



EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS FOTOVOLTAICAS PARA LA
DESCARBONIZACIÓN DE LA GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA EN COLOMBIA

CINDY LORENA CÁRDENAS MEJÍA

DADY MANCILLA GUTIÉRREZ

TANIA CECILIA LÓPEZ AYALA

SANTIAGO ORTEGA

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD

UNIVERSIDAD EAFIT

ENERO 9 DE 2026



Este trabajo de grado se lo dedico a Dios, por ser mi guía constante y darme fortaleza en los momentos de incertidumbre. A mi familia, por creer siempre en mí. A mi esposo, por su amor y su paciencia. A mis profesores y compañeros, por compartir su conocimiento y acompañamiento en este retador camino. Lorena.

A mi amada familia, quienes me apoyan permanentemente y me proveen la energía vital cotidiana, les agradezco su comprensión y presencia para llevar a buen término esta meta. Tania.

A Dios, por sostenerme siempre y ser mi fuerza en cada etapa de este camino. A mis padres, por su amor inagotable, su apoyo constante y los valores que me han formado. A mi talentosa hermana, cuyo ejemplo inspira mi vida y mis sueños. A mi amor por su paciencia, respeto e incondicionalidad en los tiempos difíciles. Dady.



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	7
MENSAJES DESTACADOS	8
INFOGRÁFICO	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
3. METODOLOGÍA	14
4. MARCO TEÓRICO O REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
5 HALLAZGOS Y RESULTADOS.....	33
6 DISCUSIÓN	52
7 PLAN DE ACCIÓN.....	55
8 CONCLUSIONES	57
9 CONTRIBUCIÓN A LOS ODS	60
10 IMPACTO DEL TRABAJO AL DESARROLLO SOSTENIBLE.....	61
11 CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	64
12 BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES Y DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO	66
13 AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS.....	68
14 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Infográfico.....	10
Gráfico 2. Gráficos resultados de encuestas. Ver Apéndice D.....	34
Gráfico 3. Modelo 5.....	49
Gráfico 4. Modelos comparados 15, 16 y 17.....	50
Gráfico 5. Modelos 18, 19 y 20 con porcentaje de generación parcial con carbón de 10%	51

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de alternativas.....	31
Tabla 2. Tabla de equivalencia cualitativa/cuantitativa de evaluación de alternativas ..	38
Tabla 3. Tabla de calificación cualitativa y cuantitativa y proporción	39
Tabla 4. Tabla de resultados de evaluación.....	40
Tabla 5. Modelo Base	42
Tabla 6. Tabla resumen general de los escenarios.....	46
Tabla 7. Tabla de plan de acción	55
Tabla 8. Tabla Cálculo SROI.....	61

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación Lausitz Alemania	21
Ilustración 2. Ubicación y vista satelital de la planta Fiddler's Ferry.....	24
Ilustración 3. Estructura de encuestas	33
Ilustración 4. Entrevistas	35
Ilustración 5. Matriz DOFA Generada a partir de las entrevistas	36
Ilustración 6. Alternativas evaluadas	38
Ilustración 7. Resumen escenarios analizados en el modelo Financiero	41
Ilustración 8. Conceptos aplicados al modelo financiero.....	44
Ilustración 9. Resultados Modelo Base	48

RESUMEN

El sector energético es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, por lo que su transformación resulta clave frente al cambio climático. En Colombia, aunque la matriz eléctrica se basa principalmente en fuentes hidroeléctricas, las plantas térmicas a carbón siguen siendo esenciales para respaldar el sistema en períodos de sequía, especialmente durante fenómenos como El Niño. Esta dependencia del carbón representa un desafío para cumplir con los compromisos climáticos del país.

Esta investigación evalúa la viabilidad de reconvertir plantas termoeléctricas a carbón hacia la generación solar fotovoltaica. El análisis incorpora el potencial solar en regiones estratégicas, las condiciones actuales del sistema eléctrico nacional y experiencias internacionales comparadas. Asimismo, se valoró de forma integrada la viabilidad económica, social y ambiental de esta transición mediante un análisis PESTEL y la recolección de percepciones a través de entrevistas y encuestas a actores del sector (incluyendo generadores como Gecelca), identificando riesgos y oportunidades.

Los resultados muestran que, aunque existe una percepción favorable hacia la transición energética y el uso de fuentes fotovoltaicas, la intermitencia emerge como una debilidad que condiciona su aceptación y confiabilidad operativa. Se concluye que las transiciones exitosas requieren planificación estratégica, participación comunitaria y reconversión laboral para garantizar una transición justa. Asimismo, las condiciones socioeconómicas, culturales y ambientales son determinantes para el éxito de los proyectos.

El modelo financiero desarrollado evidencia que reconvertir plantas de carbón en sistemas fotovoltaicos a gran escala (>50 MW) no resulta viable en la actualidad, bajo las



condiciones de mercado, aunque mejora significativamente bajo escenarios de incremento en los certificados de reducción de emisiones y el impuesto al carbono. Estos hallazgos resaltan la necesidad de políticas públicas robustas y soluciones tecnológicas complementarias para viabilizar la descarbonización del sector eléctrico colombiano.

Palabras clave: Transición energética, Energía solar fotovoltaica, Termoeléctricas a carbón, Descarbonización, Sostenibilidad energética, Cambio climático, ODS 13. Acción por el clima, ODS 7, Energía asequible y no contaminante



ABSTRACT

The energy sector is one of the main emitters of greenhouse gases, making its transformation crucial in addressing climate change. In Colombia, although the electricity matrix is primarily based on hydropower, coal-fired plants remain essential to support the system during droughts, especially under El Niño events. This reliance on coal poses a challenge to meeting the country's climate commitments.

This research assesses the feasibility of converting coal-fired power plants into solar photovoltaic generation. The analysis incorporates solar potential in strategic regions, the current conditions of the national electricity system, and international comparative experiences.

The results show that, although there is a favorable perception of the energy transition and the use of photovoltaic sources, intermittency emerges as a weakness that affects acceptance and operational reliability. It is concluded that successful transitions require strategic planning, community participation, and labor reconversion to ensure a just transition. Likewise, socioeconomic, cultural, and environmental conditions are decisive for the success of projects.

The financial model developed shows that turning coal plants into large-scale photovoltaic systems (>50 MW) is not currently viable under market conditions, although it improves significantly under scenarios of increased carbon tax and emission reduction certificates. These findings highlight the need for strong public policies and complementary technological solutions to enable the decarbonization of Colombia's electricity sector.

Keywords: Energy Transition, Solar Photovoltaic Energy, Coal-Fired Power Plants, Decarbonization, Energy Sustainability, Climate Change, Sdg 13: Climate Action, Sdg 7: Affordable and Clean Energy

MENSAJES DESTACADOS

- ✓ La transformación tecnológica evaluada es la reconversión de una planta térmica a carbón —caso de referencia Central Termoguajira (GECELCA S.A E.S. P)— hacia solar fotovoltaica de 50 MW en el mismo predio (sin incluir baterías).
- ✓ Un proyecto de transición de generación termoeléctrica con carbón a solar depende en su mayoría de la relación Valor Impuesto al carbono/Emisiones CO2 t:
 - Bajo/estático → no cierra financieramente.
 - Alto/creciente y creíble → mejora el punto de equilibrio y podría viabilizar la reconversión.
- ✓ Reducir el % de generación con carbón, aumentando la capacidad en MW empieza a dar un resultado menos desfavorable, en conjunto con el Valor Impuesto al carbono/Emisiones CO2 t.
- ✓ El proceso de transición energética requiere soluciones tecnológicas que mitiguen la intermitencia, principalmente a través de almacenamiento energético y esquemas híbridos.
- ✓ Los incentivos regulatorios, como la Ley 1715 de 2014, facilitan la implementación de proyectos solares, pese a las barreras que persisten para una termoeléctrica que reconvierte en su predio. Estas barreras, financieramente hablando, hacen referencia a la pérdida de ingresos por mecanismos de remuneración, como el cargo por confiabilidad, el CAPEX de adecuación/desmantelamiento, el riesgo de activos varados, además de los trámites de conexión, licenciamiento y acuerdos territoriales.

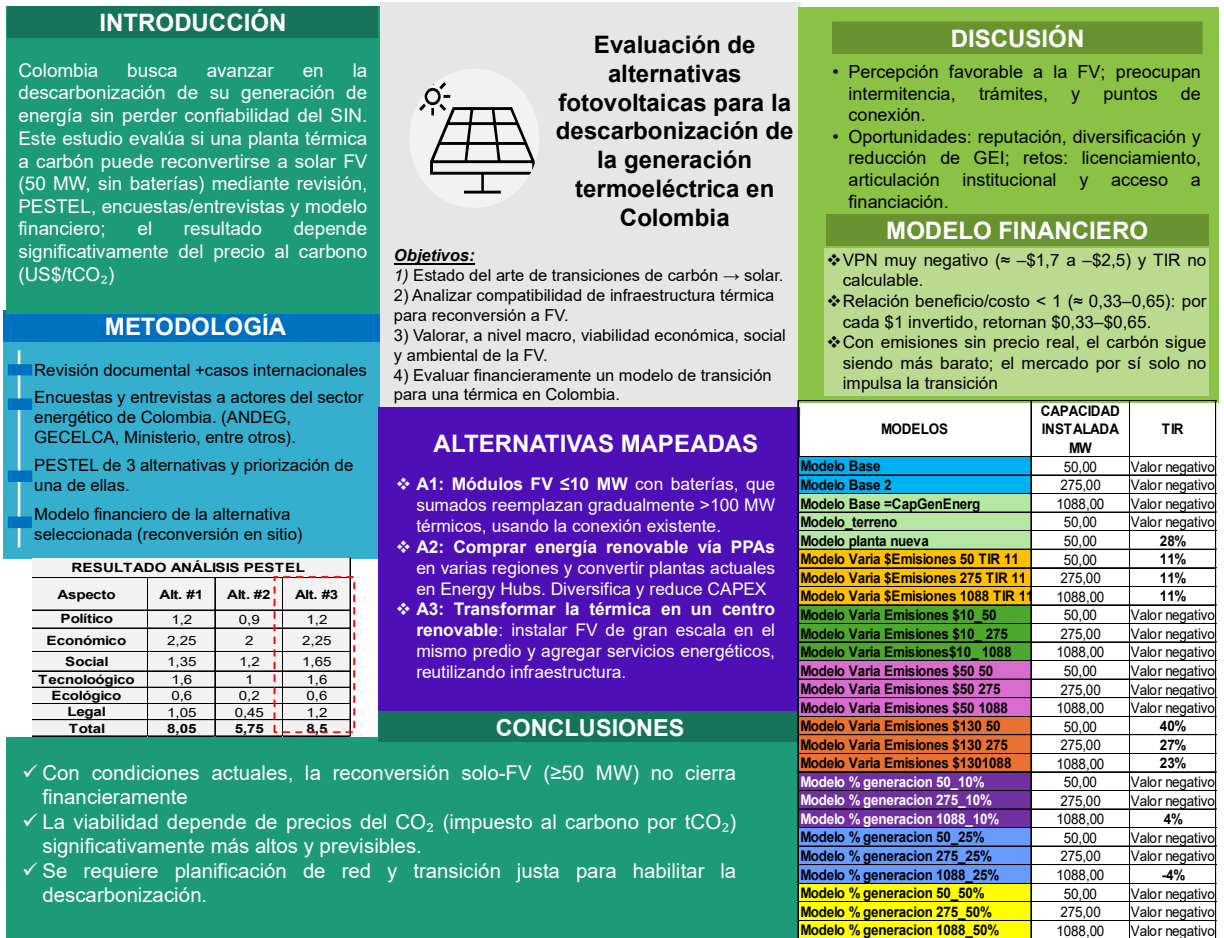


- ✓ #ODS7energiaasequibleynocontaminante
- ✓ #Transicionenergetica
- ✓ #DescarbonizaciónJusta

INFOGRÁFICO

Gráfico 1 Infográfico

Fuente: Elaboración Propia



1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las mayores amenazas globales y el sector energético concentra una fracción sustantiva de las emisiones de GEI; el IPCC lo estima cerca del 40% del CO₂ global (IPCC, 2021). En Colombia, una matriz mayoritariamente hidroeléctrica (~68%) aporta bajas emisiones, pero expone al sistema a sequías (El Niño); frente a esos déficits hídricos, el respaldo térmico a carbón ha garantizado confiabilidad a costa de impactos ambientales y de salud, tensionando los compromisos del Acuerdo de París (Ministerio de Minas y Energía, 2014). En este contexto, la energía solar fotovoltaica surge como alternativa para descarbonizar, aprovechando el alto recurso en regiones como La Guajira, Cesar y Córdoba, y el marco de la Ley 1715, que incentiva FNCER (Ministerio de Minas y Energía, 2014). No obstante, migrar desde carbón plantea retos técnicos, económicos y sociales (infraestructura, almacenamiento, red, costos y aceptación). Este estudio evalúa la viabilidad de reconvertir plantas a carbón hacia solar fotovoltaica en Colombia, identificando estrategias, riesgos y oportunidades para una transición gradual, ordenada y económicamente viable.

1.1. Planteamiento del problema

La crisis climática mundial encaminó a Colombia hacia la adopción de metas de mitigación en su NDC, pero la operación real del SIN aún depende del respaldo térmico a carbón cuando la hidrología cae. Estas plantas sostienen la estabilidad del sistema, pero generan impactos ambientales y crecientes desafíos técnicos, económicos y reputacionales. Aunque la energía solar fotovoltaica ofrece un camino para la descarbonización, la reconversión de plantas térmicas con combustibles fósiles exige transformaciones profundas en infraestructura, cadenas de suministro, modelos de negocio y finanzas. Existe, además, una



brecha de conocimiento: faltan lineamientos aplicables al caso colombiano que integren condiciones técnicas, viabilidad económica (CAPEX/OPEX, almacenamiento) y políticas públicas (incentivos, regulación de conexión, obligaciones de firmeza). Tampoco se han sistematizado y/o estandarizado de forma suficiente experiencias internacionales comparables. Por esto se requiere evaluar integralmente alternativas de transición desde carbón hacia solar, identificando riesgos, oportunidades y secuencias de implementación que permitan compatibilizar la confiabilidad del sistema y la reducción de emisiones en el corto y mediano plazo.



2. OBJETIVOS

Objetivo General:

Identificar alternativas sostenibles para las generadoras térmicas a carbón, que les permita una transición energética viable en Colombia.

Objetivos específicos:

- Documentar el estado del arte de las experiencias a nivel nacional e internacional de empresas generadoras de energía con carbón que hayan hecho la transición a solar.
- Analizar las alternativas de readaptación y/o compatibilidad de la infraestructura existente, de las plantas de generación con carbón, a generación solar.
- Evaluar a nivel macro la viabilidad económica, social y ambiental de la energía solar, sus riesgos y oportunidades.
- Evaluar financieramente una alternativa o modelo de transición sostenible y equilibrado para una central termoeléctrica con carbón en Colombia.

3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en esta investigación se desarrolló en una secuencia de cinco etapas principales, que integraron información cuantitativa y cualitativa, con el fin de evaluar la información existente y aplicable para la transición de generación termoeléctrica a carbón hacia energía solar fotovoltaica, estas etapas se describen a continuación:

- 1.** Revisión marco teórico, estado del arte y casos internacionales: como parte del proceso metodológico, se incluyó una revisión documental que permitió contextualizar el estado actual de la generación solar en Colombia, identificar el potencial fotovoltaico y analizar experiencias internacionales para identificar estrategias y aprendizajes aplicables al contexto colombiano.
- 2.** Encuestas: Se diseñó una encuesta orientada a recopilar información sobre la experiencia y percepciones del sector energético frente a los proyectos solares, los retos y riesgos económicos, sociales y ambientales asociados. La encuesta se distribuyó mediante un formulario en línea dirigido a actores con conocimiento o experiencia en el sector.
- 3.** Entrevistas: Se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas con expertos del sector energético para profundizar en tres dimensiones clave: social, ambiental y económico.
- 4.** Análisis PESTEL de alternativas de transición: a partir de los casos y experiencias internacionales se formularon tres alternativas de transición. Para cada una se construyó un análisis PESTEL (Político, económico, social, tecnológico, ambiental y legal), asignando las ponderaciones cuantitativas y cualitativas según su



relevancia en el contexto colombiano, a juicio de expertos. Las tres alternativas fueron calificadas de manera independiente por las investigadoras, y posteriormente se promediaron los resultados para seleccionar la alternativa con mayor viabilidad.

5. Desarrollo del modelo financiero: Con la alternativa seleccionada se construyó un modelo financiero para evaluar la transición hacia energía solar fotovoltaica desde la térmica con carbón, el modelo estima costos de inversión (CAPEX) para proyectos solares a gran escala, costos de operación y mantenimiento (OPEX), ingresos por generación, beneficios por reducción de emisiones, costos asociados al desmonte de la planta térmica y su valor de salvamento, depreciación e impuestos.

4. MARCO TEÓRICO O REVISIÓN DE LA LITERATURA

4.1 Transición Energética

La transición energética es el proceso de transformación de la matriz energética que prioriza el uso de tecnologías nuevas y eficientes, promueve formas innovadoras de generación de energía y fomenta hábitos sostenibles de consumo (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022). Este proceso conlleva beneficios como el crecimiento económico, una mayor eficiencia energética, la mejora en prácticas industriales y la reducción de las afectaciones al medio ambiente, especialmente en las emisiones de gases efecto invernadero GEI. Estos avances contribuyen a disminuir el riesgo asociado al cambio climático e impulsar un crecimiento económico sostenible, así como una mayor eficiencia económica. (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022.).

El gobierno colombiano ha realizado esfuerzos relevantes para diversificar la matriz energética e incorporar fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). Estos esfuerzos se reflejan en leyes, estrategias y proyectos de integración que buscan fortalecer la matriz de generación. Sin embargo, persisten brechas que limitan el incremento de la seguridad y la confiabilidad energética. Algunos de estos desafíos incluyen la ineficiencia en el uso de los recursos energéticos, las brechas en el fortalecimiento y la planeación de los mercados energéticos, la disminución de las reservas de gas y la insuficiencia de infraestructura de hidrocarburos que garanticen un abastecimiento seguro, eficiente y confiable. Así mismo, se identifican problemáticas como la falta de articulación intersectorial, los bajos niveles de innovación y las altas emisiones de gases efecto invernadero (GEI).



En el marco de la transición energética colombiana, el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, junto con otras fuentes renovables, es esencial para incrementar la potencia instalada y diversificar la matriz energética nacional. Aunque esta fuente representa cerca del 30 % de la capacidad instalada, solo aporta aproximadamente el 14 % de la generación anual, lo cual refleja que las energías renovables tienen factores de disponibilidad variables y que una mayor capacidad instalada no siempre se traduce en una generación proporcional. La energía solar fotovoltaica también constituye un componente clave de la generación distribuida, favoreciendo la democratización de la producción energética y contribuyendo a la mitigación de las altas tarifas eléctricas. Así mismo, se resalta su factibilidad de implementar configuraciones solares acompañadas de almacenamiento energético en comunidades energéticas, promoviendo sistemas de pequeña escala adaptables a diferentes contextos, más allá de las instalaciones en techos (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

El desarrollo ampliado del marco teórico se presenta en el *Apéndice B*, incluido en los anexos de este trabajo.

4.2 Marco Legal y Regulatorio

El marco regulatorio colombiano para la transición energética establece instrumentos tributarios, ambientales, técnicos y de política pública que facilitan la incorporación de energías renovables y la reducción progresiva de emisiones. La Ley 1715 de 2014 constituye la base normativa para promover las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), ofreciendo incentivos como deducción del 50% de la inversión en renta, exclusión de IVA, exención arancelaria y depreciación acelerada. Estos beneficios han permitido la expansión de proyectos solares y eólicos en el país.



El impuesto al carbono, creado por la Ley 1819 de 2016 y ajustado por la Ley 2277 de 2022, busca desincentivar el consumo de combustibles fósiles gravando su contenido de carbono. Aplica a gasolina, ACPM, jet fuel y otros combustibles fósiles, y ofrece no causación a quienes demuestran carbono neutralidad mediante programas de certificación. Para el carbón se estableció una transición gradual: 0% en 2023–2024, 25% en 2025, 50% en 2026, 75% en 2027 y tarifa plena desde 2028. Este impuesto es deducible del impuesto de renta.

La Ley 1931 de 2018, conocida como Ley de Gestión del Cambio Climático, organiza el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA) y establece los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático (PIGCC) en niveles sectorial y territorial. Introduce mecanismos económicos como los Cupos Transables de Emisión (PNCTE) y crea el Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático (SNICC). Esta ley incorpora principios de gradualidad, prevención, costo-beneficio y corresponsabilidad para la acción climática.

La Ley 2169 de 2021 establece metas obligatorias de mitigación, adaptación y carbono neutralidad, articulando entidades nacionales y territoriales para avanzar hacia una economía baja en emisiones. Complementariamente, la Ley 2294 de 2023 (Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026) impulsa la diversificación energética con una meta de 2.000 MW adicionales de FNCER, crea el Fondo para la Transición Energética y formaliza las comunidades energéticas, reguladas por los Decretos 2236 de 2023 y 273 de 2024.

El marco tributario también incluye el descuento del 25% para inversiones en control y mejoramiento ambiental según el Art. 255 del Estatuto Tributario, aplicable a proyectos de reconversión industrial y sustitución de combustibles contaminantes.



La Resolución 40509 de 2024 crea el Registro de Comunidades Energéticas y define los requisitos operativos, ambientales, sociales y técnicos para su categorización y funcionamiento. A nivel estratégico, el CONPES 4075 de 2022 establece la política nacional de transición energética con 97 acciones y una inversión pública estimada de más de 300 mil millones de pesos, además de movilizar inversiones público-privadas por 283 billones para 2030.

La Estrategia Climática de Largo Plazo E2050 define el camino hacia la neutralidad de carbono mediante apuestas sectoriales, financiamiento sostenible y participación social.

Finalmente, los aspectos técnicos están regulados por el RETIE, la CREG 030 de 2018 para conexión de sistemas solares, la CREG 101 de 2023 para modelamiento energético y las Normas Técnicas Colombianas (NTC) que establecen requisitos de seguridad, desempeño y calidad para módulos, baterías, inversores y otros componentes. Los proyectos deben cumplir adicionalmente con los lineamientos del Ministerio de Ambiente y, según escala, presentar una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

4.3 Casos de Estudio Internacionales de Migración de Generación con Carbón a Energía Solar Fotovoltaica

4.3.1 Caso 1 de estudio: Lusatia Alemania

Ubicación y características de la zona

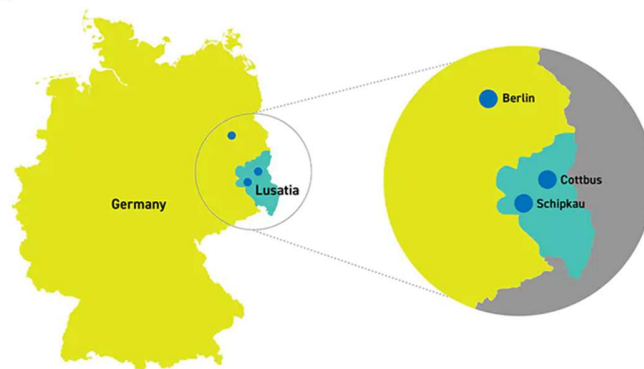
La región de Lusatia, situada entre Alemania oriental, Polonia y la República Checa, ha experimentado profundas transformaciones históricas que explican sus marcadas diferencias con el oeste alemán en términos de ingresos, empleo, inversión y estructura industrial. Estas brechas se relacionan con las secuelas de la guerra, la división política del siglo XX y factores



climáticos y socioeconómicos que han configurado mentalidades diferenciadas y ritmos desiguales de desarrollo regional (Wagner, 2024; Quiroga Riviere, 2009; Pardavila, 2022). Con aproximadamente 11.750 km², Lusatia ha dependido históricamente del sector energético y minero, constituyéndose como uno de los principales núcleos carboníferos de este país. En la actualidad, la región impulsa actividades vinculadas con la transición energética, como la fabricación de componentes eólicos, baterías para movilidad eléctrica y tecnologías de almacenamiento, apoyadas en un ecosistema científico robusto que incluye universidades e institutos como Fraunhofer, con más de 250 proyectos asociados a la Industria 4.0 (Lausitz Invest, 2018).

Ilustración 1. Ubicación Lusatia Alemania

Lusatia, a region in transition



Fuente: https://www.strategy-business.com/media/image/44361855_ex1.jpg

Características del proyecto

El proceso de transición en Alemania está enmarcado en el paquete europeo “Fit for 55”, cuyo objetivo es reducir en 55% las emisiones al 2030 y alcanzar la neutralidad climática para 2050, garantizando al mismo tiempo la competitividad industrial y una transición justa (Jensen, 2024). A pesar de que alrededor del 30% de su electricidad todavía proviene del carbón, la capacidad instalada de energías renovables ya representa cerca de la mitad del total, impulsada por la reducción de costos tecnológicos y el incremento del precio por emisiones (Gabbatiss, 2025). En este contexto, Lusatia se ha convertido en un laboratorio de reconversión económica. Aunque múltiples iniciativas han fracasado por falta de inversión, riesgos geológicos o restricciones ambientales, incluyendo suelos poco fértiles y acidez en lagos construidos sobre antiguas minas; también han surgido proyectos innovadores, como la transformación de una antigua fábrica de explosivos en una planta de reciclaje de baterías para movilidad eléctrica (Colitt, 2022).

Estrategias técnicas y económicas en la transición energética

Uno de los mayores desafíos en Lusatia ha sido la dificultad para reutilizar los terrenos mineros en actividades alternativas, esto debido a condiciones técnicas adversas y a la limitada disponibilidad de capital y mano de obra especializada. No obstante, políticas públicas orientadas a infraestructura, emprendimiento y atracción de inversión, han permitido dinamizar el territorio. Empresas como BASF y Rock Tech Lithium han decidido instalar plantas de materiales avanzados y conversión de litio, motivadas por incentivos económicos y la disponibilidad de energía de bajas emisiones.

El proyecto más emblemático es la Gigawattfactory, liderada por LEAG, que contempla inversiones superiores a diez mil millones de euros para desarrollar grandes complejos solares y eólicos en terrenos mineros rehabilitados, integrados con sistemas avanzados de almacenamiento energético. Esta estrategia busca convertir a Lusatia en un polo europeo de producción renovable a gran escala. Asimismo, se han implementado mecanismos de participación comunitaria, como bonificaciones locales por la instalación de aerogeneradores y esquemas de cooperación con autoridades municipales. Estas medidas buscan asegurar legitimidad social, reconociendo que la transición energética en regiones carboníferas requiere coordinación entre empresas, gobiernos locales y ciudadanía para evitar la pérdida de empleo, el rezago económico y el rechazo social.

4.3.2 Caso 2 de estudio: Fiddler's Ferry Cuerdley, Warrington, Cheshire, Inglaterra, Reino Unido

Ubicación y características de la zona

La central eléctrica de Fiddler's Ferry estuvo ubicada en Cuerdley, Warrington, Cheshire, Inglaterra, Reino Unido. Su nombre proviene del antiguo cruce del río Mersey, mencionado por primera vez en documentos históricos en el año 1160. La zona experimentó una transformación significativa entre finales del siglo XIX y mediados del siglo XX, caracterizado por un auge industrial en Widnes y Runcorn, ubicadas en el sur del Río Mersey. (Esri UK, 2023).

Durante el periodo de 1960 y 1964, el gobierno británico aprobó la construcción de trece centrales eléctricas para abastecer la red de interconexión eléctrica de 275 y 400 kV, conocidas como "supercentrales", entre ellas se incluyó Fiddler's Ferry, estas centrales, con una capacidad estimada de 2.000 MW respondían a la creciente demanda energética del país y se ubicaban estratégicamente cerca de las zonas urbanas para optimizar los costos de transmisión y garantizar un suministro confiable. (Fiddler's Ferry Power Station, 2019).

El terreno originalmente era de uso agrícola comunal. La parte sur del sitio, hoy ocupada por lagunas, la zona norte había sido donada para labores agrícolas y algunas porciones continúan en arriendo como tierras de cultivo.

Ilustración 2. Ubicación y vista satelital de la planta Fiddler's Ferry



Fuente: Nota. Adaptado de Esri UK. (s.f.). Fiddler's Ferry StoryMap. ArcGIS StoryMaps. <https://storymaps.arcgis.com/stories/b2b1d772cd9b46099f2f0d767e972e2d>

Características del proyecto

Tras la privatización de la industria energética británica en 1990, la planta pasó por varios propietarios, fue operada por Powergen, luego vendida a Edison Mision Energy en 1999, transferida a AEP Energy Services en 2001 y finalmente adquirida por SSE en 2004. Este cambio implicó un nuevo enfoque en rentabilidad, lo que llevó a Fiddler's Ferry a importar carbón de países de Latinoamérica, Rusia; lo que exigió adaptaciones tecnológicas en sus sistemas de combustión para el manejo de los diferentes tipos de carbón. (Esri UK, 2023).

Fiddler's Ferry dejó de operar oficialmente como parte del plan de descarbonización del Reino Unido, que busca eliminar por completo la generación eléctrica a partir del carbón para



2025. Tras casi cinco décadas de operación, la planta fue clausurada, marcando un hito en transición energética del país. (Warrington Borough Council, 2024).

Actualmente, el sitio de la antigua central está destinado a una importante transformación. De acuerdo con el Fiddler's Ferry Development Framework, se proyecta la construcción de 860 viviendas y 101 hectáreas de uso industrial y comercial para los próximos años. (Warrington Borough Council, 2024). Además, SSE Renewables anunció en 2024 la construcción de un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS), con capacidad de 150 MW en las cercanías, como parte de su portafolio de energías limpias (SSE Renewables, 2024).

Estrategias técnicas y económicas en la transición energética

Tras el cierre definitivo de la central, el Reino Unido mantuvo estabilidad del suministro eléctrico mediante la transición planificada y coordinada entre el gobierno, la empresa operadora y el National Grid Electricity System Operator (ESO). La generación que aportaba la planta Fiddler's Ferry fue cubierta por una combinación de fuentes alternativas, principalmente centrales de gas natural, energías renovables (solar y eólica) y sistemas de almacenamiento energético. Gracias a los mecanismos de mercado implementados por el gobierno británico United Kingdom Emissions Trading Scheme (UK ETS), el Carbon Price Floor (CPF), los Contracts for Difference (CfD) y el Capacity Market (UK ETS, CPF, CfD, Capacity Market), la sustitución de energía proveniente del carbón se realizó de manera gradual, garantizando la seguridad energética del país (Department for Energy Security and Zero, 2024; Watson & Bolton, 2024). Este proceso evidencia la importancia de una planificación sistémica y

diversificada en los procesos de descarbonización, lección fundamental para Colombia, donde la transición debe contemplar la integración coordinada de múltiples fuentes energéticas.

4.3.3 Caso 3 de estudio: Nanticoke Solar Facility (Ontario, Canadá).

Ubicación y características de la zona

La planta solar Nanticoke está localizada en el condado de Haldimand, en la provincia de Ontario, Canadá, específicamente en la costa norte del lago Erie, aproximadamente a 11 km de la localidad de Jarvis. La región presenta una geografía predominantemente plana, con suelos industriales y buena disponibilidad de infraestructura eléctrica, ya que en este mismo lugar operó anteriormente la Nanticoke Generating Station, una de las mayores plantas termoeléctricas a carbón de América del Norte (Wikipedia, 2023b). El clima de la zona corresponde a un perfil continental templado, con inviernos fríos y veranos cálidos, lo que proporciona condiciones de radiación solar adecuadas para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos durante una buena parte del año (Wikipedia, 2023a).

El sitio específico del proyecto corresponde a las instalaciones de la antigua Nanticoke Generating Station, que fue la planta termoeléctrica a carbón más grande de América del Norte, operando desde 1972 hasta su cierre en 2013. La elección de este emplazamiento para el desarrollo de la planta solar permitió reutilizar infraestructuras existentes, como las conexiones a la red eléctrica, y facilitar la transición energética en una zona previamente dependiente del carbón.

Características del proyecto

El proyecto fotovoltaico tiene una capacidad instalada de 44 megavatios (MW), distribuidos en 192.431 paneles solares fijos sobre una extensión de 158 hectáreas. Fue

desarrollado por Ontario Power Generation (OPG) en colaboración con dos comunidades indígenas: Six Nations of the Grand River Development Corporation (15%) y Mississaugas of the Credit First Nation (5%), quienes adquirieron participación accionaria en la planta (Ontario Power Generation, 2019). Esta asociación se destaca por integrar criterios de sostenibilidad social en el modelo de gestión y distribución de beneficios del proyecto.

La planta fue conectada a la red eléctrica provincial en marzo de 2019, permitiendo así la incorporación de energía renovable al sistema eléctrico canadiense, en sustitución de la generación fósil que anteriormente se producía en el mismo lugar (Haldimand Press, 2019).

Estrategias técnicas y económicas en la transición energética

En cuanto a las estrategias técnicas, el proyecto destacó por su aprovechamiento de la infraestructura eléctrica ya existente de la antigua planta térmica, incluyendo líneas de transmisión y accesos. Asimismo, se adaptó el terreno industrial previo mediante el uso de pilotes helicoidales para soportar las estructuras de los paneles, lo que permitió una instalación segura y eficiente desde el punto de vista constructivo (Stantec, 2023).

Desde el enfoque económico, la inversión total ascendió a aproximadamente 100 millones de dólares canadienses. El proyecto fue ejecutado dentro del presupuesto y cronograma establecidos (Haldimand Press, 2019). Además, la inclusión de socios indígenas permitió un modelo participativo que generó ingresos directos y fortalecimiento institucional en estas comunidades, convirtiéndose en un caso emblemático de cogestión energética con enfoque territorial.

Este caso demuestra que las transiciones desde generación térmica a fuentes renovables pueden ser técnica y económicamente viables, especialmente cuando se

aprovechan activos existentes y se articulan estrategias inclusivas. Nanticoke representa un modelo replicable para países que buscan avanzar hacia una matriz energética baja en carbono, sin descuidar las dimensiones sociales del desarrollo sostenible, ni comprometer la estabilidad del sistema energético nacional.

4.3.4 Análisis comparado de casos internacionales de transición energética

La transición desde sistemas de generación basados en carbón hacia modelos sostenibles adquiere un alcance global, pero los enfoques dependen de las condiciones políticas, económicas y territoriales de cada región. Los casos de Lusatia (Alemania), Fiddler's Ferry (Reino Unido) y Nanticoke (Canadá) muestran tres rutas distintas de reconversión energética y uso del suelo, con resultados diferenciados y relevantes para el diseño de políticas públicas y estrategias empresariales de descarbonización.

4.3.5 Ubicación y contexto territorial

En los tres casos, el factor geográfico y el legado industrial fueron determinantes en la elección de los sitios y las rutas de transición. Lusatia se presenta como una región profundamente marcada por la minería de carbón y su declive industrial, lo que ha requerido esfuerzos estructurales de diversificación productiva. Por el contrario, Nanticoke destaca por haber aprovechado un terreno industrial existente en condiciones favorables y con baja conflictividad social, mientras que Fiddler's Ferry evidencia una transición más orientada a la regeneración urbana que a la reconversión energética.

4.3.6 Enfoques tecnológicos y de uso del suelo

Nanticoke se consolida como el único caso de conversión completa de una central de carbón a una planta solar fotovoltaica de gran escala (44 MW), reutilizando infraestructura eléctrica y adaptando el terreno con soluciones técnicas viables. En Lusatia, aunque no se concreta un proyecto específico de conversión de una planta, sí se proyecta un ecosistema renovable de gran escala (Gigawattfactory), combinando tecnologías eólicas, solares y de almacenamiento. En Fiddler's Ferry, el enfoque fue urbanístico: la transición energética quedó sustituida por la construcción de viviendas e infraestructura comercial, y apenas se contempla un sistema de baterías como parte del portafolio renovable.

4.3.7 Estrategias sociales y de gobernanza

Nanticoke representa un modelo de transición justa, al incluir activamente a comunidades indígenas en la propiedad del proyecto, generando retornos económicos y fortalecimiento institucional local. Lusatia ha impulsado la participación ciudadana mediante esquemas de bonificación e inclusión de emprendedores regionales, aunque enfrenta mayores desafíos estructurales y sociales. Fiddler's Ferry, en contraste, muestra una reconversión liderada principalmente por el sector privado y gobiernos locales, con menor evidencia de estrategias de inclusión social o participación comunitaria directa.

4.3.8 Instrumentos económicos y financieros

Los tres casos evidencian la importancia de políticas públicas e incentivos para atraer inversión. En Alemania, los fondos europeos y las estrategias de desarrollo regional han sido clave para atraer empresas de tecnologías limpias, como BASF y Rock Tech Lithium. En Canadá, el proyecto de Nanticoke fue ejecutado dentro del presupuesto, respaldado por Ontario Power Generation, mostrando que las alianzas público-comunitarias pueden ser

financieramente viables. En el Reino Unido, el enfoque fue más inmobiliario-comercial, con planes urbanos promovidos por el consejo local, sin involucramiento directo en la transición renovable del sitio.

4.3.9 Sostenibilidad integral

De los tres casos, Nanticoke se destaca como un ejemplo completo de sostenibilidad integral, al conjugar éxito técnico, viabilidad económica y equidad social. Lusatia, por su parte, avanza en un modelo territorialmente ambicioso y diversificado, aunque enfrenta retos en la reconversión de terrenos y cohesión social. Fiddler's Ferry muestra una recuperación funcional del suelo, pero desvinculada de un enfoque renovable o participativo, lo que limita su aporte a la descarbonización.

Esta comparación evidencia que las transiciones energéticas no siguen un patrón único, y que el éxito depende de la integración de dimensiones técnicas, sociales, económicas y ambientales, así como de políticas gubernamentales propicias. La experiencia de Nanticoke proporciona un modelo replicable para países que buscan avanzar hacia la descarbonización con justicia social. En contraste, Lusatia ofrece lecciones sobre la necesidad de acompañamiento estructural en regiones posindustriales, mientras que Fiddler's Ferry plantea un enfoque más orientado al aprovechamiento del suelo desde una lógica urbana y privada.

Tabla 1. Comparación de alternativas

Aspecto	Caso 1: Lusatia, Alemania	Caso 2: Fiddler's Ferry, Reino Unido	Caso 3: Nanticoke, Canadá
Ubicación y características de la zona	Región industrial ubicada en el este de Alemania con una fuerte tradición minera y energética. Enfrenta desafíos posindustriales y sociales tras el cierre progresivo de las minas de carbón. Se destaca por su entorno académico y científico, con universidades e institutos de investigación cooperando en proyectos de innovación energética.	Ubicada al norte del río Mersey en Cuerdley, Warrington (Cheshire), en una zona que fue agrícola y luego semiindustrial. La planta se construyó estratégicamente cerca de centros urbanos para reducir los costos de transmisión eléctrica. Actualmente, el terreno está siendo transformado para fines urbanos e industriales y un sistema de almacenamiento energético con baterías.	Localizada en el condado de Haldimand, Ontario, junto al lago Erie. El sitio fue anteriormente ocupado por la mayor central termoeléctrica a carbón de América del Norte. La zona es predominantemente industrial, con infraestructura eléctrica ya disponible y condiciones climáticas favorables para generación solar.
Capacidad instalada y tecnología	No se centra en una planta específica, sino en una estrategia regional con múltiples desarrollos eólicos, solares y de almacenamiento a gran escala (proyecto Gigawattfactory).	Originalmente una planta de 2.000 MW de capacidad instalada a carbón. Actualmente se proyecta un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) de 150 MW como parte del portafolio de energías limpias.	Planta solar fotovoltaica con capacidad de 44 MW, compuesta por 192.431 paneles solares fijos sobre 158 hectáreas.
Aprovechamiento del terreno anterior	Se reutilizan terrenos de antiguas minas de carbón, aunque con desafíos técnicos, ambientales y financieros. La reconversión ha sido compleja debido a la geotecnia y la falta de inversión inicial.	Transformación parcial del terreno para usos urbanísticos. Se proyecta la construcción de más de 800 viviendas y 101 hectáreas para uso comercial e industrial.	Reutilización completa del terreno y de la infraestructura eléctrica de la planta anterior. Se implementaron pilotes helicoidales para asegurar la instalación sobre suelos industriales.

Aspecto	Caso 1: Lusatia, Alemania	Caso 2: Fiddler's Ferry, Reino Unido	Caso 3: Nanticoke, Canadá
Estrategias sociales	Bonificaciones ciudadanas por venta de energía eólica, inclusión de emprendedores locales y comunidades en los nuevos modelos de negocio.	No se identifican estrategias sociales activas. El proceso ha sido liderado principalmente por el sector privado y autoridades locales sin participación comunitaria directa.	Participación accionaria de comunidades indígenas (20%) en el proyecto. Modelo de cogestión que promueve beneficios económicos y fortalecimiento institucional local.
Estrategias técnicas	Desarrollo de tecnologías emergentes como almacenamiento, palas eólicas y litio. Obstáculos técnicos para readaptar terrenos mineros.	Rediseño urbano y adaptación para nuevos usos comerciales e industriales. No se identifica reconversión técnica directa a generación renovable.	Adaptación del terreno mediante pilotes y conexión a red existente. Instalación eficiente y aprovechamiento de activos físicos anteriores.
Estrategias económicas	Fondos europeos y políticas públicas de desarrollo regional. Inversiones privadas de empresas como BASF y Rock Tech Lithium, atraídas por incentivos fiscales y energéticos.	Planificación impulsada por el consejo local. Participación del sector privado en regeneración del sitio y en el sistema BESS.	Inversión de 100 millones de dólares canadienses. Proyecto ejecutado sin sobrecostos. Participación comunitaria con retorno financiero directo.
Enfoque de sostenibilidad	Transición enfocada en desarrollo territorial, empleo y diversificación productiva. Colaboración público-privada y académica.	Reconversión centrada en regeneración urbana e inmobiliaria. Poca vinculación con transición energética renovable.	Ejemplo de sostenibilidad integral: transición energética, inclusión social y viabilidad financiera.

Fuente: Elaboración propia.

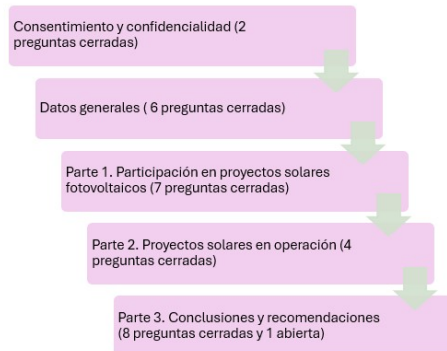
5 HALLAZGOS Y RESULTADOS

5.1 Encuestas

Teniendo en cuenta los objetivos específicos y el estudio previo de experiencias internacionales de transición de generación de energía eléctrica térmica con carbón a solar, se aplicó una encuesta en línea dirigida a actores del sector energético con conocimiento y/o experiencia en proyectos de generación solar fotovoltaica en Colombia. El cuestionario se difundió mediante redes sociales y correo electrónico, y se diseñó para recopilar información sobre experiencia previa, percepciones, motivaciones y barreras asociadas a la implementación de proyectos solares, así como sobre las fuentes de financiación utilizadas y las recomendaciones de políticas públicas percibidas como prioritarias.

Ilustración 3. Estructura de encuestas

Estructura de la encuesta de 28 preguntas



La encuesta se diseñó con ramificaciones condicionales según las respuestas dadas para buscar mayor calidad en la información recopilada.

Fuente: Elaboración Propia

Así fueron las principales respuestas obtenidas:

Gráfico 2. Gráficos resultados de encuestas. Ver Apéndice D



Fuente: Forms de teams

Los hallazgos de la encuesta en etapa preoperativa son los trámites de conexión y las licencias ambientales se convierten en causa de retrasos. Para la fase operativa se identifica como una oportunidad la tecnología y los riesgos operativos y de relacionamiento con comunidades. Las fuentes de financiación predominantes son inversionistas y recursos estatales. Actualmente la generación con carbón se considera la más adecuada para el país y la generación solar se ve como una oportunidad para diversificar el portafolio energético, seguido de la mejora de la

imagen corporativa, la reducción de emisiones y la alineación con políticas nacionales e internacionales.

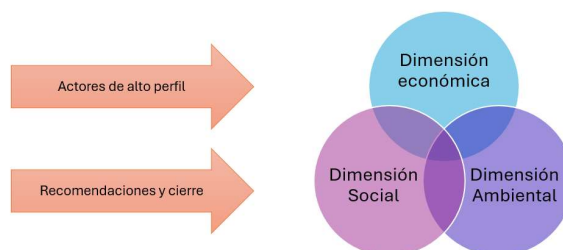
Las limitaciones técnicas o de espacio, la alta inversión inicial y la baja generación en comparación con otras fuentes son identificadas como dificultades para la reconversión.

Se recomienda al gobierno nacional la revisión, planeación e integración de los siguientes aspectos:

- La intermitencia y complementariedad energética
- La huella de carbono y producción local
- Las políticas y normatividad
- La formación y las capacidades técnicas
- El planeamiento estratégico nacional

5.2 Entrevistas

Ilustración 4. Entrevistas

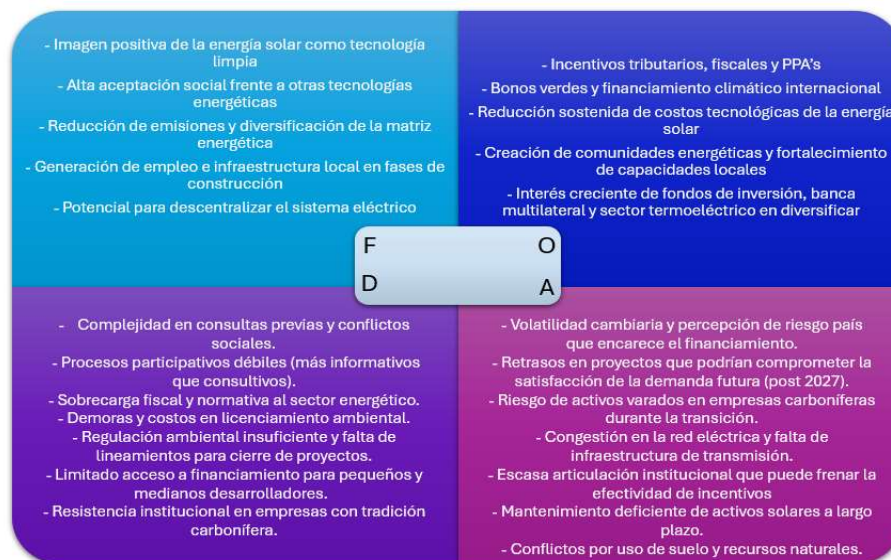


Fuente: Elaboración Propia

Se efectuaron 9 entrevistas a algunos de los actores expertos del sector energético, como CEO de empresas de energía, líderes del gremio energético y expertos técnicos de temas

sociales y ambientales. En la dimensión social de los proyectos fotovoltaicos en Colombia se evidencia un consenso en su potencial positivo, pero también hay divergencias importantes sobre la magnitud de los beneficios y la aceptación comunitaria. La clave está en la información clara, la consulta previa efectiva y la distribución equitativa de beneficios. La dimensión ambiental, refleja un consenso en los beneficios climáticos de la energía solar, pero también una fuerte preocupación por los vacíos regulatorios y la gestión de impactos acumulativos, uso del suelo y disposición final de paneles. La aceptación ambiental depende de que la regulación se fortalezca y se aplique de manera más homogénea en todo el país. Para la dimensión económica hay un panorama de oportunidades crecientes gracias a incentivos y reducción de costos, pero también barreras significativas en financiamiento, trámites y riesgo regulatorio. La reconversión del carbón hacia solar es posible, pero enfrenta retos estructurales, culturales y financieros.

Ilustración 5. Matriz DOFA Generada a partir de las entrevistas



Fuente: Elaboración Propia

La conclusión general de las entrevistas lleva a considerar el carbón necesario en el corto plazo por su confiabilidad, pero con un rol decreciente hacia 2050. La transición debe ser gradual, justa y participativa, aprovechando experiencias internacionales de reconversión y proyectos piloto en Colombia. El sistema eléctrico requiere modernización y reformas aceleradas para integrar renovables, almacenamiento y descentralización, con políticas más simples, articuladas y coherentes con el contexto territorial y social.

5.3 PESTEL

Se propusieron tres alternativas de transición con base en los hallazgos de las entrevistas y encuestas, las cuales fueron:

1. Soluciones modulares escalables con baterías de <10 MW que agregadas busquen reemplazar una planta de generación térmica de > 100 MW.
2. Ampliación de portafolio a través de acuerdos PPA's con proyectos solares y eólicos en otras regiones. Esto permitirá diversificar la generación, reducir riesgos y no depender únicamente de los activos propios y con un cronograma estructurado puede iniciar con las transformaciones de las actuales plantas.
3. Transformación progresiva de las plantas térmicas en centros híbridos de generación renovable y servicios energéticos, a través de una estrategia integral que combine energía solar fotovoltaica.

Ilustración 6. Alternativas evaluadas



Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a formular un PESTEL para cada una de las alternativas, estableciendo una ponderación a cada aspecto (Político, Económico, etc.), cada participante asignó una calificación cuantitativa de forma independiente que se vinculó con variables cualitativas.

Tabla 2. Tabla de equivalencia cualitativa/cuantitativa de evaluación de alternativas

Alto	Medio	Bajo	Múltiple	Localizado	No tiene Impacto	Seguro	Posible	No aplica	Aumento	Disminución
3	2	1								
3	2	1								
3	2	1								
1	2	3								
3	2	1								
1	2	3								
1	2	3							3	1
3	2	1								
3	2	1								
			2	3	0					
						3	2	0		
3	2	1								
3	2	1								
						3	2	0		
1	2	3								
3	2	1								
1	2	3								

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se sumaron y promediaron para definir, de esta manera, la alternativa sobre la cual se aplicarán los diferentes escenarios del modelo financiero.

Tabla 3. Tabla de calificación cualitativa y cuantitativa y proporción

Aspectos	Propuesta 1. Soluciones modulares escalables con baterías de < 10MW que agregadas busquen reemplazar una planta de generación térmica de >100MW	Calificación Alternativa 1	Propuesta 2. Diversificación con PPA y Energy Hub	Calificación Alternativa 2	Propuesta 3. Transformación progresiva de plantas térmicas en nodos energéticos híbridos, integrando generación solar fotovoltaica modular	Calificación Alternativa 3	
Políticos - 15%	Favorabilidad Política y enfoque del gobierno	Alto	3	Medio	2	Alto	3
	Estabilidad regulatoria	Alto	3	Medio	2	Alto	3
	Factores macroeconómicos e internacionales	Medio	2	Medio	2	Medio	2
Económicos - 25%	Costos de Inversión	Medio	2	Bajo	1	Medio	2
	Escalabilidad	Alto	3	Bajo	1	Alto	3
	Estabilidad financiera de la empresa	Medio	2	Alto	3	Medio	2
	Riesgos de mercado (Tecnología, precio, bolsa, tarifas y regulación, cambiario, etc.)	Medio	2	Alto	3	Medio	2
Sociales - 15%	Numero de empleos creados	En fase operación. Disminución del 70% equivalente a 91 empleados menos	1	En la fase de operación y mantenimiento serían menos empleos aproximadamente del 80%	1	En fase de instalación aumento de entre 100 y 150 personas	3
	Aceptación social	Medio	2	Bajo	1	Medio	2
	Capacitación o reconversión laboral	Alto	3	Alto	3	Alto	3
	Impacto territorial (Ubicación física de la propuesta)	Localizado	3	Localizado	3	Localizado	3
Tecnológicos - 20%	Innovación tecnológica	Alto	3	Medio	2	Alto	3
	Sinergia con infraestructura existente	Posible	2	No aplica	0	Posible	2
	Disponibilidad de proveedores y mantenimiento	Alto	3	Alto	3	Alto	3
Ecológico - 10%	Gestión ambiental de operación, mantenimiento y disposición final de paneles y baterías	Alto	3	No aplica	0	Alto	3
	Huella ambiental del ciclo de vida	Seguro	3	Posible	2	Seguro	3
Legal - 15%	Riesgos del marco legal y regulatorio	Medio	2	Medio	2	Medio	2
	Oportunidades del marco legal y regulatorio	Alto	3	Alto	3	Alto	3
	Requisitos de licenciamiento y permisos	Medio	2	No aplica	0	Alto	3
Total			47		32		50

Fuente: Elaboración Propia

La aplicación de esta metodología muestra que la propuesta 3, es decir, transformación progresiva de plantas térmicas en nodos energéticos híbridos, integrando generación solar fotovoltaica modular, es la que mayor calificación obtuvo. En el próximo capítulo se desarrollará su análisis financiero.

Tabla 4. Tabla de resultados de evaluación

RESULTADO ANÁLISIS PESTEL			
Aspecto	Alt. #1: Soluciones modulares con baterías, menores a 10 MW, para reemplazo de una planta de 100MW	Alt. #2: Diversificación con PPA y Energy Hub	Alt. #3: Transformación progresiva de plantas térmicas en nodos energéticos híbridos, integrando generación solar fotovoltaica modular
Político	1,2	0,9	1,2
Económico	2,25	2	2,25
Social	1,35	1,2	1,65
Tecnológico	1,6	1	1,6
Ecológico	0,6	0,2	0,6
Legal	1,05	0,45	1,2
Total	8,05	5,75	8,5

Fuente: Elaboración Propia

5.4 Modelo Financiero

El modelo financiero desarrollado para esta investigación permite evaluar la viabilidad económica de la transición desde la generación termoeléctrica, hacia una alternativa basada en energía solar fotovoltaica.

Resumen:

Ilustración 7. Resumen escenarios analizados en el modelo Financiero

La matriz energética analizada parte de la condición inicial de una planta a carbón con altas emisiones y costos crecientes por regulación ambiental. Los escenarios evalúan:

Financieramente se evalúan:
VPN (Valor Presente Neto), TIR, Beneficio/Costos y emisiones asociadas.

Cambios en impuesto al carbono (entre USD\$6 y USD\$130/ton CO2)

Distintas capacidades instaladas (50, 275 y 1088 MW)

Variación del porcentaje de generación que permanece en carbón (10%, 25%, 50%)

Escenarios base sin impuesto, sin variación de ingresos, con variación en generación de energía en MW

Escenario con construcción de una planta solar nueva

Escenarios donde el impuesto al carbono se introduce de forma creciente

Fuente: Elaboración Propia

El modelo Base que se propone tiene las siguientes variables y valores de referencia:

Tabla 5. Modelo Base

FLUJO DE CAJA - PROYECTO SOLAR - IMPUESTOS Y DEPRECIACIÓN			
MODELO BASE			
Variables		Valor de Referencia	Descripción
Radiación(Horas pico solar)		4,60	
Capacidad Instalada MW		50,00	
Factor de rendimiento (Performance Ratio - PR)		0,8	
Generación (kWh/año) - Año 0		67.160.000	kWp * Radiación *365*FR*1000
Costos de Inversión - CAPEX TOTAL (USD \$) Antes de IVA	\$	33.500.000	
IVA del Proyecto - (Estimado entre bienes exentos y gravados - 8%)	\$	2.481.481	1,08
Costos de Inversión - CAPEX TOTAL (USD \$) IVA Incluido	\$	35.981.481	
Gastos Operativos - OPEX (USD \$) - Año 0	\$	342.500	
Seguros (USD \$/año) - Año 0	\$	83.750	0,25%
OPEX TOTAL SOLAR	\$	426.250	
Factor de Emisión Ton/MWh - Solar		0,677	
ICA municipio de Dibulla		0,00	
Referente valor cargo por confiabilidad solar USD		18,2	18USD/MWh
Generacion promedio carbon		1.546.000.000	
Capacidad de los unidades		300	
OPEX FIJO CARBON		15.150.000	
OPEX Variable CARBON		1.947.960	
OPEX ANUAL CARBON		17.097.960	

Fuente: Elaboración Propia

Este análisis busca evaluar y comparar la rentabilidad de diferentes escenarios para la generación eléctrica solar a gran escala, a través del cálculo de la TIR y el VPN, proyectando egresos e ingresos, partiendo de elementos base como son:

Radiación (Horas pico solar) en el sector de Dibulla en la Guajira.

Capacidad instalada en MW partiendo de la existencia de un terreno en el que actualmente se encuentra ubicada una planta de generación térmica de aproximadamente 30Ha.



Factor de rendimiento (Performance Ratio - PR)

Generación (kWh/año) - Año 0, calculada así: kWp * Radiación 365FR*1000

Tomando como referencia la Ficha Técnica Plantas fotovoltaicas a Gran Escala del Catálogo Tecnológico Colombiano "Tecnologías de generación y almacenamiento de energía" marzo 2025, se incluyeron como Datos financieros los Costos de inversión CAPEX, para Inversión específica, sistema total, per-DC (MUSD/MWp), y los costos de operación y mantenimiento OPEX (O&M fijas (USD/MWe/año)). También se incluyó una tasa de degradación anual constante.

Factor de emisión Ton/MWh - solar

OPEX fijo y variable de la generación con carbón.

Se proyectaron ingresos asociados a la generación solar con base a pronóstico de precios de energía con el modelo DHOG (USD/kWh), la generación en kWh/Año, menos la degradación.

Cargo por confiabilidad solar, tomado de subasta solar 2027- 20028, ofertado por la última planta asignada en 2024, según XM, operador del sistema.

Reducción de emisiones

Costos asociados a la reducción o eliminación de carbón

Desmante de la planta térmica y su valor de salvamento

Depreciación y los impuestos, incluyendo beneficios relacionados con la Ley 1715 de 2014.

Los valores constantes fueron indexados con IPC proyectado y el incremento tarifario estimado

Cada escenario consta de los siguientes conceptos:

Ilustración 8. Conceptos aplicados al modelo financiero

Componente	Conceptos
Variables y valores de referencia	Radiación Capacidad Instalada Factor de rendimiento Generación Factor de emisión Ton/MWh Solar
Factores de variación o indexación	Variación IPC – Inflación Incremento tarifario Degradación (Capacidad nominal) Precios tonelada de CO2
Ingresos	Incluye gastos en los que se deja de incurrir por cambiar la generación térmica con carbón a solar
Gastos	Incluye ingresos que se dejan de percibir por cambiar la generación térmica con carbón a solar
Depreciación e impuestos	ICA IVA Impuesto de Renta Deducción en impuesto de renta
Resumen del modelo	WACC, TIR, VPN, Beneficios/Costos, Años en déficit, Retorno de la inversión en años
Gráfico del Flujo de caja	Sin financiación
Gráfico de ingresos y gastos	Sin financiación

Fuente: Elaboración Propia

Se tomaron como supuestos base:

- El terreno con el que actualmente cuenta la termoeléctrica permite la instalación de paneles solares para la generación de hasta 50MW.



- La capacidad de generación con carbón de las unidades que se reemplazarían es de 275MW.

- Debido a la falta de regulación sobre el tema de baterías, estas no fueron tenidas en cuenta en estos modelos.

- No se tuvieron en cuenta costos de financiación.

- El año de inicio del proyecto es 2027, y el tiempo estimado de duración de 20 años.

- Todas las cifras están expresadas en dólares americanos.

- No se tuvieron en cuenta costos de baterías porque actualmente no hay suficiente regulación sobre la categoría operacional o económica a la que pertenece ni cómo debe participar en el mercado mayorista; así como el esquema de remuneración para los servicios que las baterías pueden ofrecer. En la actualidad no se ha generado una metodología para reconocer la inversión inicial (CAPEX) en almacenamiento y qué ingresos van a generar a largo plazo.

- Se tomo un WACC del 8%.

- El resultado #¡NUM!, indica que la TIR resultó negativa y que por lo tanto no es calculable, es decir, los flujos nunca vuelven positivo el acumulado.

Tabla 6. Tabla resumen general de los escenarios

RESUMEN GENERAL ESCENARIOS									
Modelo	ID	Valor Presente Egresos	Valor Presente Ingresos	Capacidad Instalada MW	VPN	TIR	Beneficios /Costos	Valor Impuesto al carbono/ Emisiones CO2 t	Porc. de generación con carbón
1	Modelo Base	\$ 3.785.333.257	\$ 1.251.098.149	50,00	-\$ 2.540.226.982	#NUM!	0,33	Factor de Emision Ton/Mwh - Solar 0,677	100%
2	Modelo Base 2	\$ 3.973.053.762	\$ 1.635.870.832	275,00	-\$ 2.369.238.237	#NUM!	0,41	Emision Ton/Mwh - Solar 0,677	100%
3	Modelo Base =CapGenEnerg	\$ 4.651.350.520	\$ 3.026.182.795	1088,00	-\$ 1.751.398.904	#NUM!	0,65	Emision Ton/Mwh - Solar 0,677	100%
4	Modelo_terreno	\$ 3.786.305.913	\$ 1.251.098.149	50,00	-\$ 2.541.199.638	#NUM!	0,33	Emision Ton/Mwh - Solar 0,677	100%
5	Modelo planta nueva	\$ 42.688.324	\$ 85.505.041	50,00	\$ 37.024.843	28%	2,00	Emision Ton/Mwh - Solar 0,677	100%
6	Modelo Varia \$Emisiones 50 TIR 11	\$ 3.785.333.257	\$ 3.866.585.631	50,00	\$ 18.335.881	11%	1,02	\$ 120	100%
7	Modelo Varia \$Emisiones 275 TIR 11	\$ 3.973.053.762	\$ 4.374.334.423	275,00	\$ 63.261.628	11%	1,10	\$ 114	100%
8	Modelo Varia \$Emisiones 1088 TIR 11	\$ 4.651.350.520	\$ 6.131.906.439	1088,00	\$ 220.548.420	11%	1,32	\$ 96	100%
9	Modelo Varia Emisiones \$10_50	\$ 3.785.333.257	\$ 1.353.321.153	50,00	-\$ 2.472.490.618	#NUM!	0,36	\$ 10	100%
10	Modelo Varia Emisiones \$10_275	\$ 3.973.053.762	\$ 1.738.093.836	275,00	-\$ 2.456.691.751	#NUM!	0,44	\$ 10	100%
11	Modelo Varia Emisiones \$10_1088	\$ 4.651.350.520	\$ 3.128.405.799	1088,00	-\$ 2.399.605.179	#NUM!	0,67	\$ 10	100%
12	Modelo Varia Emisiones \$50 50	\$ 3.785.333.257	\$ 2.265.822.356	50,00	-\$ 1.568.136.063	#NUM!	0,60	\$ 50	100%
13	Modelo Varia Emisiones \$50 275	\$ 3.973.053.762	\$ 2.753.862.417	275,00	-\$ 1.485.729.738	#NUM!	0,69	\$ 50	100%
14	Modelo Varia Emisiones \$50 1088	\$ 4.651.350.520	\$ 4.517.313.836	1088,00	-\$ 1.187.968.217	#NUM!	0,97	\$ 50	100%
15	Modelo Varia Emisiones \$130 50	\$ 3.785.333.257	\$ 4.090.824.764	50,00	\$ 240.573.047	40%	1,08	\$ 130	100%
16	Modelo Varia Emisiones \$130 275	\$ 3.973.053.762	\$ 4.785.399.578	275,00	\$ 456.194.289	27%	1,20	\$ 130	100%
17	Modelo Varia Emisiones \$130 1088	\$ 4.651.350.520	\$ 7.295.123.910	1088,00	\$ 1.235.305.708	23%	1,57	\$ 130	100%
18	Modelo % generacion 50_10%	\$ 461.077.427	\$ 218.821.792	50,00	-\$ 281.919.483	#NUM!	0,47	\$ 6	0,10
19	Modelo % generacion 275_10%	\$ 648.797.932	\$ 593.267.738	275,00	-\$ 272.781.362	#NUM!	0,91	\$ 6	10%
20	Modelo % generacion 1088_10%	\$ 1.327.094.690	\$ 1.946.265.755	1088,00	-\$ 239.762.285	4%	1,47	\$ 6	10%
21	Modelo % generacion 50_25%	\$ 1.015.120.065	\$ 392.696.666	50,00	-\$ 662.087.248	#NUM!	0,39	\$ 6	25%
22	Modelo % generacion 275_25%	\$ 1.202.840.570	\$ 767.142.611	275,00	-\$ 652.949.127	#NUM!	0,64	\$ 6	25%
23	Modelo % generacion 1088_25%	\$ 1.881.137.328	\$ 2.120.140.623	1088,00	-\$ 619.930.050	-4%	1,13	\$ 6	25%
24	Modelo % generacion 50_50%	\$ 1.938.524.462	\$ 682.488.121	50,00	-\$ 1.295.700.190	#NUM!	0,35	\$ 6	50%
25	Modelo % generacion 275_50%	\$ 2.126.244.967	\$ 1.056.934.067	275,00	-\$ 1.286.562.069	#NUM!	0,50	\$ 6	50%
26	Modelo % generacion 1088_50%	\$ 2.804.541.726	\$ 2.409.932.084	1088,00	-\$ 1.253.542.992	#NUM!	0,86	\$ 6	50%

Fuente: Elaboración Propia

Descripción de los modelos

Los modelos 1 y 2, difieren únicamente en la capacidad de generación 50MW y 275MW, respectivamente.



Para el modelo 3 se halló la capacidad de generación solar equivalente a la actual generación termoeléctrica con carbón de las unidades que se reemplazarían, el resultado es de 1088MW.

El modelo 4 es el único en el que se incorporan costos por alquiler de terreno, para todos los demás, se supone que al desmontar la planta térmica hay un terreno del cual se hará uso.

Para el modelo 5 se retiran todos los efectos derivados de la transición, estimando que es un proyecto nuevo.

Variable principal 1. Variación en el precio de las emisiones de CO₂/t

Los modelos 6, 7 y 8, suponen una capacidad instalada de 50MW, 275MW y 1088MW, y una TIR fija del 11%, hallando el precio del impuesto al carbono /Emisiones de CO₂ t, el cual da como resultado USD\$120, USD\$114 y USD\$96, respectivamente.

Para los modelos 9 a 17 se combinan generaciones de 50MW, 275MW y 1088MW con precios de emisión CO₂/t, de USD\$10, USD\$50 y USD\$130, y se halla la TIR.

Variable principal 2. Porcentaje de generación parcial térmica con carbón

Del modelo 18 al 26 se combina la capacidad de generación eléctrica de 50MW, 275MW y 1088MW para una generación térmica del 10%, 25% y 50%. Se modelaron 3 escenarios con TIR fija del 11%, pero el porcentaje de generación térmica arrojaba un valor negativo, lo cual no es viable físicamente, por lo que estos modelos no se incluyen.

Hallazgos

Todos los escenarios iniciales muestran un VPN extremadamente negativo (entre - \$1.7 y -\$ 2.5) y TIR no calculable, con relaciones costo beneficio/costos <1, entre 0.33 y 0.65, es decir que cada unidad monetaria invertida retorna entre 33 y 65 centavos. Poniendo en evidencia que el carbón sigue siendo financieramente más barato si las emisiones no tienen un costo real. El mercado por sí mismo no impulsa la transición.

Ilustración 9. Resultados Modelo Base



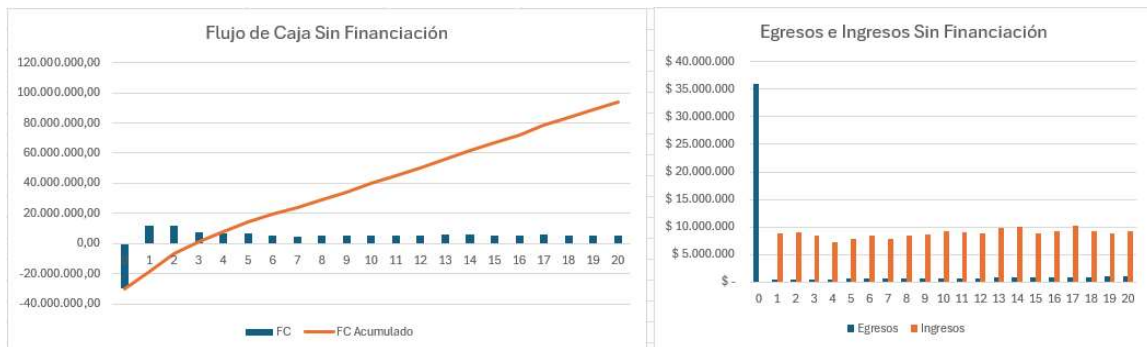
Fuente: Elaboración Propia

Aun cuando los modelos persiguen hallar alternativas para la transición de una planta termoeléctrica con carbón a generación solar, el modelo 5 plantea un escenario que no se ve influido por los gastos relacionados con la actual generación con carbón y que incorpora una planta desde cero.

Para este modelo no se tuvo en cuenta la generación promedio con carbón, los ingresos que de allí se derivarían, ni los costos de consumo de carbón, impuesto al carbono, Operación y mantenimiento fijo y variable, ni el valor de desmonte y salvamento de los equipos térmicos. Se incluyó el valor en alquiler de un terreno, retirando la posibilidad de reusar un terreno previamente dedicado a la generación con carbón.

Este es el único modelo que arrojó VPN positivo (\$37M) y TIR 28%, Beneficio/Costo = 2. Indicando que los proyectos nuevos, con costos más bajos o incentivos, pueden ser rentables.

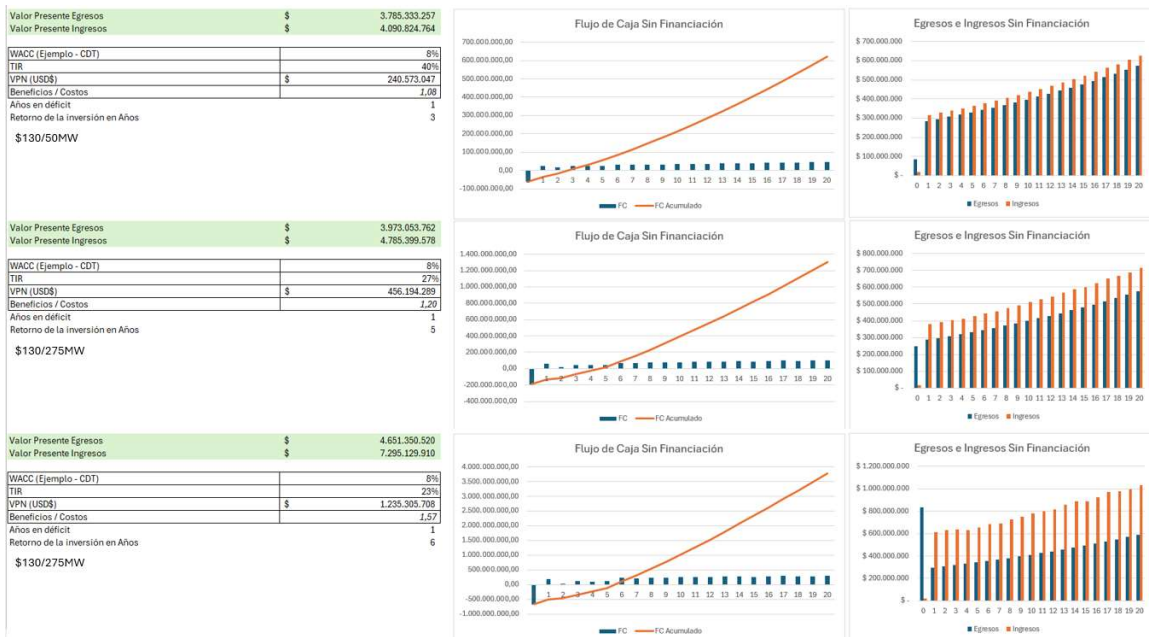
Gráfico 3. Modelo 5



Fuente: Elaboración Propia

Los modelos con variación del impuesto al carbono 9 a 17 muestran que a medida que el impuesto sube, los proyectos resultan más rentables. Con USD\$10/tCO2 siguen siendo inviables (VPN altamente negativo y TIR sigue sin existir). Con USD\$50/tCO2, se acercan al equilibrio (Beneficio/Costos hasta 0.97). Con USD\$130/tCO2, los proyectos se vuelven claramente rentables: VPN positivo, TIR aparece entre 23-40%, y Beneficio/Costos >1. Esto muestra que la política de precios al carbono es decisiva para viabilizar la transición, el sistema de generación solar solo compite con el carbón si la regulación penaliza adecuadamente las emisiones. A partir de USD\$120/ton CO2, la solar no solo es ambientalmente preferible, sino financieramente superior.

Gráfico 4. Modelos comparados 15, 16 y 17



Fuente: Elaboración Propia

Los modelos con porcentaje de generación parcial con carbón de 10%, 25% y 50%, con impuesto al carbono bajo (USD\$6), muestran que los VPN continúan negativos. LA TIR sigue siendo nula o incluso negativa. Solo en las plantas grandes (1.088MW), la relación Beneficio/Costo >1, pero el VPN sigue negativo, lo que lo hace financieramente no atractivo. Estas cifras evidencian que reducir la generación a carbón por sí misma no genera suficiente rentabilidad si el precio al CO2 es bajo.

Gráfico 5. Modelos 18, 19 y 20 con porcentaje de generación parcial con carbón de 10%



Fuente: Elaboración Propia

6 DISCUSIÓN

Si bien la energía solar fotovoltaica es ampliamente reconocida como una alternativa viable, la evidencia recopilada en las entrevistas y las encuestas revela que su adopción efectiva depende más de factores institucionales como los trámites de gestión de licencias ambientales, sociales y de infraestructura como los puntos de conexiones al SIN, que de las características técnicas de la tecnología. Un aspecto para resaltar que emerge de los hallazgos es la necesidad de planificar, desde ahora, los riesgos asociados al uso de la tecnología fotovoltaica, incluyendo los impactos ambientales acumulativos sobre el suelo, los ecosistemas, y la gestión del fin de vida útil de los paneles, los cuales podrían convertirse en nuevos pasivos ambientales si no se abordan con anticipación.

Un aspecto central es el papel del carbón en la transición energética, tanto los actores consultados como estudios internacionales coinciden en que, aunque la participación del carbón debe disminuir progresivamente, su retiro no puede ser abrupto, dada su contribución a la firmeza y confiabilidad del sistema eléctrico.

De acuerdo con la información recopilada, es posible identificar que la transición de la generación termoeléctrica hacia tecnologías solares fotovoltaicas en Colombia se encuentra en un punto de inflexión impulsado, tanto por factores regulatorios como por condiciones del mercado energético. El estado del arte evidencia un crecimiento sostenido de la capacidad instalada solar en el país, junto con un potencial técnico aún no plenamente aprovechado. Este panorama no solo abarca la generación de energía, sino también todo el ciclo de vida de la tecnología fotovoltaica: desde la fabricación de paneles, su operación y mantenimiento, hasta la disposición final de los equipos. Además, este panorama, sumado a la disminución de costos



de los sistemas fotovoltaicos y a las exigencias globales de descarbonización, configura un entorno favorable para la migración desde las tecnologías basadas en carbón. Un claro ejemplo de esta transición se materializa con la creación de Gecelca Solar, anunciada por el gobierno a principios del mes de diciembre de 2025. Con un portafolio inicial de 650 MW de energía solar, este hito refuerza la expansión de capacidad instalada solar y concretiza una apuesta estratégica por la descarbonización.

Los casos internacionales muestran que los procesos de transición desde plantas térmicas a los sistemas solares requieren estrategias graduales que combinen reconversión tecnológica, participación comunitaria y apoyo estatal.

La aplicación del PESTEL permitió comprender cómo los factores externos influyen en la viabilidad de las tres alternativas planteadas. Este ejercicio multicriterio mostro que la alternativa 3, basada en la transformación progresiva de la infraestructura térmica con integración fotovoltaica, presenta el mejor desempeño en general. Esta alternativa destaca por su mayor alineación con las tendencias regulatorias, su compatibilidad tecnológica y su potencial para brindar continuidad operativa durante la transición.

Es importante tener en cuenta los hallazgos derivados de los escenarios del modelo financiero planteado, concluyendo que incluso aumentando la capacidad de generación la rentabilidad, sigue negativa porque los ingresos no compensan la inversión inicial, y no es reconocido el ahorro en emisiones. Estos hallazgos reflejan el estado actual del mercado.

En relación con el escenario de una planta nueva (sin impuestos) que mostró ser atractiva financieramente, con rendimientos altos, con aprovechamiento de la eficiencia y diseño



optimizado, resulta evidente que el motor financiero de la transición es el valor de emisiones CO₂/t, el aumento del valor del impuesto aumenta la viabilidad financiera del proyecto.

7 PLAN DE ACCIÓN

Si bien el análisis PESTEL permitió identificar una alternativa prioritaria desde una perspectiva estratégica y contextual, los modelos financieros obtenidos a través de esta investigación evidencian que dicha alternativa no necesariamente representa la alternativa más viable para iniciar con un proceso realista de descarbonización para una central térmica. Esto refleja una dinámica similar a la observada en el caso de Gecelca Solar, donde la empresa históricamente dedicada a generación térmica, no basó su transformación únicamente a factores del entorno, si no a la identificación de una alternativa que fuera financieramente viable y ejecutable dentro de sus capacidades técnicas y territoriales.

De manera consiente con esta investigación, el plan de acción formulado se construye a partir de los hallazgos del modelo financiero y no exclusivamente del PESTEL. Por ello se propone una ruta específica para el desarrollo de una planta solar de 50 MW, identificando los hitos clave necesarios para un proyecto desde cero, tal como lo demanda una transición ordenada, gradual y alineada con la realidad financiera en una central térmica:

Tabla 7. Tabla de plan de acción

FASE 1. DIAGNOSTICO Y ANALISIS INICIAL

ACCIONES	RESPONSABLE	RECURSOS	RECURSOS FINANCIERO ESTIMADO USD	ENTREGABLES	TIEMPO ESTIMADO
Levantamiento de información técnica, operativa, y económica de la termoelectrica Prospeccion de tierras y proyectos Revisión de proyectos existentes Identificación de restricciones regulatorias, ambientales y de interconexión Evaluación preliminar de la Intermitencia y perfil solar del sitio	Equipo Técnico-Dirección de Operaciones	Personal Interno - Acceso SCADA	1,79 – 1,80 millones	Informe de Diagnostico energetico y operacional Matriz de riesgos iniciales (Tecnicos-ambientales y financieros) Informe de resultado de opciones evaluadas	6 meses

FASE 2.PREFACTIBILIDAD Y EVALUACION TÉCNICO ECONOMICA

ACCIONES	RESPONSABLE	RECURSOS	RECURSOS FINANCIERO	ENTREGABLES	TIEMPO ESTIMADO
Analisis CAPEX/OPEX del portafolio de proveedores de tecnologia solar. Evaluación financiera Modelación de la intermitencia y estimación del factor de planta Preselección de alternativa fotovoltaica solar optima	Consultor Externo - Planeación estrategica	Consultor especializado - Software de simulación.	2,15-2,16 millones	Estudio de prefactibilidad solar. Informe de analisis de Intermitencia. Recomendación técnica justificando proveedor seleccionado.	6 meses

FASE 3. FASE DE INGENIERIA, DISEÑO Y LICENCIAMIENTO

ACCIONES	RESPONSABLE	RECURSOS	RECURSOS FINANCIERO	ENTREGABLES	TIEMPO ESTIMADO
Ingeniería conceptual básica del sistema solar Estudios de Impacto ambiental y trámites ante la autoridad competente Análisis de conexión del servicio eléctrico y cumplimiento CREG Diseño de medidas de mitigación y gestión socio ambiental	Consultor Externo - Área de Gestión Ambiental	Asesoría Regulatoria Modelos CAD	2,87-2,88 millones	Ingeniería básica aprobada - Estudio de Impacto ambiental EIA o Permiso ambiental Aprobación y/o radicación de licencias Estudios de conexión	2 años

FASE 4. FASE DE FINANCIACIÓN Y CONTRATACIÓN

ACCIONES	RESPONSABLE	RECURSOS	RECURSOS FINANCIERO	ENTREGABLES	TIEMPO ESTIMADO
Estructura financiera de la inversión Obtención de recursos (Banca, inversionistas, bonos verdes) Proceso de contratación Ingeniería, adquisiciones y construcción	Dirección financiera - Gerencia general	Asesoría financiera - Bancos - Inversionistas- Área jurídica	1,4-1,5 millones	Estructura financiera aprobada Modelo Financiero final Contratos firmados y aprobados	1 año

FASE 5. FASE DE CONSTRUCCIÓN E INTEGRACIÓN

ACCIONES	RESPONSABLE	RECURSOS	RECURSOS FINANCIERO	ENTREGABLES	TIEMPO ESTIMADO
Construcción del parque solar Integración con la infraestructura existente de la termoelectrícula Implementación de sistemas de monitoreo y control Pruebas de puesta en marcha	Contratista - Supervisión técnica de la empresa	Personal Técnico-Terrenos y permisos	27,7-28 millones	Informes avances de la obra Registro fotográfico y técnico de la construcción Certificados de calidad y cumplimiento Normativo Acta de puesta en marcha Parque solar operativo	1.5 años

FASE 6. FASE DE OPERACIÓN, MONITOREO Y MEJORA CONTINUA (OPEX)

ACCIONES	RESPONSABLE	RECURSOS	RECURSOS FINANCIERO	ENTREGABLES	TIEMPO ESTIMADO
Construcción del parque solar Integración con la infraestructura existente de la termoelectrícula Implementación de sistemas de monitoreo y control Pruebas de puesta en marcha	Contratista - Supervisión técnica de la empresa	Personal Técnico-Terrenos y permisos	426-427 millones	Informes avances de la obra Registro fotográfico y técnico de la construcción Certificados de calidad y cumplimiento Normativo Acta de puesta en marcha Parque solar operativo	30 años continuo

8 CONCLUSIONES

Los casos internacionales revisados muestran que las transiciones exitosas combinan planificación estratégica, participación comunitaria y una transición justa en los territorios. Para Colombia, la reconversión laboral y la aceptación social son condiciones necesarias para que cualquier cambio tecnológico sea sostenible en el tiempo.

En Colombia existe una percepción favorable hacia la transición y el uso de solar fotovoltaica, sin embargo, su intermitencia condiciona la operación y la aceptación sectorial, especialmente en un sistema que depende de la complementariedad entre fuentes. Esto exige una planificación de red y de la operación que preserve la confiabilidad del SIN.

Desde la perspectiva financiera, el modelo desarrollado indica que la reconversión de carbón a solar fotovoltaica a gran escala (>50 MW) no es viable con los niveles actuales del impuesto al carbono. La viabilidad depende de manera crítica del precio por tonelada de CO₂, donde solo umbrales altos, creíbles y sostenidos del impuesto permitirían acercarse a una tasa interna de retorno aceptable para impulsar la inversión y acelerar la descarbonización del portafolio térmico. Además, variar el porcentaje de generación fotovoltaica, no cambia de forma significativa los resultados, en ausencia de mejores señales económicas.

En cuanto al alcance y las limitaciones, el modelo financiero se concentra en la rentabilidad del proyecto. No incorpora impactos ambientales (por ejemplo, la



ocupación de suelo u otros), administrativos (trámites de conexión, licencias, entre otros) ni sociales (acuerdos comunitarios, efectos sobre el empleo, eventuales procesos de consulta previa). Así mismo, el análisis no contempla la inclusión de sistemas de almacenamiento en baterías, debido a la incertidumbre regulatoria sobre la implementación y remuneración en el mercado colombiano. Dichas dimensiones son relevantes para decisiones públicas o empresariales, pero no forman parte del objeto de este estudio y, por lo tanto, no se incluyeron en los resultados.

En términos prácticos, para el escenario de una térmica de gran capacidad que busca usar parte o la totalidad de su predio actual al instalar solar fotovoltaica, el ejercicio financiero demuestra que la transición no resulta viable bajo las condiciones actuales. Aun cuando se consideran como egresos los costos inherentes de la operación térmica, incluido el cargo por confiabilidad y como ahorro potencial la eliminación del pago del impuesto al carbono asociado a la combustión del carbón. Los resultados del modelo financiero muestran que la inversión no alcanza niveles de rentabilidad aceptables ni cumplen con los requisitos mínimos de viabilidad económica.

Se podría concluir que, sin impuesto al carbono, la transición solar no es financieramente viable, siendo su punto de equilibrio al superar USD\$100/ton CO₂, en conjunto, la escala de generación en MW influye de forma directamente proporcional y la reducción de generación de energía con carbón no cambia la decisión financiera sin impuesto significativo, y en definitiva, la transición energética no depende de la tecnología, sino que mayormente se deriva de las políticas públicas.



Es importante señalar que, si por decisión política o económica la empresa decide transformar la termogeneración a carbón, el desarrollo de un proyecto solar constituye una alternativa estratégica para mantener presencia en el mercado y avanzar hacia un portafolio más limpio, aun cuando no sea financieramente atractivo. Por otro lado, si la empresa opta por expandir su capacidad instalada con energía solar, sin reemplazar la generación a carbón, se encontrará con un modelo rentable y atractivo, dado que en este caso, la inversión en solar se concibe como ampliación de portafolio y no como sustitución de infraestructura térmica existente. Esta diferenciación es clave para entender por qué la transición completa desde carbón a solar exige señales económicas más fuertes, mientras que la expansión fotovoltaica independiente puede resultar financieramente favorable bajo las condiciones actuales.



9 CONTRIBUCIÓN A LOS ODS

Esta investigación aporta al ODS 13. Acción por el clima y ODS 7. Energía asequible y no contaminante, ODS 7.1. Aumentar el acceso a servicios de energía asequibles, fiables y modernos, con variaciones nacionales y regionales. ODS 7.2. Aumentar la participación de las energías renovables en la combinación energética mundial, principalmente en el sector eléctrico.

También aporta al ODS 9 Industria, innovación e infraestructura al plantear la modernización de la tecnología en una planta de termo generación a base de carbón, mediante la incorporación de tecnología fotovoltaica, se refuerza la innovación y adopción de tecnologías más limpias en el sector energético. ODS 13 Acción por el clima, la investigación contribuye al planteamiento de soluciones para la mitigación del cambio climático mediante la reducción de los gases efecto invernadero.

10 IMPACTO DEL TRABAJO AL DESARROLLO SOSTENIBLE

Esta investigación se orienta a explorar alternativas para que una generadora termoeléctrica con carbón transite de forma viable a generación solar. Aunque los modelos planteados muestran altísima dependencia a la variabilidad del valor de las emisiones de CO₂/t. El análisis limitado del SROI muestra un retorno de inversión de 2,53:1 en beneficios sociales y ambientales. Lo cual evidencia que el proyecto solar genera más del doble de valor social por cada peso invertido. A continuación, se relacionan las tablas de cálculo:

Tabla 8. Tabla Cálculo SROI

GRUPO DE INTERÉS	Empresas termoeléctricas que utilizan carbón como combustible principal
NECESIDAD O PROBLEMA A RESOLVER	Necesidad de reducir emisiones y cumplir metas climáticas, asegurando viabilidad financiera futura, a través de la transición de carbón a solar fotovoltaica.
INSUMOS	Registro contable de gasto por compras de carbon (2024) Informe de Sostenibilidad (2024) Declaración y pago impuesto al carbono Registros contables beneficios empleados Registro contable por costos de monitoreos ambientales
ACTIVIDADES	Diagnóstico técnico y recomendaciones para transición a solar
PRODUCTOS	Informe de diagnostico entregado

UNIVERSIDAD EAFIT

RESULTADOS, OUTCOMES O BENEFICIOS	INDICADOR	DURACIÓN DEL BENEFICIO	PROXY	FUENTE DEL PROXY	VALOR BRUTO DEL OUTCOME EN USD (multiplicar el proxy por el indicador)	ATRIBUCIÓN O PESO MUERTO (si aplica)	DESPLAZAMIENTO (si aplica)	DECRECIMIENTO (si aplica)	VALOR NETO (valor Bruto corregido con Atribución, Desplazamiento y Decrecimiento) En USD\$
Ahorro por dejar de comprar carbón	559,771 Toneladas de carbón evitadas por año	20 años que es el tiempo estimado de duración del proyecto	\$USD 110,75 Precio de carbón por tonelada	Precios de referencia carbón térmico actualizados	\$ 61.994.690	NA	NA	NA	\$ 61.994.690
Reducción de emisiones GEI	Factor de emisión 0,677Ton/MWh	20 años que es el tiempo estimado de duración del proyecto	La reducción de emisiones es igual al Precio por tonelada de CO2 * la generación * factor de emisión. Donde la Generación de energía es igual a KWp * Radiación *365*Factor de Radiación *1000 Radiación: 4,51 Capacidad instalada 50MWh Factor de rendimiento 0,8 Factor de emisión Ton/MWh Precios Tonelada de CO2:\$USD10 Capacidad nominal de degradación de 0,3%	Informes de Sostenibilidad y de GEI Proyecciones macroeconómicas, Catálogo Tecnológico	Generación (kWh/Año)= 50*4,60*0,8*365*1000=362.153.000 MenosCapacidad nominal de degradación de 0,3%= 361.066.541kWh/Año Reducción de emisiones= 361.066.541*10*0,677 =USD\$2.444.420	NA	NA	NA	\$ 453.309
Impuesto al carbono	559,771 Toneladas de carbón evitadas por año	20 años que es el tiempo estimado de duración del proyecto	Precios Tonelada de CO2:US\$10 Tarifa impuesto al carbono 2025 COP\$69.787,61 Tarifa creciente para 2025-25%, 2026-50%, 2027-75%, 2028-100%	Resolución DIAN No. 000008 del 31 de enero de 2025 - Art. 2 Base gravable y tarifa impuesto al carbono Informes de Sostenibilidad Estados Financieros	559.771Ton Carbón/Año * USD\$110,75 USD/Ton Tarifa 2027 USD\$13,09 Impuesto al carbono por generación con carbón = 7.324.709 para el año 2027 (Año 1)	NA	NA	NA	\$ 7.324.709
Cantidad de empleos (fase de construcción)	750 Cantidad de empleos ganados x salario mensual	1 año, por el tiempo que la construcción de una planta solar fotovoltaica mayor a 100 MW dura aproximadamente	COP\$ 2.500.000/4000 Salario mensual del trabajador	Contratos Gecelca	\$ 468.750	NA	NA	NA	\$ 468.750
Cantidad de empleos (fases de operación y mantenimiento)	1050 Cantidad de empleos perdidos x salario mensual	1 año, por el tiempo que tarda en entrar en operación comercial la planta solar mayor a 100 MW	COP\$ 2.500.000/4000 Salario mensual del trabajador	Contratos Gecelca	\$ 656.250	NA	NA	NA	\$ 656.250
Costos por monitoreos ambientales asociados a las actividades de minería de carbón	57 Cantidad de monitoreos anuales	1 año, pues los monitoreos deben realizarse anualmente, de acuerdo con la normatividad de la licencia ambiental \$	\$ 8.723.046,72 Costo de cada monitoreo	Facturación Gecelca	\$ 124.303	NA	NA	NA	\$ 124.303
OPEX generación con carbón	OPEX Fijo y OPEX variable de la generación con carbón 300MWh	5 años por la fase de duración de la instalación, puesta en funcionamiento y desmonte de la planta térmica	OPEX Fijo USD\$50.500USD/MWpAño OPEX Variable USD\$1,26USD/MWh	Catálogo tecnológico, precios de referencia XM, UPME	\$ 17.097.960	NA	NA	NA	\$ 17.097.960
CAPEX proyecto solar	CAPEX Proyecto solar para 50MWh	1 año por la fase de instalación	Inversión específica, sistema total, per DC (MUSD/MWp) 0,67MUSD/MWh	Catálogo tecnológico	\$ 33.500.000	NA	NA	NA	\$ 33.500.000
OPEX proyecto solar	OPEX Proyecto solar 50MWh	20 años, que es el tiempo estimado de duración del proyecto	O&M fijas 6850 (USD/MWe/año)	Catálogo tecnológico	\$ 342.500	NA	NA	NA	\$ 342.500

UNIVERSIDAD EAFIT

VALOR TOTAL BENEFICIOS	\$ 87.463.721
VALOR TOTAL DE LOS INSUMOS (Sumatoria del valor de los insumos)	\$ 34.563.750
SROI	2,53

ANÁLISIS DE RESULTADOS: El análisis SROI proyectado muestra un retorno de la inversión de 2,53:1. Por cada peso invertido en el proyecto de generación solar fotovoltaica, se generan 2,53 pesos en beneficios sociales, ambientales y económicos para los stakeholders, en comparación con la generación a carbón. Más allá del resultado financiero, el proyecto solar genera más del doble de valor social por cada peso invertido.

Fuente: Elaboración Propia



11 CONSIDERACIONES ÉTICAS

DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En este trabajo de grado se empleó la Inteligencia artificial, específicamente Connected papers, Chat GPT (OpenAI, 2025) y Copilot, para revisión documental y edición de texto, proporcionando sugerencias de mejora gramatical, generando mayor claridad y fluidez de los contenidos. Garantizamos que el uso de la IA se realizó de manera responsable, siempre respetando la autoría intelectual. Las decisiones analíticas, conceptuales y redacciones finales son exclusiva autoría de las investigadoras.



CONSENTIMIENTO INFORMADO

Para el proceso de recolección de información, el consentimiento informado se obtuvo de dos maneras: las entrevistas se realizaron de manera virtual y se brindó una explicación oral sobre el propósito del estudio, el uso académico de la información, la confidencialidad y la voluntariedad de la participación, tras lo cual cada entrevistado brindó su consentimiento verbal. En las encuestas, el consentimiento informado se presentó en forma escrita al inicio del formulario digital, permitiendo que solo quienes aceptaron este texto continuaran con el diligenciamiento.



12 BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES Y DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Tania Cecilia López Ayala nació en Sogamoso, Colombia en 1977. Contador Público de la UPTC, Boyacá, Colombia (1999). Con especializaciones en Régimen Jurídico, financiero y contable de impuestos de la Universidad de los Andes (2003), y Contabilidad Financiera Internacional, de la Pontificia Universidad Javeriana en el año 2011. Cuenta con más de 20 años de experiencia en el sector público y privado, con énfasis en NIIF/IFRS, auditoría y sostenibilidad. Ha asesorado entidades como la Superintendencia de Servicios Públicos, la Comisión de Regulación de Energía y Gas, y múltiples empresas en Colombia, Chile y Europa. Única mujer latinoamericana miembro del ITCG equipo consultivo de taxonomías del organismo emisor de normas IFRS (2020–2023). Miembro del Comité de Expertos en Sostenibilidad del Concejo Técnico de la Contaduría Pública. Es especialista en reportes XBRL, análisis financiero y normativas internacionales. Ha liderado más de 100 capacitaciones y es reconocida por su enfoque en sostenibilidad, innovación y desarrollo económico con sentido social.

E-mail: tania_lopez_nif_xbrl@gmail.com www.linkedin.com/in/tania_lopez_ayala

Cindy Lorena Cárdenas Mejía, nacida en Bogotá, Colombia en 1987. Ingeniera Ambiental con estudios en Sostenibilidad y experiencia de más de 10 años en gestión ambiental pública y privada. Su trayectoria profesional abarca sectores como hidrocarburos, salud, manufactura y tecnología ambiental, donde ha liderado procesos técnicos y administrativos relacionados con gestión ambiental, normatividad ISO 14001, educación ambiental y sostenibilidad corporativa.



E-mail: lorenacardenasme@gmail.com LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/lorena-c-47676453/>

Dady Giselle Mancilla Gutiérrez, nació en Santa Marta, Colombia en 1996. Ingeniera Industrial con experiencia en el sector minero energético, desempeñando funciones relacionadas con los diferentes sistemas de gestión (calidad, ambiental SST, basura cero), gobierno corporativo, informes y estrategia de sostenibilidad y gestión de riesgos. Lo anterior, bajo el análisis, control, seguimiento y evaluación de los procesos aplicando estándares internacionales como ISO, GHG Protocol, Marco TCFD-TNFD, SASB o Global Reporting Initiative (GRI).

E-mail: dady9603@hotmail.com LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/dady-mancilla/>

Santiago Ortega, Ingeniero Civil y Magíster en Ingeniería de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia y Fellow en Global Journalism de la Munk School of Global Affairs de la Universidad de Toronto. Tiene amplia experiencia en investigación aplicada en cambio climático, energía renovable y transición energética con la Universidad Nacional y la Universidad EIA. Fue fundador del Grupo EnergEIA, la estrategia de energía renovable de la Universidad EIA que se enfoca en estudiar el rol de los prosumidores de energía en el sector eléctrico, y en identificar oportunidades de negocio que permitan la transición energética. Es uno de los socios fundadores y actualmente es el Director de Innovación en Emergente Energía Sostenible.



13 AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS.

Agradecemos profundamente a la Universidad EAFIT por las herramientas brindadas y a nuestro director, Santiago Ortega, por su guía y compromiso. A Dios, por fortalecernos y acompañar cada decisión, y a nuestras familias, por su motivación incondicional. Así mismo, extendemos nuestra gratitud a los expertos temáticos, en especial a María Alejandra González, cuya pasión por la sostenibilidad inspiró este proceso. Finalmente, gracias a todas las personas que participaron en encuestas y entrevistas, cuyos aportes enriquecieron de manera invaluable esta investigación.

14 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Minería (ANM) & Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2024, septiembre). *Boletín Minería en Cifras: septiembre de 2024* [Boletín estadístico].

<https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/docupromocion/Bolet%C3%ADn%20Miner%C3%ADa%20en%20Cifras%20-%20septiembre%202024.pdf>

Alegre-Bravo, A., Stedman, R. C. & Anderson, C. L. (2025). Rethinking the role of indicators for electricity access in Latin America: Towards energy justice. *Applied Energy*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124877>

Ángel-Sanint, E., García-Orrego, S. & Ortega, S. (2023). Refining wind and solar potential maps through spatial multicriteria assessment. Case study: Colombia. *Energy for Sustainable Development*, 73, 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.019>

Carvajal-Romo, G., Valderrama-Mendoza, M., Rodríguez-Urrego, D. & Rodríguez-Urrego, L. (2019). Assessment of solar and wind energy potential in La Guajira, Colombia: Current status, and future prospects. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, Article 100531.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100531>



Clarke, R. (2013). The Fiddler's Ferry power station: A post-war story of Britain's electricity supply. Recuperado de <https://www.powerstations.uk/fiddlers-ferry-power-station-cheshire/>

Colitt, R. (31 de enero de 2022). Germany's coal region is showing how to build a green economy. *Strategy+Business*. <https://www.strategy-business.com/blog/Germanys-coal-region-is-showing-how-to-build-a-green-economy>

Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. *Diario Oficial*, No. 49.129.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Corporación autónoma regional del Alto Magdalena (CAM). (2021). Informe sobre el impacto del carbón en las emisiones de CO2 y los desafíos para la sostenibilidad en Colombia. <https://www.cam.gov.co>

Departamento Nacional de Planeación. (2022). Política de transición energética (Documento CONPES No. 4075). Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES, República de Colombia.



Esri UK. (2023). Fiddler's Ferry: History and redevelopment. ArcGIS StoryMaps.

Recuperado de

<https://storymaps.arcgis.com/stories/b2b1d772cd9b46099f2f0d767e972e2d>

Fiddler's Ferry Power Station. (2019). In Global Energy Monitor Wiki.

Recuperado de https://www.gem.wiki/Fiddler%27s_Ferry_power_station

Gabbatiss, J. (17 de Febrero de 2025). CarbonBrief.

<https://interactive.carbonbrief.org/the-carbon-brief-profile-germany/index.html>

GECELCA. (2024). Informe de gestión 2023. Recuperado de

<https://www.gecelca.com.co>

GENSA S.A. E.S.P. (2023). Portafolio de generación. Recuperado de

<https://www.gensa.com.co>

Gerwin, W. R. (2023). Perspectivas de los paisajes postminería de lignito en condiciones ambientales cambiantes: ¿qué podemos aprender de una comparación entre las regiones renana y lusaciana en Alemania. *Ciencias ambientales de Europa*, 35.

Global Energy Monitor. (2024). Wiki de centrales eléctricas – Colombia.

Recuperado de <https://www.gem.wiki>



GOV.UK (UK Emissions Trading Scheme markets)

Department for Energy Security and Net Zero. (2024). UK Emissions Trading Scheme markets. GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/publications/uk-emissions-trading-scheme-markets/uk-emissions-trading-scheme-markets>

Guerrero-Martin LE, Guerrero-Martin CA, Camacho-Galindo LS (2024).

Evaluación de impactos ambientales de la instalación, funcionamiento y desmantelamiento de un parque fotovoltaico en la Guajira colombiana. *Iberoamerican Journal of Development Studies* 13(2):226-253. DOI: 10.26754/ojs_ried/ijds.10716

Guevara Patiño, R., (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Revista Folios*, (44), 165-179.

Haldimand Press. (2019). \$100M solar project completed on budget and on schedule in Nanticoke. <https://haldimandpress.com/100m-solar-project-completed-on-budget-and-on-schedule-in-nanticoke/>

Heather P, T. S. (21 de 05 de 2025). La reunificación de Alemania. Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/place/Germany/Ostpolitik-and-reconciliation-1969-89>



House of Commons Library (Contracts for Difference Scheme)

Watson, N., & Bolton, P. (2024). *Contracts for Difference scheme* (House of Commons Library Research Briefing No. CBP-9871). UK Parliament.

<https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-9871/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Sixth Assessment Report: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023.

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

International Renewable Energy Agency IRENA. (2022). World Energy Transitions Outlook 2022. Recuperado de <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>

Jensen, G. E. (3 de enero de 2024). *Fit for 55 Package – EU Climate Action Plan*. https://vuphong.vn/wp-content/uploads/2023/09/Fit-for-55_EN.pdf

Lausitz Invest. (enero de 2018). Lusatia: A booming economic region with a bright future. https://www.lausitz-invest.de/sites/default/files/2020-05/Lusatia_A_Booming_Economic_Region_with_a_Bright_Future.pdf



Mahmud, M. A. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2018). Environmental impacts of solar photovoltaic and solar thermal systems with life cycle assessment. *Energies*, 11(9), 2346. <https://doi.org/10.3390/en11092346>

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014 - Promoción de las Energías No Convencionales y la Gestión Eficiente de la Energía. <https://www.minminas.gov.co>

Ministerio de Minas y Energía. (2024). Escenarios de Transición Energética Justa 2024. <https://www.minenergia.gov.co/documents/12383/Escenarios-TEJ-2024.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (2025, 5 de diciembre). Gobierno nacional anuncia la creación de Gecelca Solar, el nuevo motor de la transición energética que transformará la Costa Caribe [Press release]. <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/gobierno-nacional-anuncia-la-creacion-de-gecelca-solar-el-nuevo-motor-de-la-transicion-energetica-que-transformara-la-costa-caribe/>

Ontario Power Generation. (2019). Nanticoke solar now generating renewable power for Ontario. <https://www.opg.com/stories/nanticoke-solar-now-generating-renewable-power-for-ontario/>



OpenAI. (2025). *ChatGPT* (versión GPT-4) [Large language model].

<https://chat.openai.com/>

Pardavila, V. C. (2022). Dos países en uno: las divergencias entre Alemania del Este y Alemania del Oeste, 30 años después de la reunificación. Obtenido de repositorio.comillas.edu:

<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/56975/TFG%20Conde%20Pardavila%2C%20Vicente.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2018-2022 (Ley 1955 de 2019). La Ley de Crecimiento (2020) y la Ley de Transición Energética (2021). Una de las medidas más relevantes, contenidas en el PND 2018-2022, quedó reglamentada por el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) en las Resoluciones 40715 de septiembre de 2019 y 40060 de marzo del 2021.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2023). ¿Qué es la transición hacia una energía sostenible y por qué es clave para combatir el cambio climático? Climate Promise. <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-es-la-transicion-hacia-una-energia-sostenible-y-por-que-es-clave-para-combatir>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2021). La oportunidad de negocio de la generación solar distribuida en Colombia: Mecanismos de



financiamiento para la banca comercial. Generación SOLE. <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2021/11/Generacio%CC%81n-Sole-Financiamiento-GDS-Col.pdf>

Quiroga Riviere, M. L. (2009). Alemania siglo XXI: un balance. *Oasis*, núm. 14, 125-143.

Rodríguez Murcia, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de Ingeniería*, (28), 83–89. Universidad de los Andes. <https://repository.umng.edu.co/bitstreams/88b48692-ca51-44bf-bc7c-a1aa3dec91ff/download>

Ruiz Clavijo, L. J. (2025, 5 de diciembre). Gecelca Solar es la nueva línea de generación de energía renovable a la que le apuesta el Gobierno. *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/energia/gecelca-solar-es-la-nueva-linea-de-generacion-de-energia-renovable-a-la-que-le-apuesta-el-gobierno-484249>

SSE Renewables. (2024). Fiddler's Ferry Battery Energy Storage System (BESS). Recuperado de <https://www.sserenewables.com/solar-and-battery/battery-storage/fiddlers-ferry/>

Stantec. (2023). Nanticoke Solar Farm. <https://www.stantec.com/en/projects/canada-projects/n/nanticoke-solar-farm>



Termotasajero S.A. E.S.P. (2023). Información corporativa. Recuperado de <https://www.termotasajero.com.co>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2020). Plan Energético Nacional 2020–2050: Explorando nuevas rutas. Ministerio de Minas y Energía. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (2021). Atlas energético de Colombia. https://www1.upme.gov.co/SiteAssets/Paginas/Atlas-Energetico-de-Colombia/Atlas_Energetico_Colombia_2021.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (2024). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2024–2028 (pp. 28–29). Ministerio de Minas y Energía. <https://www.upme.gov.co>

Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME. (2024). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2024–2028. Ministerio de Minas y Energía. <https://www1.upme.gov.co>

Unidad de Planeación Minero-energética (UPME). (2023). Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2023-2037. <https://www.upme.gov.co>



UPME. (s. f.). *Plan 6GW Plus*. <https://www.upme.gov.co/simec/plan-6gw/>

Wagner, M.M. (28 de 08 de 2024). El éxito económico de Alemania del este deja fríos a los votantes. <https://www.reuters.com/world/europe/eastern-germanys-economic-success-leaves-voters-cold-2024-08-28/>

Warrington Borough Council. (2024). Fiddler's Ferry Development Framework. Recuperado de <https://www.warrington.gov.uk/fiddlers-ferry-development-framework>

Wikipedia. (2023a). Nanticoke, Ontario. https://en.wikipedia.org/wiki/Nanticoke,_Ontario

Wikipedia. (2023b). Nanticoke Generating Station. https://en.wikipedia.org/wiki/Nanticoke_Generating_Station

XM. (2025). Datos operativos del Sistema Interconectado Nacional. Recuperado de <https://www.xm.com.co>

XM. (2025, 15 de enero). En el cuarto trimestre, 37 proyectos de transmisión y 67 de generación ingresaron para fortalecer el Sistema Interconectado Nacional. *Portal XM*. <https://www.xm.com.co/noticias/7491-en-el->



[cuarto-trimestre-37-proyectos-de-transmision-y-67-de-generacion-ingresaron-
para](#)

XM. (2025, 28 de octubre). *En el tercer trimestre del 2025, 5 proyectos de transmisión y 18 de generación entraron para fortalecer el Sistema Interconectado Nacional.* Portal XM. <https://www.xm.com.co/noticias/8337-en-el-tercer-trimestre-del-2025-5-proyectos-de-transmision-y-18-de-generacion>