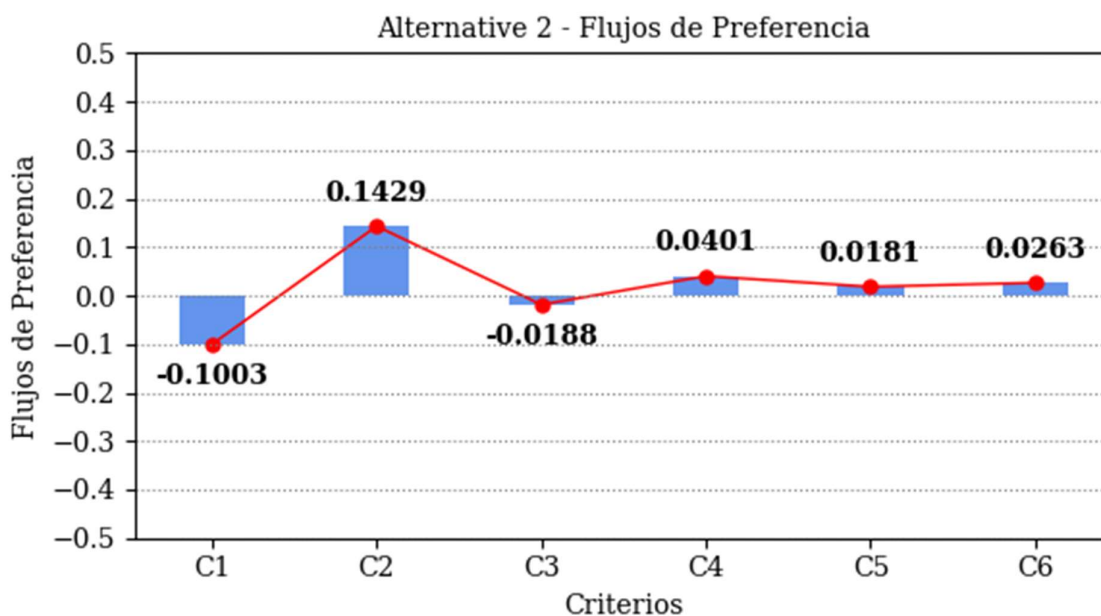
Figura 27. Resultado gráfico de la Alternativa 1 por el método PROMETHEE



Fuente: Adaptado del software *Visual PROMETHEE*

La Figura 28 muestra el resultado gráfico de la Alternativa 2 - Conversión total biomasa, en la cual se observa un desempeño negativo en el criterio ambiental (C1, $\phi=-0,1003$), mientras que en el aspecto estructural presenta una contribución positiva significativa (C2, $\phi=0,1429$). En el criterio técnico (C3, $\phi=-0,0188$) su impacto se encuentra muy próximo a cero, con una ligera ventaja en el tecnológico (C4, $\phi=0,0401$). Por otro lado, en los aspectos económico (C5, $\phi=0,0181$) y social (C6, $\phi=0,0263$) muestran una incidencia poco significativa.

Figura 28. Resultado gráfico de la Alternativa 2 por el método PROMETHEE

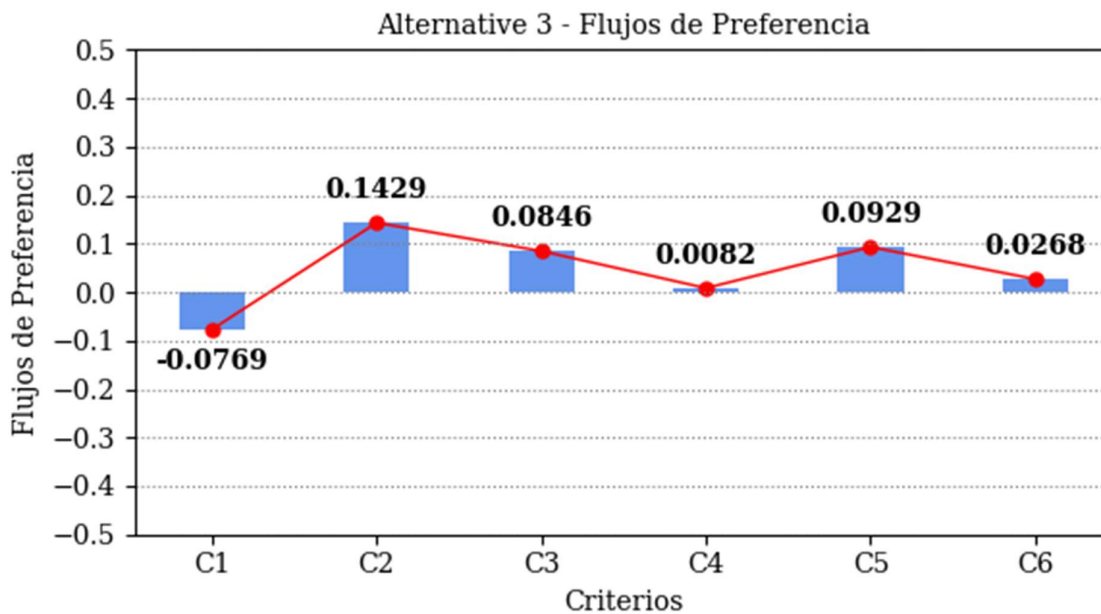


Fuente: Adaptado del software Visual PROMETHEE

La Figura 29 presenta el resultado gráfico de la Alternativa 3 - Hibridación de carbón y gas natural, en la cual se observa un impacto negativo en el criterio ambiental (C1, $\phi=-0,0769$), mientras que en el aspecto estructural (C2, $\phi=0,1429$) la alternativa presenta una contribución positiva notable. En el criterio técnico (C3, $\phi=0,0846$), su desempeño es positivo, al igual que en el tecnológico (C4, $\phi=0,0082$), aunque con menor intensidad. En el aspecto económico (C5, $\phi=0,0929$), la alternativa muestra una leve ventaja y en el criterio social (C6, $\phi=0,0268$) su impacto es levemente positivo.

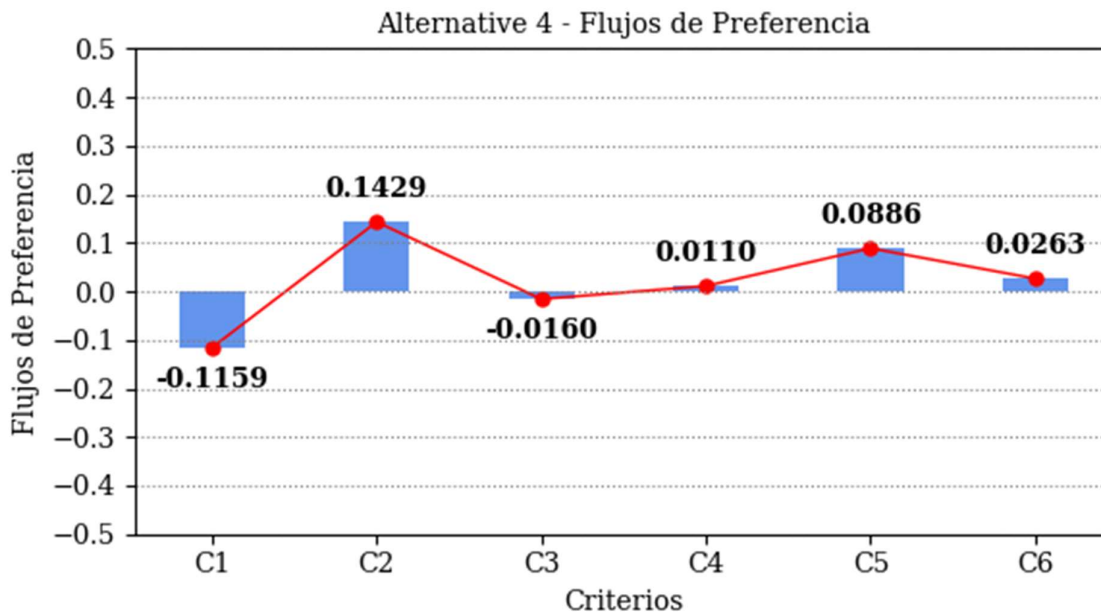
La Figura 30 representa el resultado gráfico de la Alternativa 4 - Hibridación de carbón y biomasa, en el cual se observa un impacto ambiental negativo (C1, $\phi=-0,1159$), mientras que en el criterio estructural (C2, $\phi=0,1429$) la alternativa muestra una contribución positiva considerable. En los aspectos técnicos (C3, $\phi=-0,0161$) y tecnológicos (C4, $\phi=0,0110$), su desempeño es apenas perceptible, mientras que en el económico (C5, $\phi=0,0886$) presenta una ligera ventaja. En el criterio social (C6, $\phi=0,0263$), su impacto es levemente positivo.

Figura 29. Resultado gráfico de la Alternativa 3 por el método PROMETHEE



Fuente: Adaptado del software *Visual PROMETHEE*

Figura 30. Resultado gráfico de la Alternativa 4 por el método PROMETHEE

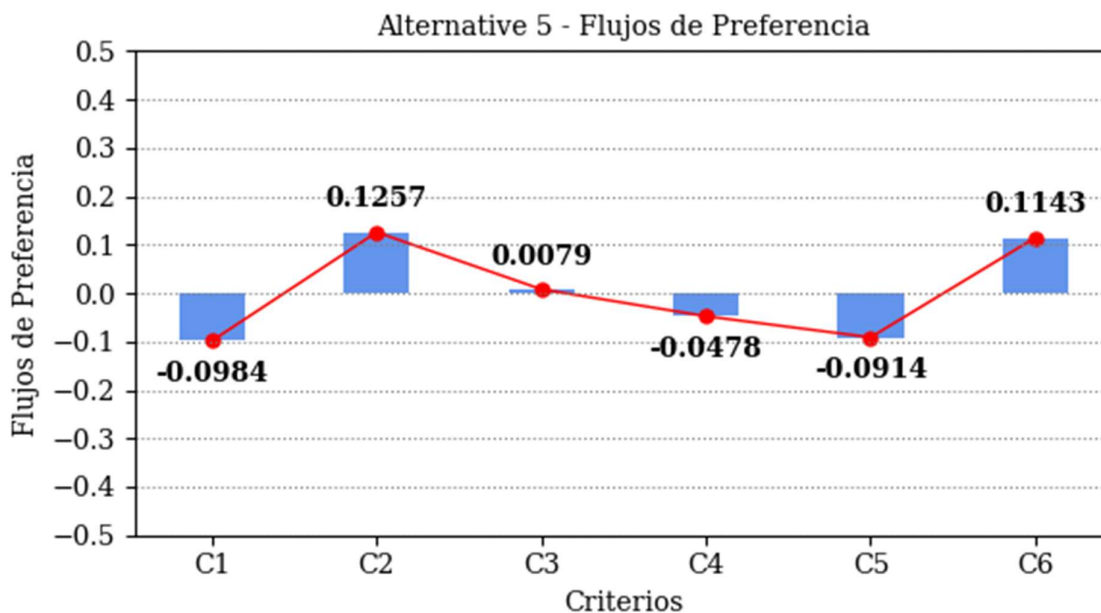


Fuente: Adaptado del software *Visual PROMETHEE*

La Figura 31 presenta el resultado gráfico de la Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno, en la cual se observa un impacto ambiental (C1, $\phi=-0,0984$) considerable y negativo, mientras que en el criterio estructural (C2, $\phi=0,1257$) su contribución es positiva y destacada. En el aspecto técnico (C3, $\phi=0,0079$), su efecto es mínimo, mientras que en el tecnológico (C4, $\phi=-0,0478$)

y económico (C5, $\phi=-0,0914$) presenta desventajas significativas. En el criterio social (C6, $\phi=0,1143$), la alternativa muestra un impacto positivo considerable.

Figura 31. Resultado gráfico de la Alternativa 5 por el método PROMETHEE

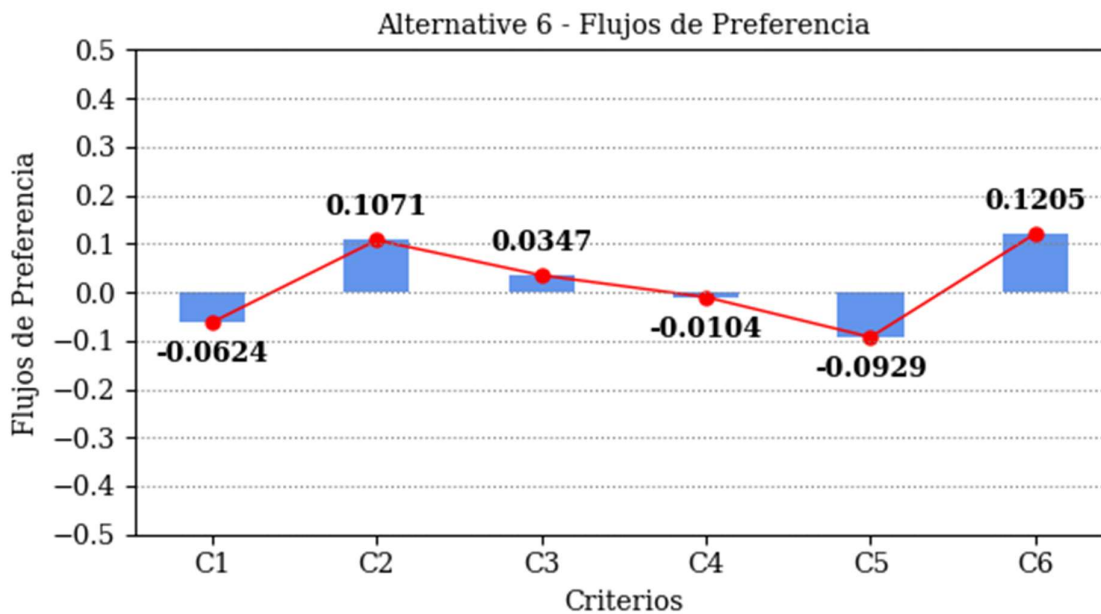


Fuente: Adaptado del *software Visual PROMETHEE*

La Figura 32 muestra los resultados gráficos de la Alternativa 6 - Hibridación carbón y energía solar, la alternativa presenta un impacto ambiental negativo leve (C1, $\phi=-0,0624$) y una reutilización considerable de la infraestructura (C2, $\phi=0,1071$). Su efecto técnico es moderado (C3, $\phi=0,0347$), mientras que su madurez tecnológica se encuentra limitada (C4, $\phi=-0,0104$). Económicamente, implica desventaja significativa (C5, $\phi=-0,0929$), pero socialmente tiene un impacto positivo (C6, $\phi=0,1205$) al favorecer el empleo.

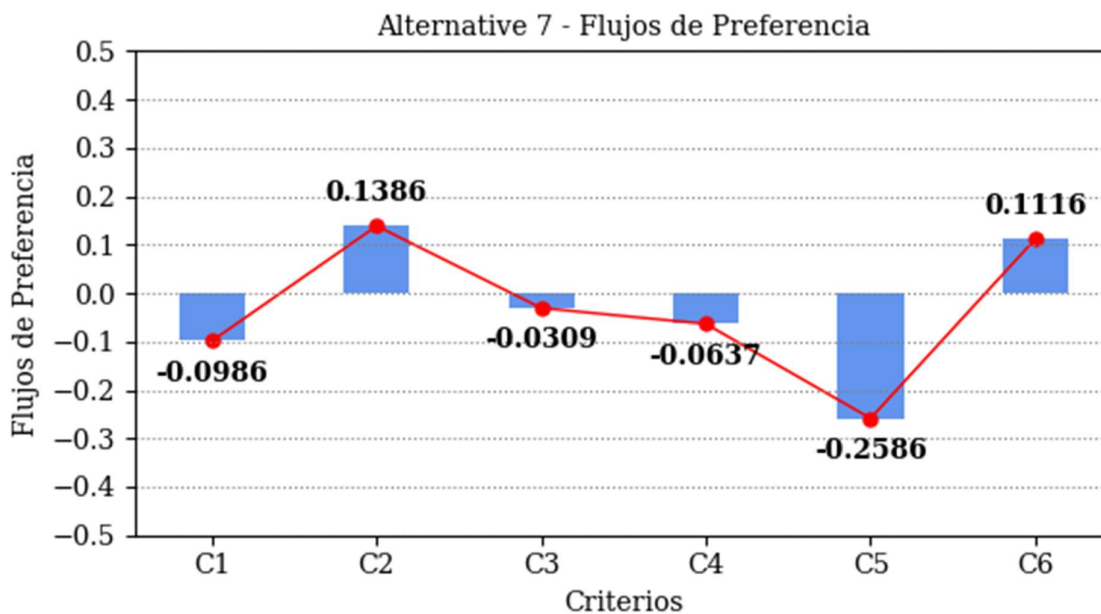
La Figura 33 presenta los resultados gráficos de la Alternativa 7- Sistemas con captura de carbono, la alternativa muestra un impacto ambiental con flujo negativo (C1, $\phi=-0,0986$) y una reutilización estructural favorable (C2, $\phi=0,1386$). Su efecto técnico es limitado (C3, $\phi=-0,0309$), mientras que su madurez tecnológica (C4, $\phi=-0,0637$) presenta una desventaja moderada en comparación con el aspecto económico, que presenta un flujo negativo significativo (C5, $\phi=-0,2586$), aunque en el ámbito social tiene un impacto positivo aceptable (C6, $\phi=0,1116$).

Figura 32. Resultado gráfico de la Alternativa 6 por el método PROMETHEE



Fuente: Adaptado del software *Visual PROMETHEE*

Figura 33. Resultado gráfico de la Alternativa 7 por el método PROMETHEE

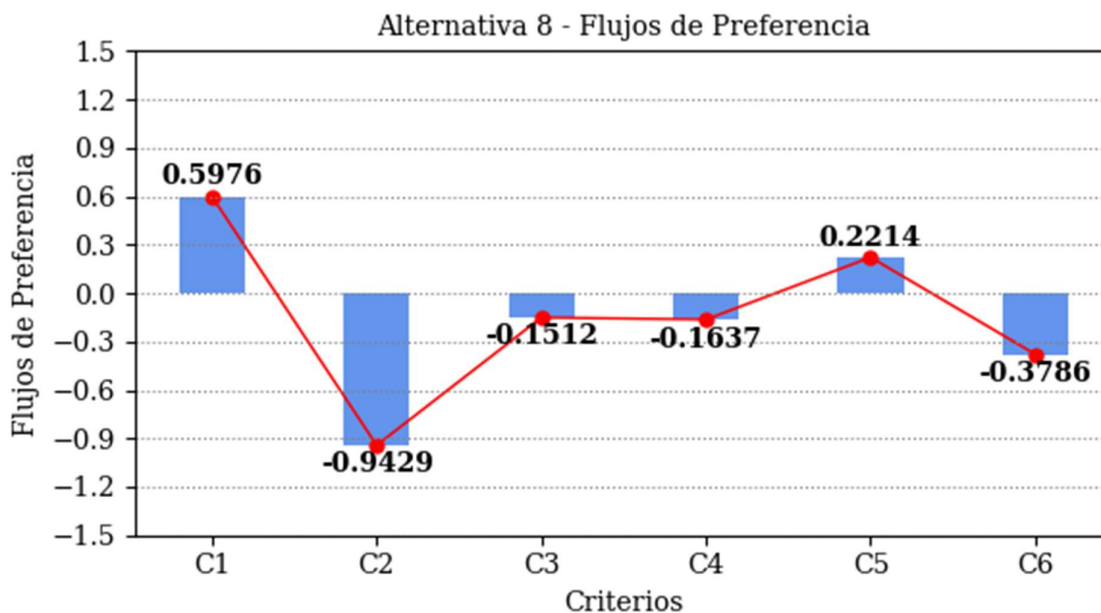


Fuente: Adaptado del software *Visual PROMETHEE*

La Figura 34 despliega los resultados visuales para la Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior, esta alternativa destaca por su impacto ambiental positivo (C1, $\phi=0,5976$), aunque presenta una reutilización estructural notablemente desfavorable (C2= $-0,9424$). Su rendimiento técnico (C3, $\phi = -0,1512$) y madurez tecnológica (C4, $\phi=-0,1637$) se encuentran

limitada. En términos económicos, presenta un flujo positivo (C5, $\phi=0,2214$), mientras que su impacto social es considerablemente negativo (C6, $\phi=-0,3786$).

Figura 34. Resultado gráfico de la Alternativa 8 por el método PROMETHEE



Fuente: Elaborado en el software *Visual PROMETHEE*

Al comparar los resultados obtenidos con la bibliografía consultada, se observan coincidencias significativas que respaldan los resultados del estudio. La Alternativa 1- Conversión total a gas natural, que ocupa el primer lugar en el ranking, muestra una consistencia notable con los hallazgos de autores como Mac, Brouwer y Samuelsen (2018) y Safari *et al.* (2019). Estos estudios destacan la alta eficiencia del gas natural, su contribución a la reducción de emisiones de dióxido de carbono y su rentabilidad, especialmente en contextos donde ya existe infraestructura para su distribución. Estas ventajas posicionan al gas natural como una de las opciones más viables y como un combustible puente a la transición energética.

En segundo lugar, la Alternativa 3 - Hibridación de carbón y gas natural también demuestra un desempeño destacado, alineándose con investigaciones como la de Mills (2018). Ambas alternativas se perfilan como las más viables en términos generales, con una diferencia mínima entre ellas, lo que refleja una competitividad considerable y sugiere que ambas podrían ser opciones complementarias en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

En tercer lugar, la Alternativa 6 - Hibridación de carbón y energía solar resalta la creciente relevancia de las energías renovables en la transición energética. Los resultados son consistentes con estudios que señalan el gran potencial de la energía solar, aunque advierten que su intermitencia puede

limitar su efectividad cuando se combina con fuentes tradicionales como el carbón. Esta alternativa representa un equilibrio entre innovación y aprovechamiento de infraestructura existente.

La Alternativa 4 - Hibridación de carbón y biomasa; y la Alternativa 2 - Conversión total a biomasa ocupan el cuarto y quinto lugar, mostrando un desempeño menos eficiente en comparación con el gas natural, pero manteniéndose como una opción viable debido a su capacidad para reducir emisiones de carbono y fomentar la sostenibilidad. Sin embargo, como señalan Miedema *et al.* (2017), su competitividad puede verse limitada por los costos logísticos y la disponibilidad de recursos, lo que sugiere la necesidad de políticas de apoyo para su implementación a gran escala.

En contraste, la Alternativa 5 - Cogeneración de electricidad e hidrógeno presenta un desempeño inferior, lo que indica mayores desafíos en términos de viabilidad técnica y económica. Esta opción, aunque prometedora en ciertos contextos, enfrenta limitaciones que dificultan su adopción generalizada. La Alternativa 7 - Sistemas con captura de carbono también muestra un puntaje bajo, lo que refuerza los argumentos de estudios previos que cuestionan su viabilidad debido a los altos costos y la reducción en el rendimiento energético.

Finalmente, la Alternativa 8 -Cierre y reaprovechamiento posterior obtuvo el peor desempeño, resultado que coincide con la literatura existente. Esta opción suele considerarse la menos favorable debido a la pérdida de infraestructura y el impacto social negativo en términos de empleo.

Al comparar estos resultados con estudios anteriores, se confirma la tendencia observada en trabajos como los de González, Kirsten y Prchlik (2018), quienes destacan la eficiencia del gas natural en la reducción de emisiones y su viabilidad económica. Asimismo, la co-combustión de carbón y biomasa, aunque ligeramente menos eficiente, se mantiene como una alternativa viable para la transición energética, tal como lo describen Kamble *et al.* (2019). Sin embargo, como señalan Xu *et al.* (2020), estas alternativas requieren marcos regulatorios sólidos y políticas de apoyo para ser competitivas en mercados globales.

Estos resultados no solo están respaldados por la literatura, sino que también proporcionan una base sólida y una herramienta para la toma de decisiones en el diseño de estrategias de transición energética.

8. DISCUSIÓN

En este apartado se presenta la discusión sobre las alternativas de reconversión evaluadas mediante el proceso multicriterio y se consolidan los argumentos que respaldan las soluciones más prometedoras.

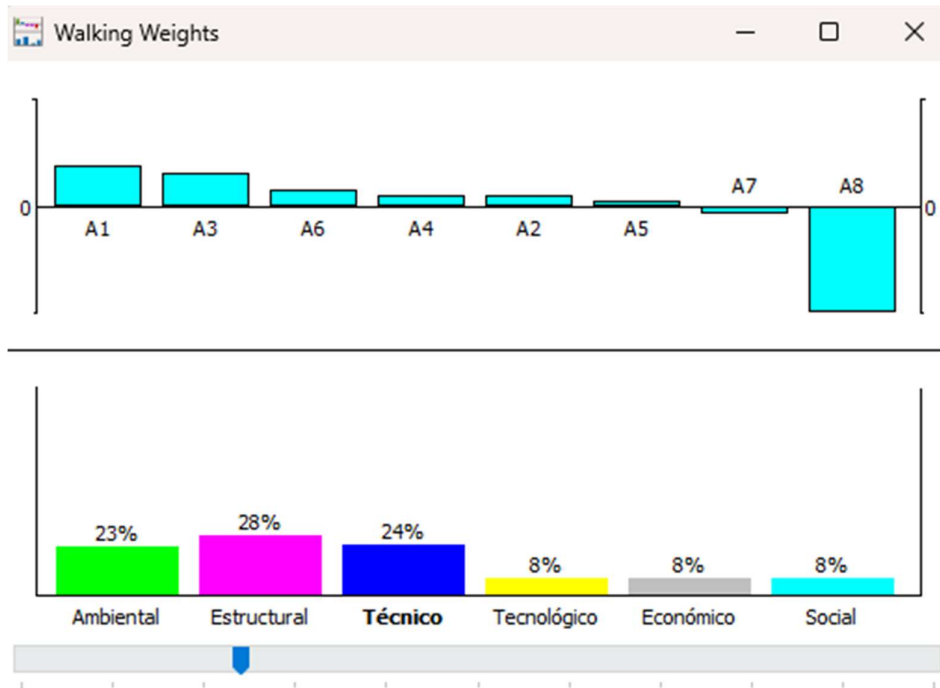
8.1. VALIDACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE RECONVERSIÓN

La elección del enfoque basado en la combinación de AHP y PROMETHEE está sustentada en su capacidad probada para generar soluciones robustas y justificadas en entornos de decisión complejos y multidimensionales. La consistencia interna del modelo fue verificada mediante la Razón de Consistencia (RC) en el método AHP, el cual arrojó valores inferiores al umbral del 10% en todas las matrices comparativas, garantizando la validez lógica de las ponderaciones asignadas. Asimismo, el uso de PROMETHEE permitió obtener un ordenamiento completo de las alternativas con base en flujos de preferencia neta (ϕ), ofreciendo no solo un ranking, sino también una representación visual de la dominancia relativa de cada alternativa. Aunque este enfoque no busca una optimización matemática global en el sentido tradicional, se trata de una optimización multicriterio basada en preferencias, que refleja los valores asignados por expertos y evidencia empírica. De este modo, las soluciones obtenidas son validadas desde el punto de vista metodológico, fortaleciendo su aplicabilidad en procesos reales de toma de decisiones estratégicas.

Para evaluar la robustez del modelo ante cambios en los juicios de preferencia, se utilizó la herramienta *Walking Weight* de *Visual PROMETHEE*. Se simularon dos escenarios: i) el criterio ambiental baja a 23% y el técnico sube a 24%, y ii) el criterio estructural sube a 36% mientras que el ambiental baja a 26%. Los resultados mostraron que, si bien se observaron leves variaciones en los valores absolutos de los flujos, el ordenamiento general de las alternativas permaneció estable, especialmente en las posiciones superiores (A1, A2 y A3), lo cual indica una alta robustez del modelo frente a cambios razonables en los juicios de preferencia. Esta consistencia valida la confiabilidad de la combinación metodológica AHP–PROMETHEE para apoyar decisiones estratégicas en contextos complejos.

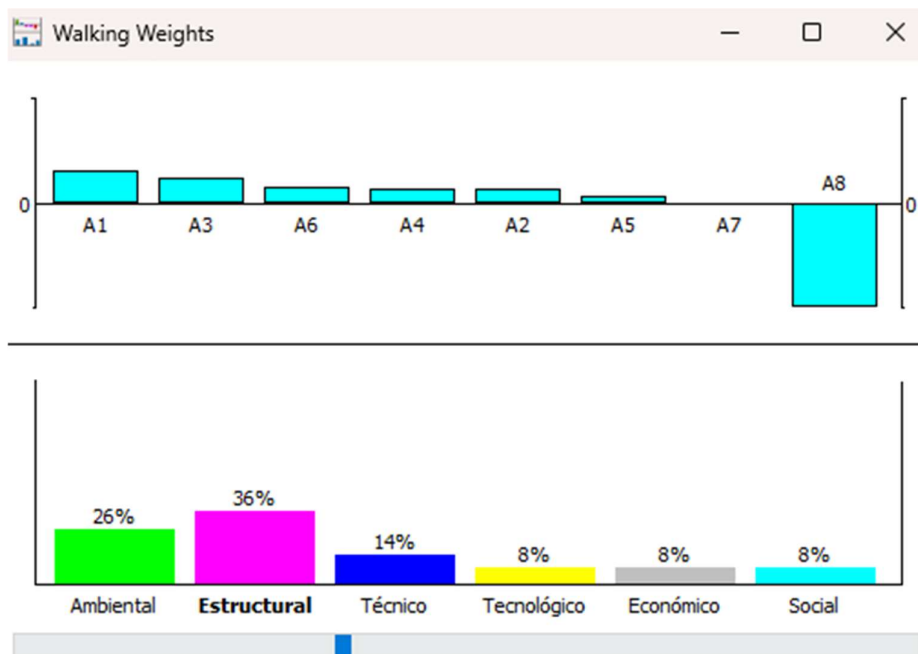
La simulación de los escenarios puede observarse en la Figura 35 que corresponde al primer escenario de disminución del peso del criterio ambiental al 23% y aumento del peso del criterio técnico al 24%. La Figura 36 que corresponde al segundo escenario de aumento del peso del criterio estructural al 36% y disminución del peso del criterio ambiental al 26%.

Figura 35. Análisis de sensibilidad en el primer escenario



Fuente: Elaborado en el software *Visual PROMETHEE*

Figura 36. Análisis de sensibilidad en el segundo escenario



Fuente: Elaborado en el software *Visual PROMETHEE*

Los resultados confirman que la conversión total a gas natural emerge como la alternativa más viable (A1, $\phi = +0,0368$), validando los hallazgos de Mac *et al.* (2018) sobre reducciones significativas de emisiones (23% CO₂). Esta opción se consolida por su alta eficiencia térmica (65% en ciclos combinados, Safari *et al.*, 2019) y bajos costos de capital (25%), además de ofrecer flexibilidad operativa. Asimismo, la viabilidad limitada de la captura de carbono (A7, $\phi = -0.0196$) corrobora los análisis de Lockwood (2017) sobre sus altos costos (hasta +80% en generación) y pérdidas de eficiencia (-10%). Casos prácticos como el estudiado por Rogieri *et al.* (2023) en el Complejo Jorge Lacerda (Brasil) respaldan estos resultados, destacando que la transición requiere no solo tecnología, sino marcos regulatorios y financiamiento accesible. Por otro lado, la hibridación carbón y energía solar (A6, $\phi = +0,0124$) replica las conclusiones de Serrano *et al.* (2019), quienes identificaron mejoras del 4,6% en la eficiencia, aunque con mayores costos de capital (8050/kW vs 5979/kW del carbón).

La integración de los métodos Proknow-C, AHP y PROMETHEE aportó una complementariedad robusta. El Proknow-C aseguró una base bibliográfica rigurosa (26 artículos y 13 patentes) permitiendo la obtención de las alternativas de reconversión para la transición energética en unidades generadoras a carbón. El AHP, reveló pesos consistentes en la evaluación cuantitativa de las alternativas (RC=0,05% y RC=0,63%), confirmando la priorización coherente de criterios (RC<10%). La convergencia entre los pesos derivados de la revisión bibliográfica y las encuestas a 14 expertos donde las tres principales alternativas coincidieron refuerza la confiabilidad del modelo. Esta coherencia metodológica es crítica para estudios multicriterio, como señala Calabrese *et al.* (2019), ya que minimiza sesgos subjetivos en la toma de decisiones complejas.

Mientras que PROMETHEE validó estas ponderaciones mediante flujos netos calculados matemáticamente. Teniendo en cuenta soluciones como la hibridación solar (Figura 13) que no solo reducen emisiones (-35% vs carbón, según Mills, 2018). Sino que generan empleo (flujo social positivo), clave para transiciones justas (Bertinat, 2016).

Los flujos netos (ϕ) revelaron patrones clave que no solo jerarquizan alternativas, sino que guían políticas públicas:

- Alternativas con $\phi > 0$ (gas natural, hibridaciones): Requieren incentivos que mitiguen sus debilidades. El gas natural necesita mecanismos de precio al carbono (como propone Mac *et al.*, 2018) para compensar sus emisiones residuales. Estos resultados son prioritarios.
- Alternativas con $\phi < 0$ (hidrógeno, sistemas de captura): Demandan Investigación y Desarrollo (I+D) para mejorar su competitividad. Los resultados de Wei *et al.* (2024) sobre co-combustión de hidrógeno sugieren que tecnologías emergentes podrían revalorizar estas opciones. Estos resultados presentan potencial a futuro.

8.2. IMPLICACIONES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

El gas natural como una Solución Puente; en este contexto, la conversión total a gas natural se destaca como la alternativa más viable en el corto plazo, al ofrecer un equilibrio favorable entre beneficios ambientales, viabilidad técnica y factibilidad económica. Su implementación permite reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que aprovecha tecnologías ya maduras y adaptables a las infraestructuras existentes.

Desde el punto de vista de las políticas públicas, se recomienda la adopción de instrumentos económicos que incentiven la reconversión, tales como la implementación de impuestos al carbono que establezcan un precio mínimo equivalente al costo social del carbono en economías emergentes. Asimismo, se sugiere la creación de mecanismos de apoyo financiero, como créditos fiscales que cubran entre el 30 % y el 50 % de los costos de capital asociados a la reconversión, condicionados al cumplimiento de cláusulas de desempeño ambiental verificable.

En lo que respecta a la planificación energética nacional, se propone priorizar aquellas regiones que ya cuentan con redes de distribución de gas natural desarrolladas, así como enfocar los esfuerzos de reconversión en las centrales a carbón con más de 15 años de operación, dado que estas presentan un mayor potencial de retorno en procesos de modernización.

Como opción concreta, se plantea la implementación de un programa denominado "Gas para la Transición", el cual podría contemplar líneas de crédito con tasas preferenciales destinadas a proyectos de reconversión, acompañadas de requisitos de monitoreo continuo de emisiones, garantizando así la transparencia y el cumplimiento de los objetivos ambientales.

Las hibridaciones como Camino hacia las Renovables; las soluciones híbridas representan una vía estratégica hacia la integración progresiva de fuentes renovables, al ofrecer un equilibrio atractivo entre sostenibilidad, flexibilidad operativa y aprovechamiento de recursos locales. Este tipo de configuraciones, que combinan tecnologías convencionales con energías renovables, resultan especialmente valiosas en contextos donde la infraestructura existente aún no permite una sustitución total de los combustibles fósiles, pero sí admite una transición gradual y adaptable.

En términos de políticas públicas, se recomienda la adopción de instrumentos económicos específicos que fomenten el desarrollo de estas soluciones. Por un lado, se sugiere financiar entre el 15 % y el 20 % del costo total de los sistemas de almacenamiento térmico a través de fondos climáticos internacionales o mecanismos de financiamiento verde. Por otro lado, se plantea incentivar el uso de biomasa local, mediante programas de apoyo a pequeños y medianos productores agrícolas, podrían aprovecharse residuos agrícolas como los de la producción de soja para alimentar sistemas híbridos con carbón.

Desde la perspectiva de la planificación energética nacional, se propone la creación de Zonas de Hibridación Prioritarias, definidas con base en el potencial renovable del territorio. Entre los criterios sugeridos se incluyen niveles elevados de radiación solar (superiores a 5 kWh/m²/día) y la disponibilidad de biomasa en un radio inferior a 50 km desde las plantas generadoras. Estas zonas permitirían focalizar inversiones e incentivos, promoviendo el desarrollo de cadenas de suministro locales que fortalezcan la economía regional y aumenten la viabilidad técnica y logística de los proyectos.

Las soluciones híbridas se presentan como una alternativa efectiva y escalable para avanzar hacia una matriz energética más limpia, particularmente en regiones con alta irradiación solar o fuerte actividad agroindustrial, donde el aprovechamiento de recursos endógenos puede generar impactos positivos tanto ambientales como socioeconómicos.

Las tecnologías Emergentes como Preparación al Futuro, las tecnologías emergentes, como la captura de carbono y la producción y uso de hidrógeno, representan componentes clave en la transición hacia un sistema energético de bajas emisiones. Aunque aún enfrentan desafíos tecnológicos, económicos y regulatorios, su incorporación temprana a las estrategias de reconversión resulta esencial para preparar al sector energético frente a futuros escenarios de descarbonización más exigentes.

En este sentido, se recomienda el diseño de instrumentos económicos que impulsen la maduración y adopción de estas tecnologías. Una medida estratégica es el establecimiento de consorcios tecnológicos público-privados, conformados por empresas del sector energético, universidades e institutos de investigación, con el objetivo de desarrollar proyectos piloto que permitan escalar soluciones innovadoras en condiciones reales de operación. Asimismo, se propone la creación de Zonas Económicas Especiales en las cercanías de centrales reconvertidas, dotadas de infraestructura compartida como laboratorios de I+D, redes de distribución de hidrógeno o espacios para pruebas industriales, fomentando la colaboración y la transferencia de conocimiento.

La reconversión energética, además, debe considerar el componente social mediante la implementación de programas que acompañen a los trabajadores en el proceso de transición. Para ello, se sugiere la creación de programas de capacitación técnica especializada, como las denominadas “Escuelas de Energía Limpia”, que ofrezcan formación en operación, mantenimiento y control de plantas basadas en tecnologías limpias y emergentes. A la par, se recomienda implementar políticas activas de empleo, como un programa de “Reconversión laboral” que subsidie hasta el 20 % del salario de trabajadores en transición durante los dos primeros años de inserción en actividades vinculadas a las nuevas tecnologías.

Estas medidas, integradas de forma estratégica, pueden fortalecer la base tecnológica y humana necesaria para viabilizar una transición energética inclusiva, sostenible e impulsada por la innovación.

La transición óptima requiere un enfoque por etapas; a corto plazo priorizar la conversión a gas natural e implementar instrumentos económicos clave, a mediano plazo escalar soluciones híbridas y desarrollar cadenas de suministro locales, a largo plazo incorporar tecnologías emergentes y consolidar mercados de energías limpias. Este enfoque gradual, combinado con políticas sociales complementarias, ofrece un camino realista hacia la descarbonización del sector eléctrico, asegurando tanto la sostenibilidad ambiental como el desarrollo económico regional.

La replicabilidad exitosa dependerá de la flexibilidad regulatoria para ajustar subsidios según avances tecnológicos, la cooperación regional en cadenas de suministro (mercado común de biomasa en Mercosur) y el monitoreo continuo mediante indicadores de desempeño (emisiones/empleo por MWh generado). Este marco ofrece una hoja de ruta realista para alcanzar los ODS 7 y 13, equilibrando los objetivos climática con desarrollo energético y socioeconómico

8.3. LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente estudio, si bien ofrece un análisis robusto de alternativas para la reconversión de centrales termoeléctricas, presenta limitaciones que abren oportunidades para investigaciones futuras. Una de las principales restricciones radica en sus resultados predominantemente cuantitativos, si bien proporcionó una evaluación objetiva de criterios, dejó espacio para profundizar en aspectos sociales complejos como la percepción comunitaria. Como futuros estudios, esta investigación propone integrar metodologías cualitativas (entrevistas, grupos focales) para evaluar percepciones comunitarias y dimensiones de justicia energética no capturadas en este análisis, así como el análisis de conflictos socioambientales. Esto permitiría evaluar dimensiones clave de justicia energética, incluyendo la distribución espacial de beneficios y riesgos, así como los mecanismos de participación ciudadana en los procesos de reconversión.

Asimismo, se identifica la necesidad de incluir un análisis financiero más directo, considerando los gastos de capital (*Capital Expenditure* - CAPEX) y gastos operativos (*Operating Expenses* - OPEX), lo cual enriquecería la comprensión de la viabilidad económica de las alternativas y contribuiría a la formulación de propuestas más completas para futuros trabajos. Del mismo modo, se recomienda adaptar el marco multicriterio a contextos regionales específicos, como aquellos países con matriz carbonífera rígida o con limitado acceso a gas natural, a fin de asegurar que los resultados conserven su pertinencia y aplicabilidad práctica.

Otra extensión fundamental sería incorporar Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completas para comparar las alternativas considerando impactos a lo largo de toda su cadena de valor, ofreciendo una perspectiva más integral de la sostenibilidad, considerando bases de datos específicas o regionalizadas para aumentar la precisión de los resultados.

Estas ampliaciones metodológicas permitirían una evaluación más holística de la transición energética, combinando rigor técnico con consideraciones de justicia social y sostenibilidad. La integración de estas dimensiones resulta crucial para diseñar políticas energéticas que sean no solo efectivas en reducir emisiones, sino también socialmente inclusivas y ambientalmente responsables en todas las etapas del ciclo de vida. La robustez de los futuros estudios propuestos dependerá del rigor académico basado en evidencia científica y de la relevancia práctica, siguiendo la línea de lo presentado en este estudio.

9. CONCLUSIÓN

Este estudio cumplió con los objetivos específicos planteados, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en la reconversión de unidades generadoras a carbón. En primer lugar, conforme al objetivo (1), se establecieron las bases teóricas mediante un análisis exhaustivo de la literatura científica y de propiedad intelectual, utilizando el método Proknow-C para seleccionar estudios relevantes (26 artículos y 13 patentes). Este enfoque permitió identificar las principales alternativas para la reconversión, abarcando tanto desarrollos tecnológicos como enfoques prácticos, lo que garantizó una base teórica robusta y actualizada.

En segundo lugar, en relación con el objetivo (2), se evaluaron cuantitativamente las alternativas mediante el método AHP, el cual permitió ponderar criterios clave para promover la transición energética hacia fuentes más sostenibles y proporcionó una comparación cuantitativa y multifactorial de las opciones disponibles. El AHP, reveló pesos consistentes en la evaluación cuantitativa de las alternativas ($RC= 0,05\%$ y $RC= 0,63\%$), confirmando la priorización coherente de criterios ($RC<10\%$). La convergencia entre los pesos derivados de la revisión bibliográfica y las encuestas a 14 expertos donde las tres principales alternativas coincidieron refuerza la confiabilidad del modelo. Esta coherencia metodológica es crítica para estudios multicriterio, como señala Calabrese *et al.* (2019), ya que minimiza sesgos subjetivos en la toma de decisiones complejas.

En tercer lugar, en relación con el objetivo (3), se lleva a cabo la ponderación de las alternativas, calculando sus pesos mediante la media aritmética de los resultados obtenidos en el análisis AHP. Lo que permitió calcular los flujos de preferencia mediante el método PROMETHEE, utilizando el *software Visual PROMETHEE*. Finalmente, se presenta el ranking de alternativas, estableciendo un orden de preferencia para la reconversión o el aprovechamiento de las unidades generadoras a carbón, facilitando así la toma de decisiones estratégicas.

Este análisis proporcionó una respuesta clara y objetiva a la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las alternativas de mayor factibilidad para la reconversión de las unidades generadoras a carbón que promuevan la transición energética mediante la integración de fuentes de energía más sostenibles? Los resultados identificaron que las alternativas más viables son la conversión total a gas natural, que encabeza el ranking debido a su alta eficiencia, reducción de emisiones y rentabilidad, especialmente en contextos donde existe infraestructura para su distribución; la hibridación de carbón y gas natural se posiciona como una opción competitiva y complementaria, con un desempeño cercano al gas natural y la hibridación de carbón y energía solar, refleja la creciente relevancia de las energías renovables, aunque su intermitencia plantea desafíos que deben ser considerados.

Estas alternativas destacan por su capacidad para integrar fuentes menos contaminantes y

tecnológicamente maduras, lo que las convierte en las opciones más viables para la reconversión de las plantas actuales. Por otro lado, alternativas de hibridación de carbón y biomasa como la conversión total a biomasa mostraron un desempeño inferior, principalmente debido a limitaciones técnicas y logísticas. Asimismo, la cogeneración de electricidad e hidrógeno y los sistemas con captura de carbono obtuvieron los puntajes más bajos, lo que refuerza los argumentos de la literatura que cuestionan su viabilidad en términos de costos y rendimiento. Finalmente, el cierre y reaprovechamiento posterior obtuvo el último lugar en el ranking principalmente por la pérdida en la infraestructura y el impacto social negativo en cuanto la reducción de empleos.

Los flujos netos (ϕ) revelaron patrones clave que no solo jerarquizan alternativas, sino que guían políticas públicas:

Alternativas con $\phi > 0$ (gas natural, hibridaciones): Requieren incentivos que mitiguen sus debilidades. El gas natural necesita mecanismos de precio al carbono (como propone Mac *et al.*, 2018) para compensar sus emisiones residuales. Estos resultados son prioritarios.

Alternativas con $\phi < 0$ (hidrógeno, sistemas de captura): Demandan I+D para mejorar su competitividad. Los resultados de Wei *et al.* (2024) sobre co-combustión de hidrógeno sugieren que tecnologías emergentes podrían revalorizar opciones. Estos resultados presentan potencial a futuro.

Como recomendaciones para aplicaciones prácticas este estudio guía el diseño de políticas públicas diferenciadas por horizonte temporal: a corto plazo, priorizar la conversión a gas natural mediante instrumentos económicos como impuestos al carbono (equivalente al costo social en economías emergentes) y créditos fiscales (30-50% de costos de capital), focalizando en regiones con infraestructura gasística desarrollada. A mediano plazo, escalar hibridaciones renovables con incentivos a cadenas locales (fondos para almacenamiento térmico o agricultores de biomasa) y establecer Zonas Prioritarias según potencial solar (>5 kWh/m²/día) o disponibilidad de recursos. A largo plazo, impulsar tecnologías emergentes (hidrógeno, CAC) mediante consorcios público-privados y políticas activas de empleo (programas de capacitación laboral en comunidades afectadas).

La replicabilidad exitosa dependerá de: la flexibilidad regulatoria para ajustar subsidios según avances tecnológicos, la cooperación regional en cadenas de suministro (mercado común de biomasa) y el monitoreo continuo mediante indicadores de desempeño (emisiones/empleo por MWh generado). Este marco ofrece una hoja de ruta realista para los ODS 7 y 13, equilibrando los objetivos climática con desarrollo energético y socioeconómico.

Las recomendaciones aquí planteadas buscan guiar tanto la acción inmediata como la generación de conocimiento futuro, con un enfoque en la equidad y la sostenibilidad. Los resultados subrayan la necesidad de considerar marcos regulatorios sólidos y políticas de apoyo, para garantizar

la competitividad de estas alternativas en mercados globales. Es crucial fomentar una transición energética que sea no solo sostenible, sino también justa, para alinear el crecimiento de la demanda energética con los objetivos climáticos globales. Una transición energética justa ofrece la oportunidad de establecer las bases para una economía sostenible y competitiva, creando nuevos empleos y aumentando la inversión, lo que a su vez impulsa la innovación tecnológica.

Los resultados de este estudio respaldan directamente su objetivo al identificar y clasificar las alternativas más viables para la reconversión de unidades generadoras a carbón, utilizando un sólido enfoque multicriterio. La integración de los métodos Proknow-C, AHP y PROMETHEE proporcionó un marco de evaluación consistente y transparente. Al abordar la falta de evaluaciones integradas y estandarizadas en la literatura, el estudio realiza contribuciones académicas y prácticas a la planificación energética y el diseño de políticas, reforzando la eficacia de la metodología propuesta para subsanar la brecha de investigación identificada sobre evaluaciones multicriterio. Al combinar una base bibliográfica rigurosa, una evaluación basada en expertos y una clasificación matemática de decisiones, el marco propuesto demuestra ser una herramienta eficaz para la planificación energética informada y contextualizada. Fortalece la contribución científica y aporta valor estratégico para orientar las estrategias de eliminación gradual del carbón en regiones donde la infraestructura sigue siendo relevante y la transformación urgente.

En conclusión, este trabajo proporciona una herramienta útil para la toma de decisiones estratégicas, destacando la importancia de un enfoque integral que considere no solo los aspectos técnicos y económicos, sino también los impactos ambientales y sociales. Los resultados obtenidos representan un avance significativo en la identificación de alternativas viables para la transición energética, contribuyendo así a la construcción de un sistema energético más sostenible y resiliente.

REFERENCIAS

ABSOLAR. **Energia solar fotovoltaica em Brasil - Infográfico ABSOLAR**. 2022. Disponible en: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>> Accedido el: 21 abr. 2024.

ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Presentación**. Asunción. Disponible en: <<https://www.ande.gov.py/institucional.php>>. Accedido el 23 de dic. 2024.

AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021**. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021>. Accedido el: 05 abr. 2024.

AGENCIA SENADO. **CAE aprova regulamentação do mercado de redução de emissões de carbono**. Brasília, 2022. Disponible en: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/11/29/cae-aprova-regulamentacao-do-mercado-de-reducao-de-emissoes-de-carbono>> Accedido el: 22 abr. 2024.

AHMAD, R. D. *et al.* Assessment on Energy Conversion Efficiency and GHG Emissions Rate for Coal, Natural Gas and Biomass Power Plant in Malaysia. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**. 2021. Disponible en: <http://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/8248> Accedido el: 22 dic. 2024.

BERTINAT, P. Transición energética justa: Pensando la democratización energética. **Friedrich Ebert Stiftung -FES**, 2016. Disponible en: <<https://viejo.unter.org.ar/node/15222>> Accedido el: 18 dic. 2024.

BNAMERICAS. **Los mayores actores de generación termoeléctrica en Brasil**. Santiago, 2022. Disponible en: <<https://www.bnamericas.com/es/noticias/los-mayores-actores-de-generacion-termoelectrica-en-brasil>> Accedido el: 23 abr. 2024.

BRANS, J.P.; VINCKE, P.H. A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making. **Management Science**, v. 31, n. 6, p. 647-784, 1985. Disponible en: <<https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/mnsc.31.6.647>> Accedido el: 23 dic. 2024.

BRASIL. Projeto de Lei Nº 412 de 2022. Senador Chiquinho Feitosa (DEM/CE). **Senado Federal**, Brasília, DF. 2022. Disponible en: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9076235&ts=1688036310931&disposition=inline&_gl=1*9e65wm*_ga*MzY5MTc5NDQ0LjE2ODg2NzQwMTQ.*_ga_CW3ZH25XMK*MTY4ODY3NDAxNC4xLjEuMTY4ODY3NDIyMy4wLjAuMA> Accedido el: 04 abr. 2024.

BUDAK, G. *et al.* A systematic approach for assessment of renewable energy using analytic hierarchy process. **Energy, Sustainability and Society**. 2019. Disponible en: <<https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0219-y>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

CALABRESE, A. *et al.* Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues. **Technological Forecasting and Social Change**. 2019. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162518303676>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

CASAU, M. *et al.* Coal to Biomass Conversion as a Path to Sustainability: A Hypothetical Scenario at Pego Power Plant (Abrantes, Portugal). **Resources**. 2021. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2079-9276/10/8/84>>. Accedido el: 21 dic. 2024.

ÇETIN, B.; AVCI, H. Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**. 2020. Disponible en: <<https://avesis.yildiz.edu.tr/yayin/ce52e5c9-d1ef-4e8c-bb81-7ec1c2b1a488/technical-and-economic-analysis-of-the-conversion-on-an-existing-coal-fired-thermal-power-plant-to-solar-aided-hybrid-power-plant>>. Accedido el: 21 dic. 2024.

CHENGJUN, Z. **Coal-fired power plant coupling biomass direct combustion power generation method**, Patente CN110388639, 2019.

CHICHERIN, S.; ZHUKOV, A.; KUZ-NETSOV, P. The Return of Coal-Fired Combined Heat and Power Plants: Feasibility and Environmental Assessment in the Case of Conversion to Another Fuel or Modernizing an Exhaust System. **Sustainability**. 2024. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/1974>>. Accedido el: 21 dic. 2024.

CUJI, C.; GALARZA, R. Gestión Óptima De La Energía En Un Proceso Paulatino Y Controlado Para Contribuir A La Descarbonización Del Sector Eléctrico. **Revista Técnica "energía"**.2022. Disponible en: <<https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/518>>. Accedido el: 18 dic. 2024.

ECSIM. **Análisis del impacto de la regulación y de las estructuras productiva e industrial del sector de energía eléctrica sobre el nivel final de las tarifas y precios del servicio de energía eléctrica**. Colombia, 2012. Disponible en: <<https://acolgen.org.co/wp-content/uploads/2022/04/ANALISIS-DEL-IMPACTO-DE-LA-REGULACION-Y-DE-LAS-ESTRUCTURAS-PRODUCTIVA-E-INDUSTRIAL-DEL-SECTOR-DE-ENERGIA.pdf>> Accedido el: 23 abril. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **European Green Deal: Commission proposes certification of carbon removals to help reach net zero emissions**. Brussels, 2022. Disponible en: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7156> Accedido el: 23 abril. 2024.

FERREIRO, R. **Sistema y procedimiento de captura y almacenamiento de CO2 de los gases de combustión**, Patente ES2618290, 2017.

GONZALEZ, M.A.; KIRSTEN, T.; PRCHLIK, L. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2018. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309206>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

HERNÁNDEZ, C. **Sistema para la producción circular de hidrógeno y oxígeno con retroalimentación de residuos de energías térmicas, recuperados en la etapa del motor stirling y en la etapa de electrólisis**, Patente WO2023035089, 2023.

HERNÁNDEZ, J.D.; SOLAN, J.E.; FERREIRA, F.E. Modelo multicriterio AHP-TOPSIS: una estrategia para evaluar alternativas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. **Investigación e Innovación en Ingenierías**, v. 9, n. 2, p. 175-191, 2021. Disponible en: <<https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.4482>>. Accedido el: 20 sep. 2024.

INODÚ. **Estudio de alternativas tecnológicas al retiro y/o reconversión de las unidades de carbón en Chile**. Energy & Sustainability. Chile, 2018.

IRENA. **Renewable Capacity Statistics 2020**. Abu Dhabi. DOI: ISBN 978-92-9260-239-0.

JIANG, Y. *et al.* Performance analysis of tower solar aided coal-fired power plant with thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering**. 2022. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431122000655>>. Accedido el: 21 dic.

2024.

KAMBLE, A.D. *et al.* Co-gasification of coal and biomass an emerging clean energy technology: Status and prospects of development in Indian context. **International Journal of Mining Science and Technology**. 2019. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268617306791>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

KHANMOHAMMADI, S.; KIZIL-KAN, O.; MUSHARAVATI, F. Comparative analyses of a novel solar tower assisted multi-generation system with re-compression CO₂ power cycle, thermoelectric generator, and hydrogen production unit. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2022. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922015932>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

LI, W.; HE, S.; LI, S. Experimental Study and Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production through a Two-Step Chemical Regenerative Coal Gasification. **Applied Sciences**. 2019. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3035>>. Accedido el: 21 dic. 2024.

LIN, W. *et al.* **Source end coupled solar energy gain type coal-fired power plant boiler**, Patente CN113091041, 2021

LINARES, P. La transición energética. **Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente**, n. 125, p. 20-31, 2018. Disponible en: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6950387>>. Accedido el: 18 dic. 2024.

LINHARES, E.J. *et al.* Capacidade para o trabalho e envelhecimento funcional: análise Sistêmica da Literatura utilizando o PROKNOW-C (Knowledge Development Process - Constructivist). **Ciências & Saúde Coletiva**. Vol. 24 n. 1, p. 53-66, 2019.

LIQIANG, D. *et al.* **Coal-saving type integrated system with high-temperature tower type solar heat complementing coal-fired power plant**, Patente CN106918030, 2017

LOCKWOOD, T. A Compararitive Review of Next-generation Carbon Capture Technologies for Coal-fired Power Plant. **Energy Procedia**. 2017. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217320520>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

MAC, M. A.; BROUWER, J.; SAMUEL-SEN, S. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration. **Progress in Energy and Combustion Science**. 2018. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128517300680>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

MAYFIELD, E. N. Phasing out coal power plants based on cumulative air pollution impact and equity objectives in net zero energy system transitions. **IOPScience**. 2022. Disponible en: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2634-4505/ac70f6/meta>>. Accedido el: 10 dic. 2024.

MARTÍNEZ, J. M. **Transformación de una central térmica en una planta de energías renovables, hidrógeno verde o biomasa y almacenamiento energético**. Madrid, 2024.

MEI, Y. *et al.* Do homeowners benefit when coal-fired power plants switch to natural gas? Evidence from Beijing, China. **Journal of Environmental Economics and Management**. 2021. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069621001169>>. Accedido el: 21 dic. 2024.

METRON. **Panorama del mercado energético en Brasil**. São Paulo, 2020. Disponible en: <<https://www.metron.energy/es/blog/panorama-del-mercado-energetico-de-la-energia-en-el-brasil/>> Accedido el: 15 may. 2024.

MIEDEMA, J. *et al.* Renew, reduce or become more efficient? The climate contribution of biomass co-combustion in a coal-fired power plant. **Applied Energy**. 2017. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191631618X>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

MILLS, S. Combining solar power with coal-fired power plants, or cofiring natural gas. **Clean Energy**. 2018. Disponible en: <<https://academic.oup.com/ce/article/2/1/1/4924632?login=false>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

MINGLIANG, L; PEIZHI, L. **Large-scale coal-fired power plant CO based on artificial intelligence2Optimal scheduling method for trapping system**, Patente CN113341716, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 Contribuição da EDP à Consulta Pública nº 34/2017**, Brasília, 2017.

MOTAI, T.; WADA, K. **Combustion method for high-concentration hydrogen-rich liquid**, Patente WO2019131765, 2019.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. **Objetivos de desarrollo sostenible**. Disponible en: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>> Accedido el 15 de abr. 2024.

RIDHA, H. M. *et al.* Innovative hybridization of the two-archive and PROMETHEE-II triple-objective and multi-criterion decision making for optimum configuration of the hybrid renewable energy system. **Applied Energy**. 2023. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261923004816>> Accedido el: 21 dic. 2024.

ROGERI, M. *et al.* Decarbonizing coal-fired power plants: Carbon capture and storage applied to a thermoelectric complex in Brazil. **Results in Engineering**. 2023. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023003766#bib23>> Accedido el: 11 de may. 2024.

ROMERO, J. *et al.* **Planta termoeléctrica alimentada con calor ambiental y enfriada mediante regasificación de gas natural licuado**, Patente ES2580879, 2017.

ROVIRA, A.; BARBERO, F. *et al.* **Sistema de integración sinérgica de fuentes de electricidad de origen renovable no gestionable y bombas de calor de CO2 en centrales termoeléctricas**, Patente ES2893976, 2022.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Math. Model.**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, jan. 1987.

SAFARI, A. *et al.* Natural gas: A transition fuel for sustainable energy system transformation? **Energy Science & Engineering**. 2019. Disponible en: <<https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.380>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

SEONG, J. S. *et al.* **High calorific biomass molded fuel for replacing coal for thermoelectric power plant by using vegetable oil by-product and high efficiency compression molding technique, and method for manufacturing same**, Patente KR1020200069865, 2020.

SERRANO, C.; OLMEDA, M.; PETRAKOPOULOU, F. Exergy and Economic Evaluation of a Hybrid Power Plant Coupling Coal with Solar Energy. **Applied Sciences**. 2019. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/850>>. Accedido el: 21 dic. 2024.

SUGIYONO, A. *et al.* Potential of biomass and coal co-firing power plants in Indonesia: a PESTEL analysis. **IOP Science**. 2022. Disponible en: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/963/1/012007>> Accedido el: 20 dic. 2024.

SZIMA, S. *et al.* Finding synergy between renewables and coal: Flexible power and hydrogen production from advanced IGCC plants with integrated CO₂ capture. **Energy Conversion and Management**. 2021. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421000431>> Accedido el: 20 dic. 2024.

TOTAL DECISION. **Manual de Usuario – Total Decision**. VILENIO. Disponible en: <https://vilenio.com/td_download.html> Accedido el: 14 jun. 2025.

UNIVERSITY OF CALGARY. **Enciclopedia de la energía: Central eléctrica de carbón**. Calgary, 2018. Disponible en: <https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Central_el%C3%A9ctrica_de_carb%C3%B3n> Accedido el: 13 may. 2024.

VANATTA, M. *et al.* The costs of replacing coal plant jobs with local instead of distant wind and solar jobs across the United States. **IScience**. 2022. Disponible en: <[https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(22\)01089-6](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(22)01089-6)>. Accedido el: 21 dic. 2024.

VISUAL PROMETHEE. **Visual PROMETHEE 1.4 Manual and Help File**. VPSolutions, 2013. Disponible en: <<http://www.promethee-gaia.net>> Accedido el: 14 jun. 2025.

VOYANT TOOLS. **Voyant Tools**. Disponible en: <<https://voyant-tools.org/>> Accedido el: 10 ene. 2025.

WANG, Y., *et al.* A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. **Energy Procedia**. 2017. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217313851>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

WEI, D. *et al.* Numerical simulation of hydrogen co-firing distribution on combustion characteristics and NO_x release in a 660 MW power plant boiler. **Energy**. 2024. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544224021108>>. Accedido el: 22 dic. 2024.

XIAODONG, Y. *et al.* **Calculation method and system for CO₂ emission reduction of co-combustion biomass of coal-fired power plant**, Patente CN116502393, 2023.

XU, Y. *et al.* Coal-Biomass Co-Firing Power Generation Technology: Current Status, Challenges and Policy Implications. **Sustainability**. 2020. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3692>>. Accedido el: 20 dic. 2024.

YANCHAO, O. *et al.* **System for realizing low-carbon emission of coal-fired power plant by taking green hydrogen as carrier**, Patente CN118300174, 2024.

YONG, Z. *et al.* **Secondary reheat type solar energy and coal-fired power plant complementary power generation system and operation method**, Patente CN109185085, 2019.

ZEDTWITZ, P.; STEINFELD, A. The solar thermal gasification of coal — energy conversion efficiency and CO₂ mitigation potential. **Energy**. 2003. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544202001391>>. Accedido el: 18 dic. 2024.

APENDICE A – Síntesis de la revisión del criterio ambiental

Tabla 22. Síntesis de la revisión sistemática del criterio ambiental

Criterio	Ambiental		Síntesis
	Subcriterios	Emisión de dióxido de carbono	
Alternativa 1: Conversión total a gas natural	Reducción de CO ₂ (23%), NO _x (40%), SO ₂ (44%) vs. carbón. (MAC <i>et al.</i> , 2018).	No se generan residuos sólidos significativos, ya que el gas natural es un combustible más limpio.	Presenta una reducción parcial de emisiones, pero mantiene un impacto ambiental asociado.
Alternativa 2: Conversión total a biomasa	Reducción del 48% vs. carbón. (MIEDEMA <i>et al.</i> , 2017).	Volumen de biomasa requerido: 904,862 toneladas/año. (CASAU <i>et al.</i> , 2021). Además, se generan cenizas y otros subproductos de la combustión de biomasa.	Disminuye significativamente las emisiones de CO ₂ , aunque genera residuos sólidos que afectan el entorno.
Alternativa 3: Hibridación de carbón y gas natural	Reducción del 50% en emisiones de CO ₂ . Vs. Carbón (SAFARI <i>et al.</i> , 2019).	Mantiene la generación de residuos del carbón, como cenizas y escorias, pero en menor cantidad debido a la reducción del uso de carbón.	Disminuye las emisiones en comparación con el carbón puro, pero persiste un impacto ambiental relevante.
Alternativa 4: Hibridación de carbón y biomasa	Reducción del 48%. (MIEDEMA <i>et al.</i> , 2017).	Incremento en transporte de biomasa y generación de cenizas mixtas (carbón + biomasa). (MIEDEMA <i>et al.</i> , 2017).	Reduce las emisiones moderadamente y persiste la generación de residuos mixtos
Alternativa 5: Cogeneración de electricidad e hidrógeno	Captura de CO ₂ : 25 €/ton. (SZIMA <i>et al.</i> , 2021).	No se generan residuos sólidos significativos, pero se producen subproductos químicos derivados del proceso de captura de CO ₂ .	Reducción de emisiones, parciales, pero con residuos químicos que afectan el entorno.
Alternativa 6: Hibridación de carbón y energía solar	Reducción de CO ₂ (~600 t/año), NO _x (>900 kg/año), SO ₂ (2450 kg/año). (MILLS, 2018).	Requiere una gestión adecuada de paneles solares y asociados al final de su vida útil	Reducción muy significativa de emisiones, pero el impacto ambiental permanece según el manejo de residuos asociados en su ciclo de vida
Alternativa 7: Sistemas con captura de carbono	Captura del 90% del CO ₂ . (LOCKWOOD, 2017).	Se generan residuos químicos derivados del proceso de captura, como las aminas usadas en la depuración, que requieren manejo especializado.	Disminuye las emisiones mediante captura, aunque genera impactos negativos por residuos y procesos asociados
Alternativa 8: Cierre y reaprovechamiento posterior	Reducción directa de emisiones.	No se especifica la generación de residuos, pero podría incluir la descontaminación y rehabilitación del sitio.	Alto beneficio ambiental al eliminar emisiones directas y residuos mediante cierre y recuperación

APENDICE B – Síntesis de la revisión del criterio estructural

Tabla 23. Síntesis de la revisión sistemática del criterio estructural

Criterio	Estructural	Síntesis
Subcriterio	Reutilización de la infraestructura	
Alternativa 1: Conversión total a gas natural	Reutilización significativa de componentes estructurales con necesidad de ciertas modificaciones y expansión de la infraestructura	Aprovecha la infraestructura existente y requiere infraestructura adicional
Alternativa 2: Conversión total a biomasa	Reutilización estructural relevante, aunque requiere adecuaciones.	Reutiliza la infraestructura y requiere adecuaciones.
Alternativa 3: Hibridación de carbón y gas natural	Aprovecha la infraestructura existente, con incorporación moderada de sistemas adicionales.	Aprovecha significativamente la infraestructura existente y requiere infraestructura adicional
Alternativa 4: Hibridación de carbón y biomasa	Reutilización considerable de la infraestructura actual con ajustes estructurales de complejidad intermedia.	Reutilización considerable de la infraestructura con ajustes intermedios
Alternativa 5: Cogeneración de electricidad e hidrógeno	Uso de la infraestructura existente, pero requiere ajustes notables en sistemas complementarios.	Reutiliza la infraestructura, pero requiere sistemas nuevos y complementarios
Alternativa 6: Hibridación de carbón y energía solar	Aprovechamiento de la infraestructura actual, con necesidad de modificaciones para integración solar y soporte adicional.	Aprovecha la infraestructura existente y requiere modificaciones para integración y ampliación
Alternativa 7: Sistemas con captura de carbono	Utilización de la infraestructura disponible, pero acompañada de ampliaciones relevantes específicas para captura.	Utiliza la infraestructura y requiere ampliaciones relevantes
Alternativa 8: Cierre y reaprovechamiento posterior	Reutilización mínima o nula durante el cierre; el aprovechamiento futuro depende del tipo de reconversión o uso posterior.	Reutilización incierta y sujeta al tipo de reaprovechamiento.

APENDICE C – Síntesis de la revisión del criterio técnico

Tabla 24. Síntesis de la revisión sistemática del criterio técnico

Criterios	Técnico		Síntesis
	Flexibilidad	Rendimiento	
Alternativa 1: Conversión total a gas natural	Alta, adaptable en ciclos combinados.	Eficiencia térmica de hasta 65%. (SAFARI <i>et al.</i> , 2019).	Alta flexibilidad y excelente rendimiento
Alternativa 2: Conversión total a biomasa	Baja en comparación con gas natural.	Eficiencia energética menor (6,47%). (AHMAD <i>et al.</i> , 2021).	Baja flexibilidad y rendimiento limitado
Alternativa 3: Hibridación de carbón y gas natural	Alta, adaptable a demanda energética.	Mayor eficiencia en ciclos combinados (48,35%). (AHMAD <i>et al.</i> , 2021).	Alta flexibilidad y buen rendimiento
Alternativa 4: Hibridación de carbón y biomasa	Media, en comparación con gas natural.	Incremento en energía renovable (35%). (MIEDEMA <i>et al.</i> , 2017).	Flexibilidad media y rendimiento moderado
Alternativa 5: Cogeneración de electricidad e hidrógeno	Alta, permite producción flexible.	Incremento del 11% en eficiencia económica. (SZIMA <i>et al.</i> , 2021).	Alta flexibilidad y buen rendimiento
Alternativa 6: Hibridación de carbón y energía solar	Media, depende de radiación solar.	Mejora de eficiencia >1%. (MILLS, 2018).	Flexibilidad media y mejora limitada en eficiencia
Alternativa 7: Sistemas con captura de carbono	Baja debido a limitaciones técnicas tecnológicas.	Reducción del 10% en eficiencia energética. (LOCKWOOD, 2017).	Baja flexibilidad y reducción en eficiencia
Alternativa 8: Cierre y reaprovechamiento posterior	La flexibilidad es incierta y altamente dependiente del tipo de reaprovechamiento	El rendimiento también es incierto.	Flexibilidad y rendimiento limitado según el tipo de reaprovechamiento.

APENDICE D – Síntesis de la revisión del criterio social, tecnológico y económico

Tabla 25. Síntesis de la revisión sistemática de criterios social, tecnológico y económico

Subcriterios	Tecnológico	Económico	Social	Síntesis
	Madurez tecnológica	Costo de implementación	Generación de empleos	
Alternativa 1: Conversión total a gas natural	Tecnología madura y ampliamente implementada	Costo 25% más bajo. (SAFARI <i>et al.</i> , 2019).	Generación de empleos en infraestructura de gasoductos y plantas.	Generación de empleos, tecnología madura y bajo costo
Alternativa 2: Conversión total a biomasa	Tecnología establecida con requerimientos específicos.	Costos no especificados, pero viables con recursos locales. (CASAU <i>et al.</i> , 2021).	Empleos locales durante transición. (CASAU <i>et al.</i> , 2021).	Generación de empleos locales, tecnología establecida y costos viables
Alternativa 3: Hibridación de carbón y gas natural	Tecnología funcional con amplia base de implementación en sistemas térmicos.	Costo nivelado más bajo. (SAFARI <i>et al.</i> , 2019).	Generación de empleos en adaptación de infraestructura.	Generación de empleos, tecnología funcional y bajo costo
Alternativa 4: Hibridación de carbón y biomasa	Tecnología funcional con variabilidad según el tipo de biomasa.	Costos no mencionados, pero compensados. (MIEDEMA <i>et al.</i> , 2017).	Empleos locales con manejo de biomasa. (CASAU <i>et al.</i> , 2021).	Generación de empleos locales, tecnología con funcionalidad variable y costos compensados
Alternativa 5: Cogeneración de electricidad e hidrógeno	Tecnología en desarrollo, con importantes desafíos y escalabilidad.	Costo competitivo: 25 €/ton CO ₂ . (SZIMA <i>et al.</i> , 2021).	Capacidad de generación de empleos adicionales en tecnologías de hidrógeno.	Generación de empleos, tecnología en desarrollo y costo competitivo
Alternativa 6: Hibridación de carbón y energía solar	Tecnología innovadora con alto potencial, pero enfrenta importantes barreras técnicas	Alto costo inicial, pero compensados a largo plazo. (SERRANO <i>et al.</i> , 2019).	Generación de empleos en nuevas instalaciones instalación y mantenimientos.	Generación de empleos, tecnología innovadora y alto costo inicial compensados a largo plazo
Alternativa 7: Sistemas con captura de carbono	Tecnología emergente que requiere adaptación y regulación para integración efectiva.	Incremento de costos hasta 80%, pero reducibles con incentivos. (LOCKWOOD, 2017).	Capacidad de generación de empleo en nuevas industrias tecnológicas	Generación de empleos, tecnología emergente y alto costo inicial
Alternativa 8: Cierre y reaprovechamiento posterior	Tecnología indefinida y dependiente del uso	Costos no especificados, dependen del tipo de reaprovechamiento.	Reduce significativamente los empleos.	Reducción de empleos, tecnología no especificada y costos no especificados.

APENDICE E – Escalas de puntuación de las encuestas

La Tabla 26 corresponde a la escala de puntuación (A) para valorizar las alternativas en el Criterio Ambiental.

Tabla 26. Escala de puntuación (A)

Intensidad de Importancia	Definición
1	Aumenta fuertemente
3	Aumenta débilmente
5	Mantiene
7	Reduce débilmente
9	Reduce fuertemente
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios

La Tabla 27 corresponde a la escala de puntuación (B) para valorizar las alternativas en el Criterio Técnico y en el Criterio Social.

Tabla 27. Escala de puntuación (B)

Intensidad de Importancia	Definición
1	Reduce fuertemente
3	Reduce débilmente
5	Mantiene
7	Aumenta débilmente
9	Aumenta fuertemente
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios

La Tabla 28 corresponde a la escala de puntuación (C) para valorizar las alternativas en el Criterio Estructural y en el Criterio Tecnológico.

Tabla 28. Escala de Puntuación (C)

Intensidad de Importancia	Definición
1	Muy baja
3	Baja
5	Media
7	Alta
9	Muy alta
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios

La Tabla 29 corresponde a la escala de puntuación (D) para valorizar las alternativas en el Criterio Económico.

Tabla 29. Escala de puntuación (D)

Intensidad de Importancia	Definición
1	Muy alta
3	Alta
5	Media
7	Baja
9	Muy baja
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios

APENDICE F – Encuestas realizada a expertos

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO UNO

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 30 01 2025

Área de actuación: Generación Transmisión
Distribución Comercialización

Sector: CENTRAL Hidroeléctrica ACARAY

Profesión/Nivel académico: Ingeniero Electricista – Master energías renovables

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	5	7
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	5
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	6	6
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5	6
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	7	5
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	9	5
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	7

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	5	7
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	5	3
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	6	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	8
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8	6
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	4	8
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	3	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5


Firma
ING. EDUARDO FERNANDEZ
DPTO. CENTRAL ACARAY

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	7

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	4
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	6
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	7
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	3
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	2
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	3
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	3
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4



Firma

ING. EDUARDO FERNANDEZ
DPTO. CENTRAL ACARAY

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO DOS

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 28 / 01 / 25

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización

Sector: Central Hidroeléctrica Acaray - Mantenimiento eléctrico

Profesión/Nivel académico: Ingeniero electromecánico

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	3	3
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	7	7
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	3	3
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	7
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9	9
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	9	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	9	9
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	9

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	7	7
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	3
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	7	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	3	3
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9	9
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	9	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	9	9
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3	3



Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	9
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	9
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnologica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	9
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	3
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO TRES

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 27 01 2025

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización

Sector: Central Acaray - Asistencia Técnica

Profesión/Nivel académico: Ing. Electricista - Esp. en Sistemas Industriales

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Subcriterios		
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	3	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	5	4
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	8	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3	3
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	9	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	9	7
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	8	7

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Subcriterios		
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9	6
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	7	7
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	9	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	8	7
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4	4
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	7	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	3


 Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3	Híbridaación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Híbridaación de carbón y biomasa	8
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6
Alternativa 6	Híbridaación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	8

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	3
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	3
Alternativa 3	Híbridaación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Híbridaación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	2
Alternativa 6	Híbridaación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	2
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	6

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Híbridaación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Híbridaación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Híbridaación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	9
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	3
Alternativa 3	Híbridaación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Híbridaación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Híbridaación carbón y fotovoltaica	6
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	1
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO CUATRO

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 28 01 2025

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización

Sector: Central hidroeléctrica Acaray - Mantenimiento Eléctrico

Profesión/Nivel académico: Ing. Electricista - Estudiante de Maestría

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emissiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	4	7
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	8	3
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	9	6
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	4
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3	4
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	7	6
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	9	5
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	9

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9	6
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	2	8
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	9	6
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	6
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	2	3
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	7	8
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	3	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	1


 Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	1

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	3
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	1

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	4
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	4
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	3
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	1
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO CINCO

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 27 01 25

Área de actuación: Generación Transmisión
 Distribución Comercialización

Sector: Central Hidroeléctrica Azarray - Mantenimiento ElectrónicoProfesión/Nivel académico: Ing. Electricista - Esp en Sistemas de Potencia

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Ambiental** según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	3	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	9	5
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	7	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	6
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8	5
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	8	6
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	8	6
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Técnico** según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	3
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	7	8
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	4	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7	7
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	5	7
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4	5
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3	5



Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	7
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	8
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	8
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	7

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	8
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

#Bink

Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO SEIS

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 30 01 25

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización

Sector: Central hidroeléctrica - departamento seguridad de Presas

Profesión/Nivel académico: Ingeniería Civil.

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental		
	Subcriterios	Emissiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	3	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	2	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	4	4
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	2	2
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3	2
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	2	2
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	2	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	2	2

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico		
	Subcriterios	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	3	2
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7	4
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3	2


Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	6.
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6.
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5.
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7.
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4.
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	6.
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5.
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3.

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	9
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7.
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	9
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3.

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7.
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7.
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8.
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7.
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	8.
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	9
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3.

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8.
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8.
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7.
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	3.
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3.
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9.



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO SIETE

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 01 02 2025

Área de actuación: Generación Transmisión
 Distribución Comercialización

Sector: Sección Mantenimiento de líneas de Distribución Alto Paraná.Profesión/Nivel académico: Ing. Electromecánica

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

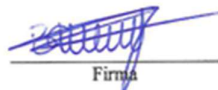
En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	8	8
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	8	9
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	9	8
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	9	9
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9	9
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	8	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	5	5
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	8	8
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	8	9
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	8	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	8	8
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8	8
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	9	7
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	8	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5



Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	8
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	8
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	8
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	3
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	6
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	6
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	8



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO OCHO

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 01 02 2025

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización

Sector: Central Hidroeléctrica Acaray / Unidad Administradora de Contrato Modernización

Profesión/Nivel académico: Ingeniero Electricista / Maestría

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Ambiental** según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	8	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	8	7
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	7	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	7
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	9	9
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	8	7
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	5	5
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Técnico** según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	4
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	8	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	5	6
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8	8
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	4	7
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	3	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5



Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	8
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	7
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	2

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	2
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	2

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	4
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	3
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO NUEVE

Encuesta: Página 1 de 2

(9)

Fecha: 31 01 2025

Área de actuación: Generación Transmisión
 Distribución Comercialización

Sector: Inerencia Comercial - División de Gestión de Pérdidas Eléctricas
 Profesión/Nivel académico: Ing Electricista - Enfoque Industrial

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	2	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	5	3
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	5	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	4
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	2	3
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	5	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	9	4
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	7	7

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9	6
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	7
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	9	9
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	8	9
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3	3
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	6	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	3	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	5	2


 Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	3
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	8
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	6
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	3
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	7
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	9



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO DIEZ

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 28 01 25

Área de actuación: Generación Transmisión
 Distribución Comercialización

Sector: Departamento de Distribución OesteProfesión/Nivel académico: Exp. Ingeniería Electrotécnica

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio		Ambiental	
Subcriterios		Emissiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	8	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5	6
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5	5

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios		Técnico	
Subcriterios		Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9	9
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5	8
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5	3

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnologica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	7
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	7
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	3
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	8

// 7
// 8

3
3
8

Costo

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO ONCE

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 29 01 25

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización Sector: Transmisión de la Energía Eléctrica.Profesión/Nivel académico: Maestría en Ingeniería Eléctrica.

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Ambiental** según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	2	5
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	5	5
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	3	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	3	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	3	5
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	6	3
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	5	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	8

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Técnico** según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	8	8
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	8
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	5	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	4	4
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7	6
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	3	8
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3	3



Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	5



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO DOCE

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 27 01 25

Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización Sector: Departamento de Transmisión MetropolitanaProfesión/Nivel académico: Exp. Ingeniería Eléctrica - Especialidad Energética

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Ambiental según la escala (A)

Criterio		Ambiental	
Subcriterios		Emissiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	3	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	9	4
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6	5
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	3	4
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	2	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	2	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	8	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4	5

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el Criterio Técnico según la escala (B)

Criterios		Técnico	
Subcriterios		Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	3	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	4	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5	7
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	6	6
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	4	4

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	6
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	8
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	3
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	2

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6

Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica 4
 Alternativa 7 Sistema con captura de carbono 4
 Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior 2

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO TRECE

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: 26 01 25

Área de actuación: Generación Transmisión
 Distribución Comercialización

Sector: Sección de Programación y Operación - Central Hidroeléctrica Acaray
 Profesión/Nivel académico: Msc. Ing. Eléctrica. - EUC.

Tema: Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Ambiental** según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emissiones de dióxido de carbono	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	2	8
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	9	7
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	7	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	5	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8	4
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	5	5
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	8	5
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	6

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Técnico** según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	3	8
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	7	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	5	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	8	7
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	5	6
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3	5

Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios	Social
Subcriterios	Generación de empleos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	6
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	8
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio	Estructural
Subcriterios	Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	5
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	2

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios	Tecnológico
Subcriterios	Madurez tecnológica
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	7
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios	Económico
Subcriterios	Costo de implementación
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2 Conversión total a biomasa	6
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	6
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	5
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	3



Firma

ENCUESTA REALIZADA AL EXPERTO CATORCE

Encuesta: Página 1 de 2

Fecha: Área de actuación: Generación Transmisión Distribución Comercialización Sector: Supervisión de obras de distribución Alto ParanáProfesión/Nivel académico: Ingeniero Ambiental**Tema:** Alternativas de reconversión de unidades generadoras a carbón, que promuevan la transición energética.

Contextualización: La creciente necesidad de reconvertir las centrales eléctricas de carbón hacia el uso de combustibles alternativos, sigue siendo un tema de debate en el sector energético. Esta tendencia está impulsada por múltiples factores, entre los que se destacan las regulaciones estatales sobre energías renovables, los incentivos económicos, las normativas ambientales cada vez más estrictas, el cambio en las preferencias de los consumidores, el aumento de la conciencia ambiental y un panorama económico que reduce la competitividad del carbón como fuente de energía.

En este contexto, la transición energética se presenta como un desafío global que exige ser abordado de manera equitativa y democrática. Este proceso implica no solo comprender las complejas interacciones entre diversos factores, sino también valorar la pluralidad de perspectivas y concepciones que moldean las decisiones en torno a la energía. Por ello, esta encuesta busca construir un diagnóstico integral sobre las perspectivas de la situación energética mundial y las alternativas de reconversión de las unidades generadoras a carbón, analizando la estructura de las fuentes energéticas con un abordaje multicriterio que permita evaluar los aspectos claves para avanzar hacia una transición energética justa y sostenible.

1- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Ambiental** según la escala (A)

Criterio	Ambiental	
	Emisiones de gases de efecto invernadero	Generación de residuos
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	8	7
Alternativa 2 Conversión total biomasa	5	5
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	5	7
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	7	5
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4	5
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	6	7
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	6	6
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	9	7

2- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Técnico** según la escala (B)

Criterios	Técnico	
	Flexibilidad	Rendimiento
Alternativa 1 Conversión total a gas natural	7	7
Alternativa 2 Conversión total biomasa	5	5
Alternativa 3 Hibridación de carbón y gas natural	6	5
Alternativa 4 Hibridación de carbón y biomasa	5	6
Alternativa 5 Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5	4
Alternativa 6 Hibridación carbón y fotovoltaica	6	9
Alternativa 7 Sistemas con captura de carbono	4	3
Alternativa 8 Cierre y reaprovechamiento posterior	2	2


 Firma

Encuesta: Página 2 de 2

3- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Social** según la escala (B)

Criterios		Social
Subcriterios		Generación de empleos
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	9
Alternativa 2	Conversión total biomasa	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	9
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	4
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	2

4- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Estructural** según la escala (C)

Criterio		Estructural
Subcriterios		Reutilización de la infraestructura
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	5
Alternativa 2	Conversión total a biomasa	8
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	8
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	9
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	5
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	3

5- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Tecnológico** según la escala (C)

Criterios		Tecnológico
Subcriterios		Madurez tecnológica
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	8
Alternativa 2	Conversión total biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	6
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	6
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	4
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	6
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	3
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	2

6- Puntúa las alternativas de reconversión en el **Criterio Económico** según la escala (D)

Criterios		Económico
Subcriterios		Costo de implementación
Alternativa 1	Conversión total a gas natural	7
Alternativa 2	Conversión total biomasa	7
Alternativa 3	Hibridación de carbón y gas natural	7
Alternativa 4	Hibridación de carbón y biomasa	7
Alternativa 5	Cogeneración de electricidad e hidrógeno	5
Alternativa 6	Hibridación carbón y fotovoltaica	6
Alternativa 7	Sistemas con captura de carbono	4
Alternativa 8	Cierre y reaprovechamiento posterior	7



Firma

ANEXO A – Información extraído de (WANG *et al.*, 2017)

Evaluaciones energéticas y económicas del proceso de separación basado en membranas.

Table 3. Energetic and economic evaluations of membrane-based separation process

Reference	Output of power plant (MW)	Operating temperature (°C)	Permeance (Nm ³ m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹)	CO ₂ capture degree (%)	Efficiency loss (%-pts)	Membrane area (Mm ²) 1 st /2 nd	CO ₂ avoidance cost (€/tonne CO ₂)	CO ₂ capture cost (€/tonne CO ₂)	Cost of electricity (€/MWh)
[43]	600	30	0.5	50	4.3	6.62/0.24			
				70	6.8	13.92/0.34			
			3	70	6.4	2.44		31	
[55]	450	30	1000gpu	90			72 ^a	42 ^a	106 ^a
							47 ^b	31 ^b	89 ^b
[56]	600	25	3	90	9.6	0.40/0.07	45		91
		30	4.3		11.1	0.29/0.04			
		50	5		14.2	0.24/0.03			

Evaluaciones energéticas y económicas del proceso de absorción química utilizando solvente MEA.

Table 2. Energetic and economic evaluations of chemical absorption process using MEA solvent

Reference	Output of power plant (MW)	CO ₂ capture degree (%)	Efficiency loss (%-pts)	Reboiler duty (GJ/tonne CO ₂)	CO ₂ capture cost (€/tonne CO ₂)	CO ₂ avoidance cost (€/tonne CO ₂)	Cost of electricity (€/MWh)
[23, 54]	600	90	-	3.29	-	37	56
[48]	450	90	10.5	-	53	79	62*
		70	8.1		57	85	47*
		50	5.7		60	89	32*
		30	3.3		69	101	21*
[13]	500	90	-	-	-	53	86
[52]	600	90	10.7	-	-	-	-
[43, 53]	600	50	5.8	-	-	-	-
		70	8.2				
		90	10.5				

ANEXO B – Información extraído de (MAC, BROUWER, SAMUEL-SEN, 2018)

Ciclo de vida informado del gas de efecto invernadero para diversas tecnologías de generación que funcionan con gas natural. NGCT: Turbina de Combustión de Gas Natural. NGCC: Ciclo Combinado de Gas Natural. GNLCT: Licuado Turbina de Combustión de Gas Natural. GNLCC: Ciclo Combinado de Gas Natural Licuado.

Table 2

Reported life cycle greenhouse gas for various generation technologies operating on natural gas. NG CT: Natural Gas Combustion Turbine. NG CC: Natural Gas Combined Cycle. LNG CT: Liquefied Natural Gas Combustion Turbine. LNG CC: Liquefied Natural Gas Combined Cycle.

Technology	Life Cycle GHG [gCO ₂ e/kWh]	References
NG CT	487 to 987	[41,42]
NG CC	306 to 681	[31,36,40–48]
LNG CT	607 to 651	[50,51]
LNG CC	428 to 523	[42,50,51]

Factores de emisión de contaminantes atmosféricos promedio y criterios nacionales (g/kWh) para EE. UU. generación en 2010. IGCC: Gasificación Integrada ciclo Combinado, IGCC: Gasificación Integrada Ciclo Combinado, CC: Ciclo Combinado, ICE: Motor de combustión interna.

Table 3

National average GHG and criteria air pollutant emission factors (g/kWh) for U.S. generation in 2010. Adapted from Reference [59]. IGCC: Integrated gasification combined cycle, IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle, CC: Combined Cycle, ICE: Internal combustion engine.

Technology	CO ₂ Emissions [gCO ₂ e/kWh]	NO _x [g/kWh]	SO _x [g/kWh]	PM _{2.5} [g/kWh]
Coal Steam Turbine	997	1.14	3.19	0.19
Coal IGCC	980	0.12	0.04	0.72
NG CC	441	0.12	0.004	0.0009
NG Gas Turbine	652	0.35	0.02	0.04
NG Steam Turbine	638	0.86	0.17	0.04
NG ICE	619	3.08	0.006	0.47

ANEXO C – Información extraído de (SAFARI *et al.*, 2019)TABLE 2 Energy and development interface^{38,40}

	Conventional energy reserve as percentage of world's total reserve (2016)			Share of energy import in total energy use (2015)	Energy supply security	Prevalent source of energy	Per capita GDP at current USD (2016)	Access to electricity (2014)	Phase in development process
	Coal	Oil	NG						
India	8.3%	<0.05%	<0.05%	34.31%	Medium	Coal & biomass	1680	79%	Developing
Norway	<0.05%	0.4%	0.9%	-583% No import	Very high	Hydro	82 330	100%	Developed
Iran	<0.05%	9.3%	18%	-33.4% No import	Very high	Natural gas	6530	99.44%	Developing
UK	<0.05%	0.1%	0.15	39.7%	Medium	Natural gas	42 390	100%	Developed

TABLE 1 Summary of gas-related technology and innovation

Type of relevant technology	Compensations	Challenges	CO ₂ Mitigation
1. Renewable energy systems & grid stability (flexible plant)	Contribution to a totally carbon-free and free source of energy (ie, solar/wind)	- Weather conditions and time of day - High capital costs - Significant O&M cost in comparison with other technologies - Increased voltage instability	Very high
2. Carbon capture and storage (CCS)	—	- High costs and a lack of political/financial commitment - Negatively impact load flexibility - Advanced CCS under development - Lack of enough R&D activities	High (Approximately 13%)
3. Novel cycle: CCGT	- Very high efficiency by using modern GT - Technology developed and available - Low carbon - Acceptable capital cost	Mentioned above	High
4. Novel cycle: CSP	—	- High capital cost - Low temperature - Low thermal efficiency - Technology should be upgraded to increased capacity, lower costs, and a reduction in dependence on fossil fuels	Very high
5. Novel cycle: S-CO ₂ gas turbine plants	- Minimum environmental and space impacts - Reducing transmission costs - Low carbon	Mentioned above	Medium

TABLE 3 Energy-environment sustainability potential with technological upgradation and more NG in the energy mix⁵⁴⁻⁵⁷

	Scope for fuel mix	Technological upgradation		Energy Mix		
		Technology	Additional mitigation potential	Dominant source of energy	Switched mainly to	Result in
India	High	CCHP, CCS	Very high	Coal	Solar and NG	Low carbon and carbon free
Norway	Low	Polygeneration	Low	Hydro	Bioenergy and wind	Carbon neutral and carbon free
Iran	Very high	CCHP, micro-CCHP, CCGT, CCS	Very high	NG	Solar and wind	Carbon free
UK	High	CCHP, micro-CCHP, CCS	High	NG	Solar and biogas	Carbon free and carbon neutral

TABLE 5 STEEP parameters

	India	Norway	Iran	UK
Social	<i>Enabler</i> Enhanced access to clean energy input for cooking and electricity	<i>Enabler</i> Population growth, but the demand for energy from mainland Norway has been declining slightly from 2010 and onwards. No energy (or fuel) poverty in Norway	<i>Enabler</i> Largest growth in NG usage comes from petrochemical plants, power sectors and other huge industries	<i>Enabler</i> Developed culture for optimized energy management and consumption Wide access to modern energy
	<i>Barrier</i> Land acquisition and displacement for pipeline expansion	<i>Barrier</i> Availability of large hydropower resources, growth in other renewable energy resources together with national GHG emission targets and policies limits the use of natural gas domestically	<i>Barrier</i> Population growth and increasing demand for safe and clean energy	<i>Barrier</i> Strong population growth and increasing demand for energy Growing pressure for reducing emission from its own population
Technological	<i>Enabler</i> Known proven technology Flexible/peaking power supply	<i>Enabler</i> NG with CCS—high potential for emission reduction, but compete with technological developments related to renewable energy	<i>Enabler</i> CNG as a gas supply method to distant areas to increase the availability and environmental benefits Mature technology of gas turbines and gas compressors	<i>Enabler</i> The UK economy is capable of developing expertise in a wide range of renewable technologies due to the availability of facilities and manpower
	<i>Barrier</i> Physical distance from the importing countries Geological uncertainties	<i>Barrier</i> Domestic use of natural gas in large quantities requires a breakthrough for CCS technologies, which has not yet materialized	<i>Barrier</i> Lack of modern technologies for growth in production of natural gas Shortage of knowledge in direct conversion of NG to liquid (and other products) such as GTL technology Lack of construction of new LNG terminals	<i>Barrier</i> Lack of appropriate skills compatibility The required infrastructures which needs a huge investment to come by
Economic	<i>Enabler</i> Improved energy efficiency and energy intensity	<i>Enabler</i> NG (and oil) exports important for economic growth and national income	<i>Enabler</i> More export of natural gas-based electric power will lead to high trade balance Increasing investment and allocation credit for rural and urban natural gas network Growth in natural gas revenue	<i>Enabler</i> The UK government is currently working on creation of interesting investment opportunities for the investors
	<i>Barrier</i> Supply bottleneck Investment for infrastructure development Price competitiveness	<i>Barrier</i> Investment in infrastructure development Price competitiveness Low electricity prices	<i>Barrier</i> No specific comments	<i>Barrier</i> Unemployment which is a direct consequence of economic meltdown

ANEXO D – Información extraído de (XU *et al.*, 2020)

Tabla 2. Características de la tecnología de generación de energía eléctrica con biomasa.

Artículo	Generación de energía a partir de biomasa pura	Generación de energía mediante co-combustión de carbón y biomasa
Situación de aplicación [34]	La tecnología está madura y se ha utilizado ampliamente. En 2019, la capacidad instalada de generación de energía a partir de biomasa en China alcanzó los 22,54 GW [35].	Se ha utilizado ampliamente en Europa.
	En China, casi todas las plantas de energía que utilizan biomasa son de combustión pura.	La central eléctrica de Jingmen y la central eléctrica de Shiliqian de China han llevado a cabo la transformación de la generación de energía mediante co-combustión de carbón y biomasa.
Combustible [36]	El costo del combustible es la parte más importante del costo de generación de energía con biomasa en China y representa aproximadamente el 49%.	Puede reducir el riesgo de suministro de combustible de biomasa. La adaptabilidad del combustible es mejor y las variedades de combustible de biomasa disponibles son más diversas.
Tipo de unidad [37]	1–50 MW, la mayoría son unidades de parámetros de alta presión de 10–30 MW	100–1000 MW, la mayoría son unidades subcríticas, supercríticas y ultrasupercríticas de 300–660 MW
Eficiencia [37]	La eficiencia del suministro de energía es generalmente inferior al 30%	La eficiencia del suministro de energía es generalmente superior al 40 %
Inversión en generación de energía [34]	Mayor inversión inicial	Menor inversión inicial (Solo se necesita un nuevo sistema de tratamiento de combustible de biomasa y se modifica parcialmente el quemador de la caldera).
Superficie útil del suelo	Se necesitan nuevas tierras de requisición	No es necesario añadir terreno adicional fuera de los muros de la planta.
Eficiencia económica	Relativamente débil, limitada al suministro de recursos de biomasa.	Más económico

Tabla 4. Algunos parámetros.

Nombre del costo	Valor	Nombre del costo	Valor
Tasa de mantenimiento	2%	Salarios del personal (yuanes/año)	80.000
Tarifa de seguro	0,25%	Número de personal	120
Tasa de descuento	8%	Coefficiente de bienestar y seguro de trabajo	60%
Tarifa de diseño e instalación	10%	Tasa de crecimiento anual de los salarios de los empleados	6%
Vidas depreciables (año)	20	Eficiencia de desnitrificación	99%
Recargos por educación (%)	1%	Eficiencia de descarburación	80%
Impuesto sobre la renta (%)	25%	Calor contenido en un kilovatio hora	3600 kJ
Impuesto al valor añadido (%)	17%	Tasa de interés de préstamos bancarios (%)	6%
Impuesto sobre la propiedad (%)	1%	Años de préstamo bancario (año)	20
Porcentaje de deducción del impuesto predial (%)	30%	Tasa de recuperación interna después de impuestos	8%
Impuesto sobre construcción y mantenimiento urbano (%)	5%	Horas de utilización anuales	5000

ANEXO E – Información extraído de (SZIMA *et al.*, 2021)

Table 1. Plant performance summary.

Plant	Benchmarks		Flexible GSC plants							
	IGCC	IGCC-PCC	GSC-Shell			GSC-HTW		GSC-GE		
Item			Power	H ₂ small GT	H ₂ 10% GT	Power	H ₂ small GT	Power	H ₂ small GT	H ₂ IP sweep

CO₂ Emissions Performance

**Specific Emissions (kg/MW h)	670,9	70,6	38,3	29,5	30,2	13,2	7,6	11,6	4,0	4,9
CO ₂ Capture (%)	0,0	91,5	94,8	94,8	95,6	98,1	98,5	98,4	99,2	99,1
CO ₂ Avoidance (%)	-	89,5	94,3	-	-	98,0	-	98,3	-	-
SPECCA (MJ/kg)	-	2,70	1,03	-	-	0,28	-	1,02	-	-

Eficiencias de las plantas

Eficiencia eléctrica bruta (%)	59,6	53,2	55,3	7,9	16,4	55,8	8,7	56,0	5,1
Eficiencia eléctrica neta (%)	51,6	41,9	47,2	-2,5	5,7	50,3	0,6	47,1	-5,8
Eficiencia del hidrógeno (%)	-	-	-	60,7	50,7	-	66,2	-	67,0
Eficiencia equivalente (%)	-	-	-	57,9	57,0	-	67,0	-	60,3

- Case 1: IGCC benchmark power plant without CO₂ capture (IGCC)
- Case 2: IGCC benchmark power plant with pre-combustion CO₂ capture using SelexolTM liquid-gas absorption (IGCC-PCC)
- Case 3: GSC-MAWGS flexible power and hydrogen plant using a Shell gasifier (GSC-Shell)
- Case 4: GSC-MAWGS flexible power and hydrogen plant using a High Temperature Winkler gasifier (GSC-HTW)
- Case 5: GSC-MAWGS flexible power and hydrogen plant using a GE gasifier (GSC-GE)

ANEXO F – Información extraído de (MIEDEMA *et al.*, 2017)

Tabla 1. Consumo de energía y emisiones de GEI de la minería de carbón y la producción de biomasa (datos tomados de Ditsele y Awuah-Offei [20] y Miedema *et al.* [21]).

Combustible		Bajo	Promedio	Alto	Unidad
Carbón	Consumo de energía	97	124	181	MJ t ⁻¹ carbón
	Emisiones de GEI	38	62	92	kg CO ₂ eq · t ⁻¹ carbón
Biomasa	Consumo de energía		656		MJ t ⁻¹ biomasa
	Emisiones de GEI		65		kg CO ₂ eq. t ⁻¹ biomasa