

Toma de decisión para la implementación de paneles solares en una empresa del sector industrial
en Santander

Andrés Julián Castro Rangel

Trabajo de Grado para Optar el Título en maestría en Gerencia de Negocios - MBA

Director

Carlos Enrique Vecino Arenas

Doctor en administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Maestría en Gerencia de Negocios - MBA

Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos	11
2. Marco Referencial.....	12
2.1 Marco normativo en la implementación de sistemas solares en la industria colombiana	13
2.2 Potencial solar en el contexto industrial del departamento de Santander.....	18
2.3 Criterios técnicos de evaluación en la implementación de sistemas solares	19
2.4 Juicios económicos y financieros para la evaluación de proyectos solares industriales.....	20
2.5 Características para la evaluación multicriterio	24
2.6 Evaluación integrada de la factibilidad del proyecto.....	26
2.7 Diferenciación conceptual entre parámetros estructurales y criterios decisorios	27
2.8 Definición de umbrales financieros	30
3. Método	35
3.1 Diseño y aplicación de la matriz de evaluación multicriterio.....	38
3.2 Ponderación de criterios de la matriz.....	39
3.3 Normalización de criterios y evaluación objetiva de las alternativas	41
3.4 Estructura de la matriz de evaluación multicriterio	45
4. Resultados	49
4.1 Consolidación de datos técnicos y financieros de las propuestas evaluadas	50

4.2 Modelación financiera homogénea de las propuestas.....	51
4.3 Normalización de los criterios financieros para la matriz de evaluación	56
4.4 Aplicación de la matriz de evaluación multicriterio	58
4.5 Estimación del Costo Nivelado de la Energía (LCOE) mediante el modelo UPME.....	61
5. Discusión.....	68
6. Conclusiones	74
Referencias Bibliográficas	76

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Síntesis del impacto normativo en la viabilidad de sistemas solares industriales en Colombia.....	16
Tabla 2. Síntesis de parámetros para la matriz de evaluación multicriterio	25
Tabla 3. Diferenciación entre parámetros estructurales y criterios decisorios	30
Tabla 4. Matriz base de evaluación multicriterio (WSM)	47
Tabla 5. Criterios de la matriz multicriterio según su categorización	48
Tabla 6. Consolidación de datos base de las propuestas.....	50
Tabla 7. Variables utilizadas en la modelación financiera del proyecto.....	52
Tabla 8. Variables y cálculo del flujo de caja anual del proyecto fotovoltaico	53
Tabla 9. Resultados de los indicadores financieros del proyecto	55
Tabla 10. Resultados obtenidos de la normalización de los indicadores financieros del proyecto	58
Tabla 11. Matriz de evaluación multicriterio para la selección del sistema solar fotovoltaico (WSM)	60
Tabla 12 Variables de entrada para el cálculo del LCOE en el simulador UPME	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Procedimiento metodológico para la evaluación multicriterio de la implementación de sistemas fotovoltaicos	37
Figura 2. Estructura conceptual de la matriz de evaluación multicriterio utilizada para comparar las alternativas de implementación del sistema solar fotovoltaico	38
Figura 3. Simulación del Costo Nivelado de Energía (LCOE) mediante el modelo flexibe de la UPME (2025).....	65

Lista de Apéndices

Ver documentos adjuntos y pueden ser visualizados en la Base de Datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Información financiera y energética de Carlixplast S.A.S.

Apéndice B. Cálculo del Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC)

Apéndice C. Propuestas técnicas y económicas de los proveedores

Resumen

Título: Toma de decisión para la implementación de paneles solares en una empresa del sector industrial en Santander*

Autor: Andrés Julián Castro Rangel**

Palabras Clave: Energía solar fotovoltaica, viabilidad financiera, LCOE, eficiencia energética, sostenibilidad empresarial, WSM.

Descripción:

El presente estudio evalúa la viabilidad técnica, económica y normativa de implementar un sistema solar fotovoltaico en una empresa del sector industrial ubicada en el departamento de Santander, Colombia. La investigación surge a partir de la necesidad de identificar alternativas energéticas sostenibles que permitan reducir costos operativos, mejorar la eficiencia energética y fortalecer la competitividad empresarial frente al incremento progresivo de las tarifas de energía eléctrica.

Para el desarrollo del análisis, se construyó una matriz de evaluación multicriterio basada en el Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model – WSM), la cual permitió comparar tres alternativas de inversión considerando variables financieras, técnicas y de rentabilidad. Asimismo, se desarrolló un modelo unificado de evaluación con el propósito de garantizar la comparabilidad entre las propuestas analizadas y facilitar la toma de decisiones.

Adicionalmente, se incorporó el cálculo del Costo Nivelado de la Energía (LCOE) utilizando la metodología propuesta por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), con el fin de validar la competitividad del sistema fotovoltaico frente al costo de la energía suministrada por la red convencional.

Los resultados obtenidos evidencian que la alternativa seleccionada presenta indicadores financieros favorables y un potencial significativo de ahorro energético. En conclusión, la implementación del sistema fotovoltaico resulta financieramente viable y constituye una estrategia eficiente para promover sostenibilidad, optimización de costos y crecimiento empresarial a largo plazo.

* Trabajo de Grado

** Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Estudios Industriales y Empresariales Maestría en Gerencia de Negocios - MBA Director Carlos Enrique Vecino Arenas Doctor en administración

Abstract

Title: Decision-making for the implementation of solar panels in an industrial company in Santander*

Author: Andrés Julián Castro Rangel**

Key Words: Photovoltaic solar energy, financial feasibility, LCOE, energy efficiency, business sustainability, WSM.

Description:

This study evaluates the technical, economic, and regulatory feasibility of implementing a photovoltaic solar energy system in an industrial sector company located in Santander, Colombia. The research arises from the need to identify sustainable energy alternatives that reduce operating costs, improve energy efficiency, and strengthen business competitiveness in response to the continuous increase in electricity prices.

For the development of the analysis, a multicriteria evaluation matrix based on the Weighted Sum Model (WSM) was designed to compare three investment alternatives considering financial, technical, and profitability variables. Additionally, a unified evaluation model was developed to ensure comparability among the analyzed proposals and support the decision-making process.

Furthermore, the Levelized Cost of Energy (LCOE) was calculated using the methodology proposed by the Colombian Mining and Energy Planning Unit (UPME) to validate the competitiveness of the photovoltaic system compared to the cost of conventional grid energy.

The results show that the selected alternative presents favorable financial indicators and significant potential for energy cost savings. In conclusion, the implementation of the photovoltaic system is financially feasible and represents an effective strategy to promote sustainability, cost optimization, and long-term business growth.

* Trabajo de Grado

** Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Estudios Industriales y Empresariales Maestría en Gerencia de Negocios - MBA Director Carlos Enrique Vecino Arenas Doctor en administración

Introducción

En el contexto actual de transición energética, las empresas del sector industrial enfrentan el reto de reducir sus costos operativos en un entorno caracterizado por la volatilidad del sistema eléctrico. En Colombia, esta situación se intensifica por la alta dependencia de la generación hidroeléctrica, lo que expone a las organizaciones a variaciones tarifarias asociadas a fenómenos climáticos (UPME, 2025). En este escenario, la autogeneración mediante sistemas solares fotovoltaicos surge como una alternativa estratégica; sin embargo, su adopción se ve limitada por la ausencia de metodologías estructuradas que permitan evaluar integralmente su viabilidad.

A nivel global, la disminución en los costos de la energía solar ha fortalecido su competitividad frente a fuentes convencionales (IRENA, 2021). No obstante, la toma de decisión en el sector empresarial sigue siendo compleja, debido a la necesidad de analizar simultáneamente variables técnicas, económicas y normativas. La literatura reconoce que este tipo de decisiones requiere enfoques integrados que permitan comparar alternativas bajo criterios homogéneos (International Energy Agency, 2020; Hwang & Yoon, 1981).

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo establecer y aplicar criterios de decisión que permitan evaluar de manera integral la viabilidad de implementar un sistema solar fotovoltaico en una empresa del sector industrial en Santander?

El propósito de esta investigación es establecer y estimar criterios de decisión para la implementación de paneles solares en una empresa del sector industrial en Santander, a partir del análisis económico, técnico y normativo, utilizando como caso de estudio a Carlixplast S.A.S. Para

ello, se adopta un enfoque basado en métodos de decisión multicriterio, específicamente el Modelo de Suma Ponderada (WSM), que permite integrar variables heterogéneas en un esquema de evaluación cuantitativo (Triantaphyllou, 2000).

La relevancia del estudio radica en que proporciona una alternativa estructurada para la toma de decisiones en proyectos de autogeneración energética, contribuyendo a la reducción de la incertidumbre en la evaluación de inversiones y al fortalecimiento de la competitividad empresarial. Asimismo, aporta a la sostenibilidad ambiental mediante la promoción del uso de energías renovables (IRENA, 2021).

Finalmente, la investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, de tipo no experimental, descriptivo y analítico (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018), permitiendo caracterizar el contexto energético y transformar dicha información en criterios comparables que sustenten la toma de decisiones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Establecer y estimar criterios de decisión para la implementación de paneles solares en una empresa del sector industrial en Santander, a partir del análisis económico, técnico y normativo.

1.2 Objetivos específicos

Revisar la literatura para identificar la normatividad relevante, así como los criterios pertinentes para evaluar la implementación de paneles solares en el sector industrial del departamento de Santander.

Analizar las condiciones energéticas, técnicas y económicas de una empresa del sector industrial en Santander, con el fin de definir la factibilidad para la implementación de paneles solares.

Estimar los parámetros requeridos para la aplicación de los criterios decisorios pertinentes para evaluar la factibilidad de la implementación de paneles solares en la empresa de estudio.

Formular directrices para la implementación de paneles solares en la empresa aplicada.

2. Marco Referencial

Frente a la creciente necesidad de reducir el impacto ambiental directamente en las emisiones de la huella de carbono y garantizar la seguridad energética, la transición a energías renovables se ha convertido en la respuesta global a largo plazo.

Siendo así, la tendencia de crecimiento de los proyectos en tecnología solar fotovoltaica se hace más frecuente gracias a la disminución continua en los costos de instalación sin contar los avances tecnológicos que buscan mejoras importantes en la eficiencia; hecho que según la Agencia Internacional de Energías Renovables, defiende al reportar que el costo nivelado de la electricidad (LCOE) solar fotovoltaica disminuyó más del 80% entre 2010 y 2020, haciendo de esta tecnología una de las más competitivas frente a las fuentes convencionales de combustibles fósiles (IRENA, 2021). Por lo tanto, la implementación de sistemas solares industriales se ha convertido en una estrategia primaria que busca fortalecer la eficiencia energética de los sectores productivos, no solo por lograr los compromisos de sostenibilidad empresarial, sino porque esta alternativa energética viene acompañada de incentivos fiscales, políticas públicas y metas de descarbonización apoyadas por gobiernos y empresas a escala mundial.

Dichas políticas públicas en Colombia son respaldadas por la Unidad de Planeación Minero-Energética, la cual en 2025 hizo indiscutible en sus informes anuales la relevancia que ha tomado la transición energética, ya que los sectores productivos en su mayoría tienen una alta dependencia de la generación hidroeléctrica, representada en cerca del 68% de la producción nacional (UPME, 2025). Dependencia que termina traducéndose en la exposición del sistema eléctrico a fenómenos climáticos como “El niño”, que afecta generando aumentos en los precios

del servicio, variaciones en la oferta energética y pérdida de la estabilidad del sistema (Milkes S., 2025).

Como consecuencia, la literatura reconoce que la energía solar constituye una alternativa estratégica para sectores industriales con consumo eléctrico elevado por su capacidad para disminuir costos y fortalecer la competitividad (BUN-CA, 2002). Por ello, la disponibilidad del recurso solar en gran parte del territorio nacional y la existencia de incentivos regulatorios hacen que la adopción de sistemas solares por autogeneración industrial no solo sea técnicamente viable, sino financieramente atractiva (SEAS, 2011).

Siendo así, el contexto global y nacional hace énfasis en la importancia de contar con un marco normativo, técnico y económico claro que permita evaluar la factibilidad de implementar proyectos solares en el sector industrial de Santander, lo cual constituye el propósito central del presente capítulo.

2.1 Marco normativo en la implementación de sistemas solares en la industria colombiana

Los proyectos solares fotovoltaicos en Colombia se desarrollan en un panorama con un marco normativo que articula incentivos fiscales, requisitos técnicos y procedimientos de conexión a la red, lo cual influye directamente en la viabilidad financiera y operativa de cualquier iniciativa de autogeneración. Para el sector industrial, la regulación no solo define los beneficios económicos disponibles, sino también los límites de potencia, los tiempos de trámite, la complejidad del proceso de conexión y el nivel de riesgo regulatorio asociado.

Por lo tanto, la revisión de este marco regulatorio es fundamental para establecer criterios de decisión sólidos que permitan evaluar la pertinencia de un sistema fotovoltaico en empresas industriales de Santander.

El eje central del modelo normativo colombiano es la Ley 1715 de 2014, que integra las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) al sistema energético nacional, esta ley no se limita a un marco declarativo, por el contrario tiene un impacto directo en la estructura financiera de los proyectos solares gracias a sus incentivos tributarios, los cuales reducen de manera significativa el costo inicial de la inversión (Congreso de la República de Colombia, 2014). La deducción del 50% del valor del proyecto en el impuesto de renta, la exclusión del IVA, la exención de aranceles y la depreciación acelerada en un periodo mínimo de cinco años actúan conjuntamente para disminuir el CAPEX (Capital Expenditure) efectivo, mejorar el valor presente neto (VPN) y aumentar la Tasa Interna de Retorno (TIR) (Congreso de la República de Colombia, 2014).

Diversos análisis de la Unidad de Planeación Minero-Energética en 2022, han demostrado que estos incentivos pueden mejorar la rentabilidad entre un 25% y 40%, acortando el período estimado de recuperación de la inversión entre uno y dos años (UPME,2022). Por lo tanto, la Ley 1715 constituye un criterio económico decisivo que debe incluirse en cualquier evaluación comparativa de alternativas.

Complementariamente, el Decreto 2143 de 2015 reglamenta el acceso a dichos beneficios, estableciendo requisitos técnicos, ambientales y documentales para la certificación ante la UPME (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2015).

Aunque este decreto no altera directamente la rentabilidad intrínseca del sistema, sí introduce consideraciones operativas relevantes al incidir en los tiempos de trámite y el riesgo de

retrasos o devoluciones documentales, los cuales pueden afectar el cronograma financiero del proyecto (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Desde la perspectiva técnica, el proyecto de Resolución 0281 de 2016 define como sistemas de Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE) aquellos proyectos que tiene como límite máximo de potencia 1Mw (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016). Consideración importante, ya que los proyectos clasificados como AGPE pueden beneficiarse de procedimientos de conexión simplificados, menos exigencias en los estudios eléctricos y reducir sus tiempos frente a los proyectos de mayor escala.

Para empresas industriales, como la analizada en este estudio "Carlixplast", cuyo sistema proyectado es de 241 kWp, se consideraría como un sistema AGPE, lo que representa una ventaja normativa, al poder disminuir los costos indirectos de las adecuaciones eléctricas así como la incertidumbre en los tiempos de conexión al sistema.

En línea con lo anterior, la Resolución 01-070 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) de 2020 amplía las capacidades de los usuarios no regulados al permitirles financiar, instalar y operar sus propios activos de conexión. Este cambio disminuye la dependencia del operador de red y reduce uno de los mayores riesgos históricos del sector como la demora excesiva en la conexión, mejorando la predictibilidad del inicio de los flujos de ahorro energético (CREG, 2020).

Finalmente, los Proyectos de Resolución CREG 701-091 y 701-092 de 2025 proponen un nuevo escenario regulatorio al introducir la figura de la autogeneración remota y del productor marginal remoto, tanto en zonas interconectadas como no interconectadas (CREG,2025).

Aunque estas resoluciones permanecen en etapa de consulta pública, su relevancia para este estudio radica en el potencial de flexibilización del uso del recurso solar, ya que permiten al usuario industrial generar energía fuera de su predio y consumirla mediante un esquema regulado.

A pesar de que este mecanismo no aplica de manera inmediata para Carlixplast, cuyo proyecto es on-site; sí representa un elemento clave del análisis prospectivo del sector, al reflejar el escenario real de las posibilidades en proyectos industriales que tengan limitaciones como por ejemplo el espacio físico.

En síntesis, el marco normativo colombiano establece un conjunto de beneficios fiscales, requisitos técnicos y condiciones operativas que impactan directamente el diseño, los costos y la rentabilidad de un proyecto de autogeneración solar. De este análisis se derivan aspectos esenciales para la toma de decisiones como lo son el aprovechamiento de incentivos, la facilidad regulatoria, la compatibilidad técnica con la categoría AGPE, la viabilidad de conexión y la flexibilidad normativa futura.

Tabla 1.

Síntesis del impacto normativo en la viabilidad de sistemas solares industriales en Colombia

Norma	Elemento regulatorio	Contenido clave	Impacto financiero/operativo para Carlixplast	Fuente normativa
Ley 1715 de 2014 (mod. Ley 2099 de 2021)	Incentivos tributarios FNCER	Deducción renta, exclusión IVA, exención arancel, depreciación acelerada	Reduce CAPEX neto y mejora indicadores financieros	Ley 1715/2014, arts. 11–14; Ley 2099/2021
Decreto 2143 de 2015	Acceso a beneficios	Requisitos y trámite para certificación UPME	Riesgo por tiempos y devoluciones documentales	Decreto 2143/2015

Norma	Elemento regulatorio	Contenido clave	Impacto financiero/operativo para Carlixplast	Fuente normativa
Resolución UPME 0281 de 2016	AGPE ≤ 1 MW	Clasificación y simplificación de conexión	241 kWp clasifica como AGPE	UPME, 2016
Resolución CREG 01-070 de 2020	Activos de conexión	Usuario puede financiar/ejecutar obras	Reduce incertidumbre del cronograma de conexión	CREG, 2020
Proy. Res. CREG 701-091 y 701-092 (2025)	Autogeneración remota	Introduce figura remota	Flexibilidad normativa futura (prospectivo)	CREG, 2025 (consulta pública)

Nota: La aplicación efectiva de incentivos se encuentra condicionada a la certificación y cumplimiento del procedimiento ante la autoridad competente. Elaborada con base en normativa referenciada.

La síntesis normativa presentada logra identificar que el marco regulatorio colombiano no solo establece beneficios tributarios directos que mejoran los indicadores financieros del proyecto, sino también condiciones operativas que inciden en la certidumbre temporal, el riesgo regulatorio y la facilidad de conexión. En el caso específico de Carlixplast, la clasificación como AGPE y la posibilidad de gestionar directamente los activos de conexión reducen significativamente la incertidumbre operativa, mientras que los incentivos fiscales impactan de manera directa la rentabilidad del proyecto.

2.2 Potencial solar en el contexto industrial del departamento de Santander

Según la Unidad de Planeación Minero-Energética, el departamento de Santander posee uno de los niveles de radiación solar más altos y estables del país, lo que convierte a la región en un territorio con ventajas naturales para la implementación de sistemas fotovoltaicos en el sector industrial, siendo la radiación promedio en municipios como Bucaramanga, Girón, Floridablanca y Piedecuesta entre 4,5 y 5,5 kWh/m²/día, superando el umbral mínimo necesario para garantizar un rendimiento óptimo de los sistemas solares industriales (UPME, 2023).

Desde un punto de vista técnico, estos valores permiten estimar un factor de planta competitivo, entendido como la relación entre la energía efectivamente generada y la capacidad instalada del sistema, cuyo indicador compara la producción real de energía con la producción máxima teórica que podría alcanzarse si la instalación operara continuamente a plena capacidad (U.S. Energy Information Administration, 2024). Esta condición se traduce en una producción energética relativamente constante a lo largo del año, lo que disminuye la incertidumbre asociada a la generación y reduce la variabilidad de los flujos de ahorro proyectados, fortaleciendo así la previsibilidad financiera del proyecto (IRENA, 2021).

Este potencial solar adquiere especial importancia en el contexto energético del departamento, caracterizado por un crecimiento industrial sostenido, una mayor demanda y una infraestructura eléctrica sometida a presiones operativas.

Por lo tanto, Santander es considerado un lugar estratégico al concentrar diversos parques industriales y zonas fabriles en Girón, Barrancabermeja y Bucaramanga, donde operan empresas con altos consumos eléctricos y perfiles de demanda predominantemente diurnos (Prosantander, 2025). Este tipo de operación con procesos continuos durante las horas de mayor radiación

representa un escenario óptimo para la autogeneración fotovoltaica, puesto que maximiza el autoconsumo directo y reduce la necesidad de vertimientos o almacenamiento (Prosantander, 2025).

No obstante, la adopción de sistemas fotovoltaicos industriales puede verse limitada por barreras como desconocimiento técnico-financiero, percepción de altos costos iniciales y falta de articulación efectiva entre incentivos y capacidades locales, lo cual justifica la necesidad de metodologías estructuradas para evaluar comparativamente alternativas de inversión (CCB, 2023).

En este contexto, Carlixplast S.A.S., ubicada en Girón, posee características que la literatura identifica como favorables para la autogeneración industrial: consumo eléctrico elevado y relativamente estable, operación diurna, disponibilidad de áreas útiles y exposición a incrementos tarifarios.

Por todo lo anterior, Carlixplast se encuentra en una posición técnica y estratégica particularmente favorable, en especial por su ubicación, estructura industrial regional y sus características operativas; convirtiéndola en un candidata ideal a los beneficios de la implementación de un sistema fotovoltaico.

2.3 Criterios técnicos de evaluación en la implementación de sistemas solares

La evaluación técnica de un sistema fotovoltaico industrial se debe considerar como una fase de gran importancia al ser la etapa que permite determinar la viabilidad operativa y el desempeño a lo largo de la vida útil del proyecto (IRENA, 2023). La literatura reconoce que variaciones de diseño pueden traducirse en diferencias relevantes de producción energética y, por tanto, en los ahorros económicos proyectados (NREL, 2023).

Siendo la evaluación técnica la fase más importante para considerar la viabilidad de un proyecto fotovoltaico, los factores técnicos de dichas evaluaciones se enfocan en la radiación efectiva, el desempeño esperado, la disponibilidad y la condición estructural del sitio, así como la compatibilidad eléctrica con la infraestructura existente (IEA, 2024).

2.4 Juicios económicos y financieros para la evaluación de proyectos solares industriales

En el caso de la industria manufacturera, donde los costos eléctricos representan un porcentaje significativo del gasto operativo, un proyecto solar puede convertirse en un activo estratégico capaz de estabilizar costos, reducir la exposición a la volatilidad tarifaria y mejorar indicadores financieros clave. Por ello, el análisis económico debe basarse en criterios cuantitativos rigurosos, diseñados para capturar tanto los beneficios directos del ahorro energético como los costos de inversión, operación y financiamiento (International Energy Agency, 2020).

El primer criterio fundamental es el Costo de Inversión (CAPEX), asociado a los gastos de adquisición e instalación del sistema. Gracias a ello, el CAPEX es un factor determinante al definir el punto de partida para todos los indicadores financieros asociados a la inversión; así mismo el impacto que puede tener los incentivos tributarios que propone la ley 1715 de 2014, incentivos que pueden reducir el costo efectivo en un 30% (López et al., 2020).

Un segundo criterio clave es el costo de operación y mantenimiento (OPEX), el cual comprende la limpieza periódica de los paneles, mantenimiento preventivo de inversores, monitoreo del sistema, seguros y eventuales reemplazos de componentes (National Renewable Energy Laboratory, 2018). Aunque suele representar entre el 1% y 2% anual del CAPEX, su correcta proyección es esencial para modelar flujos de caja realistas. En el largo plazo, un

mantenimiento insuficiente puede disminuir entre un 10% y 20% la eficiencia del sistema (Gómez & Cárcel-Carrasco, 2019), afectando directamente los ahorros proyectados.

El criterio financiero más determinante es el Valor Presente Neto (VPN), que permite valorar la inversión considerando los ahorros futuros en términos actuales. Para sistemas solares industriales, los ahorros provienen de la reducción del consumo de energía de la red, en algunos casos, de la remuneración de excedentes si el sistema vierte energía bajo esquemas regulatorios vigentes (Vitola Herrera, 2022). Un VPN positivo indica que el proyecto genera valor para la empresa; cuanto mayor sea más atractivo será el proyecto, comparado con otras alternativas de inversión. En industrias con consumo estable y tarifas ascendentes como Carlixplast, el VPN tiende a ser elevado debido a la previsibilidad de los flujos de ahorro.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) complementa al VPN al medir la rentabilidad porcentual del proyecto. En el contexto industrial colombiano, donde el costo promedio ponderado de capital (WACC) suele situarse entre el 12% y 18% dependiendo de la estructura financiera, una TIR superior a estos umbrales indica que el proyecto es financieramente viable y competitivo frente a otras inversiones productivas (Ministerio de Minas y Energía, 2026). Gracias a los incentivos tributarios, los proyectos solares industriales suelen alcanzar TIR entre el 18% y 35%, dependiendo del tamaño, la tecnología y la disponibilidad de irradiancia (Castaño-Gómez & García-Rendón, 2020).

El Payback o período de recuperación descontado, es un criterio financiero que puede ser relevante para aquellas empresas que su prioridad va de la mano con la liquidez y la gestión del riesgo. Este indicador incorpora el valor del dinero a lo largo del tiempo, ofreciendo una evaluación más precisa acerca de los años que se requieren para recuperar la inversión inicial y de igual manera los ahorros generados por el sistema. La literatura destaca que las empresas industriales

suelen ver atractivos aquellos proyectos que contemplan un payback entre 4 y 7 años, especialmente para aquellos de la industria ubicados en los sectores donde los costos energéticos implican un componente crítico de la operación financiera (Brealey, Myers & Allen,2020).

Dado que los proyectos solares pueden financiarse mediante capital propio, deuda bancaria, créditos verdes o modelos tipo leasing financiero, el WACC incorpora la estructura de financiamiento y los riesgos percibidos. En el contexto colombiano, las tasas de interés pueden representar un reto, pero la existencia de líneas de crédito verde y la posibilidad de apalancamiento a través de incentivos tributarios contribuyen a mejorar la viabilidad del proyecto (Agudelo, Arango-Manrique & Ospina, 2021). Así, el WACC se convierte en un criterio transversal que determina la aceptación o rechazo del proyecto desde la perspectiva financiera estratégica.

En conjunto, los criterios económicos y financieros como: CAPEX, OPEX, VPN, TIR, payback descontado, WACC y volatilidad tarifaria permiten evaluar con rigurosidad la conveniencia de un proyecto solar industrial. Estos indicadores no solo cuantifican la rentabilidad esperada, sino que también permiten comparar alternativas entre proveedores y determinar el nivel de riesgo asociado a cada propuesta.

Sin embargo, la implementación de energía solar en el sector industrial colombiano no depende únicamente de factores técnicos y económicos; también está condicionada por las normas, trámites, incentivos y posibles modificaciones regulatorias que influyen tanto en la ejecución del proyecto como en la estabilidad de sus retornos financieros. En un entorno como el colombiano, caracterizado por constantes actualizaciones regulatorias y por diferencias operativas entre operadores de red, el análisis normativo y de riesgos se convierte en un componente indispensable para sustentar la toma de decisiones empresariales (Superintendencia Financiera de Colombia, 2021).

En el caso de los incentivos que generan valor financiero a través de la normativa, pero que a su vez introducen un riesgo administrativo relacionado con el retraso o rechazo del trámite, puede significar impactos directamente al VPN proyectado para el proyecto (CCB, 2023).

En el caso de Carlixplast, que dependerían de una reducción significativa del CAPEX por medio de gestión de la UPME y así mejorar su flujo de caja, el riesgo debe considerarse explícitamente en el análisis multicriterio.

De igual manera, la normatividad que cobija a los planes solares fotovoltaicos como el de Carlixplast, incluye restricciones técnicas que definen la categoría y requisitos del proyecto. Haciendo que la clasificación AGPE aunque puede ser una ventaja normativa, cualquier modificación en el futuro en tiempos, procedimientos o límites planteados puede afectar la gestión de permisos y proyección del proyecto a largo plazo.

En correlación con los riesgos a la operación y mantenimiento, debe considerarse la posibilidad de fallas no previstas, degradación acelerada de componentes o incumplimientos en los estándares de calidad, lo que puede llegar a reducir la producción energética real entre un 10% y 20% (National Renewable Energy Laboratory, 2018).

Llevado al contexto industrial, esa disminución de la producción energética representa un impacto en los ahorros esperados y en la estabilidad del modelo financiero de la implementación solar fotovoltaica.

En este caso, la literatura destaca que adicionalmente la falta de conocimiento financiero y técnico por parte de directivos y responsables de áreas operativas puede retrasar decisiones estratégicas y limitar la adopción de tecnologías de autogeneración ((Echevarría Gómez et al., 2025).

Finalmente, la normatividad y los riesgos anteriormente descritos componen un factor clave para la toma de decisiones en proyectos solares industriales, pues un análisis bien realizado puede anticipar dificultades legales, operativas y financieras.

2.5 Características para la evaluación multicriterio

La factibilidad de un sistema fotovoltaico industrial debe integrar estructuradamente aquellos parámetros adecuados para el análisis técnico, económico y normativo.

A partir de la revisión documental y el contexto del sector industrial en Santander, se hace primordial establecer criterios que permitan determinar de manera objetiva las alternativas en el mercado para Calixplast, no solo con el objetivo de reflejar los elementos que establezcan la viabilidad del proyecto, sino que visualicen el riesgo de cada decisión (Sapag Chain et al., 2014).

A nivel técnico, el sistema fotovoltaico se centra en la capacidad de generar energía de manera estable y que además se adapte a las condiciones específicas de la empresa siendo eficiente. El primer criterio que evalúa el factor técnico esta dado por el recurso solar disponible, que se expresa a través de la radiación efectiva y el factor de planta proyectado, lo que permite conocer la producción energética estimada y la estabilidad del sistema (International Energy Agency, 2020).

El segundo parámetro técnico pero no menos importante hace referencia a las condiciones del sitio de instalación, que incluyen el área disponible para instalación, la integridad estructural y la oportunidad de instalación sin afectar la operación de la empresa. A este factor se suma la compatibilidad del sistema eléctrico con la infraestructura ya existente, esto con el fin de garantizar

la unificación segura y eficiente con el sistema interno de la empresa (National Renewable Energy Laboratory, 2018).

En el caso de la dimensión económica y financiera, la capacidad de generar valor para la empresa debe ser el objetivo principal, por lo tanto el primer criterio considerado es el costo de inversión (CAPEX), sumándose a este el costo de operación y mantenimiento (OPEX), necesario para proyectar la sostenibilidad financiera del sistema a lo largo de aproximadamente 25-30 años de vida útil según la literatura (International Renewable Energy Agency, 2021). Adicionalmente, el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), serán los indicadores que permitirán evaluar la rentabilidad del proyecto en términos absolutos y relativos frente al costo promedio ponderado de capital (WACC) de la empresa junto con el periodo descontado (payback) como criterio adicional de la liquidez, indicadores relevantes en el caso de las empresas manufactureras (Brealey et al., 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior, la siguiente tabla sintetiza las características principales extraídas de las dimensiones analizadas:

Tabla 2.

Síntesis de parámetros para la matriz de evaluación multicriterio

Dimensión técnica	Dimensión económica y financiera	Dimensión normativa y de riesgo
Recurso solar y desempeño esperado	Costo de inversión (CAPEX)	Aprovechamiento de incentivos tributarios
Condiciones del sitio y viabilidad estructural	Costo de operación y mantenimiento (OPEX)	Complejidad del proceso regulatorio
Eficiencia tecnológica y calidad de componentes	Ahorro anual proyectado	Factibilidad del proceso de conexión
Integración eléctrica y compatibilidad	VPN / TIR / Payback descontado	Estabilidad normativa y riesgos futuros
	Exposición a volatilidad tarifaria	Riesgos operativos y organizacionales

2.6 Evaluación integrada de la factibilidad del proyecto

Desde el perfil energético, Carlixplast S.A.S. posee un consumo energético industrial estable y recurrente, con un gasto mensuales entre 110.000 y 120.000 kWh/mes (*ver Apéndice A*).

En este contexto, la demanda energética y la operación predominantemente diurna establece la circunstancia crítica de la evaluación de factibilidad, pues garantiza la viabilidad de la empresa para generar un porcentaje significativo de energía a través de un sistema fotovoltaico en un esquema de autoconsumo. Siendo así, en la toma de decisiones esta característica se convierte en un factor relevante en la generación anual del sistema solar, pues de esto depende el impacto real del proyecto sobre el gasto eléctrico y a su vez en la reducción de la dependencia de la cobertura de operador de red (Malefaki et al., 2025).

Por otro lado, considerar la viabilidad de un proyecto fotovoltaico para Carlixplast, se ve reforzado en el aspecto económico por los valores medios de energía en sus facturas de consumo energético las cuales reportan consumos superiores a 600COP/Kwh, consumos que implican que cada Kwh no obtenido del operador de red actual es un ahorro económico significativo. Esta relación entre el consumo y las tarifas energéticas de generación hidroeléctrica, hacen del proyecto solar una alternativa financieramente significativa, explicando la necesidad de evaluar criterios como el costo de inversión, el ahorro anual proyectado, la TIR y el Payback.

En este panorama, la autogeneración solar para Carlixplast opera como un mecanismo de amortiguación parcial del riesgo energético derivado de la volatilidad tarifaria del sistema eléctrico colombiano, para así alcanzar la estabilización de un porcentaje de sus costos operativos (Ken Research, 2023). A pesar de los aspectos positivos, la autogeneración es codependiente de la calidad de los equipos, las garantías ofrecidas por el proveedor y la capacidad de este para

encargarse de manera integral del proyecto, lo que justifica una evaluación exhaustiva en la toma de decisiones para la incorporación de un proyecto fotovoltaico.

En resumen, la evaluación de las condiciones reales de Carlixplast S.A.S. permite concluir que la empresa es energética, técnica y económicamente viable para la implementación de un sistema solar fotovoltaico. Bajo este enfoque, esta investigación sugiere pertinente la aplicación una matriz de evaluación que integre los criterios financieros, técnicos y normativos definidos, con el objetivo de seleccionar la alternativa comercial que presente el mejor equilibrio entre la rentabilidad, el desempeño técnico y control del riesgo (Pohekar & Ramachandran, 2004).

2.7 Diferenciación conceptual entre parámetros estructurales y criterios decisorios

En la evaluación de proyectos de inversión es fundamental distinguir entre parámetros estructurales del proyecto y criterios decisorios estratégicos, dado que ambos cumplen funciones metodológicas distintas dentro del proceso de análisis financiero, por ello la ausencia de esta diferenciación puede generar confusión conceptual al tratar variables técnicas como si fueran determinantes directos de la decisión de inversión (Ross, Westerfield, & Jaffe, 2022).

Desde la teoría de finanzas corporativas, los criterios de decisión son aquellos indicadores que permiten determinar si un proyecto genera valor económico para la empresa y, en consecuencia si debe aceptarse o rechazarse (Brealey, Myers, & Allen, 2020). Bajo este enfoque, el principio rector es la creación de valor, determinada mediante la regla del Valor Presente Neto (VPN), según la cual una inversión es aceptable si el VPN es mayor a 0.

Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) es aceptable únicamente si supera el costo de oportunidad del capital, representado por el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) ajustado por el nivel de riesgo del proyecto (Damodaran, 2023).

En contraste, los parámetros estructurales corresponden a variables técnicas, operativas o económicas que describen las condiciones del proyecto y constituyen insumos necesarios para la modelación financiera, pero no determinan por sí mismas la decisión final.

En el contexto de proyectos fotovoltaicos industriales, la literatura técnica especializada establece como parámetros fundamentales variables tales como:

- Recurso solar disponible (irradiancia),
- Potencia instalada proyectada,
- Área útil de instalación,
- Inversión inicial estimada (CAPEX),
- Costos de operación y mantenimiento (OPEX),
- Vida útil y degradación esperada del sistema,
- Perfil de consumo energético de la empresa.

Estos parámetros están ampliamente documentados en estudios técnicos y reportes internacionales sobre evaluación de proyectos solares industriales (International Energy Agency, 2023). Dichas variables permiten estimar la generación anual esperada, el porcentaje de cobertura del consumo y los flujos de caja proyectados (International Renewable Energy Agency, 2023).

No obstante, variaciones secundarias en algunos de estos parámetros por ejemplo, diferencias moderadas en área requerida o potencia instalada, no alteran necesariamente la conveniencia estratégica del proyecto, siempre y cuando los indicadores financieros permanezcan dentro de los umbrales aceptables (NREL, 2023).

Por lo tanto, a partir de estos parámetros estructurales se derivan variables financieras intermedias, tales como:

- Generación anual estimada (kWh/año)
- Ahorro económico anual proyectado
- Flujo de caja libre del proyecto
- Reducción de exposición a volatilidad tarifaria

En coherencia con la teoría financiera y con las mejores prácticas en evaluación de inversiones energéticas con incertidumbre regulatoria (IEA, 2023; World Bank, 2023), la decisión de inversión debe fundamentarse exclusivamente en criterios financieros, entendidos como aquellos indicadores que reflejan la creación de valor y el control del riesgo (Ross et al., 2022).

En la presente investigación, dichos criterios corresponden a:

- Valor Presente Neto (VPN)
- Tasa Interna de Retorno (TIR)
- Período de recuperación descontado
- Cumplimiento normativo y regulatorio

Siendo así, esta diferenciación metodológica permite estructurar el análisis de manera jerárquica y coherente con el objetivo específico de apreciar los parámetros requeridos para aplicar criterios decisorios pertinentes y se pueden agrupar como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Diferenciación entre parámetros estructurales y criterios decisorios

Nivel del análisis	Rol en la evaluación	Ejemplos
Parámetros del proyecto	Describen las condiciones técnicas y económicas del sistema	Irradiancia, CAPEX, OPEX, potencia instalada, perfil de consumo
Variables financieras derivadas	Transforman los parámetros en resultados económicos del proyecto	Generación anual, ahorro energético, flujo de caja
Criterios decisorios	Determinan la aceptación o rechazo de la inversión	VPN, TIR, Payback descontado

Nota. Elaborada con base en Brealey et al. (2020), Ross et al. (2022) y Damodaran (2023).

2.8 Definición de umbrales financieros

Una vez establecida la distinción conceptual entre parámetros estructurales y criterios decisorios, resulta necesario definir los umbrales financieros que permitirán determinar la aceptabilidad estratégica del proyecto (Jordan & Kurtz, 2013).

En consecuencia, se establecen los siguientes umbrales decisorios para la evaluación del sistema solar fotovoltaico propuesto para la empresa objeto de estudio.

a. Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC)

El WACC representa el costo de oportunidad del capital invertido y constituye la tasa mínima exigida por los inversionistas para compensar el riesgo asumido (Damodaran, 2023). Este indicador integra el costo de la deuda y el costo del patrimonio ponderados según la estructura de financiamiento de la empresa, permitiendo estimar la tasa de descuento apropiada para evaluar los flujos de caja del proyecto (Brealey et al., 2020; Ross et al., 2022).

Su determinación se formula a partir de:

$$WACC = \left(\frac{D}{D+P} \right) K_d(1-T) + \left(\frac{P}{D+P} \right) K_e$$

donde:

- D : valor de la deuda de la empresa
- P : valor del patrimonio
- K_d : costo de la deuda
- T : tasa efectiva de impuestos
- K_e : costo del patrimonio

En mercados emergentes como Colombia, el WACC debe incorporar riesgo país y riesgo sectorial (World Bank, 2023). Para efectos de este estudio, se adopta un WACC estimado de 12,27% anual (*ver Apéndice B*), consistente los datos obtenidos de los estados financieros de Carlixplast y con las referencias del sector manufacturero latinoamericano (IEA, 2023).

En el caso de la presente investigación, el costo del patrimonio (K_e) fue estimado mediante el modelo de valoración de activos de capital (Capital Asset Pricing Model- CAPM), el cual permite determinar la rentabilidad esperada del patrimonio en función del riesgo sistemático del activo (Ross, Westerfield & Jaffe, 2022).

Para ello se utilizaron betas des apalancadas sectoriales publicadas por Damodaran (2024) para el sector Household Products dentro del mercado estadounidense. Estas betas se estiman mediante regresiones entre los retornos de las acciones del sector y el retorno del mercado, descontando la tasa libre de riesgo y considerando la prima de mercado (Damodaran, 2023).

Posteriormente, la beta fue apalancada utilizando la estructura de capital de la empresa, siguiendo el enfoque propuesto por Hamada, el cual permite ajustar el riesgo del activo al nivel de endeudamiento corporativo (Hamada, 1972). Para este proceso se utilizó la relación entre deuda total y patrimonio reportada en los estados financieros de Carlixplast S.A.S., así como la tasa

efectiva de impuestos estimada a partir del impuesto pagado sobre la utilidad antes de impuestos del período 2024.

$$K_e = R_f + \beta_e(R_m - R_f)$$

donde:

- R_f : tasa libre de riesgo
- R_m : rentabilidad esperada del mercado
- β_e : beta apalancada del patrimonio

La tasa libre de riesgo utilizada corresponde a 4,58%, mientras que la rentabilidad esperada del mercado se estimó en 11,92%, basada en el promedio geométrico histórico del índice S&P 500 durante los últimos 50 años, siguiendo la metodología sugerida por Damodaran (2023).

Debido a que el modelo CAPM fue estimado inicialmente en dólares, el resultado obtenido fue ajustado incorporando la prima de riesgo país para Colombia (3,30%), estimada a partir del indicador EMBI (Emerging Market Bond Index) publicado por JP Morgan, el cual refleja el diferencial de riesgo entre los bonos soberanos de economías emergentes y los bonos del Tesoro de los Estados Unidos (J.P. Morgan, 2023).

Posteriormente, el costo del patrimonio fue convertido a moneda local mediante el ajuste por inflación relativa entre Colombia y Estados Unidos, utilizando el principio de paridad de inflación (Damodaran, 2012):

$$\text{Inflación de paridad} = \frac{1 + \text{Inflación}_{COL}}{1 + \text{Inflación}_{USA}} - 1$$

Este procedimiento permitió obtener un costo del patrimonio en pesos colombianos de 16,52%.

Por otra parte, el costo de la deuda fue estimado a partir de los gastos financieros reportados por la empresa y el nivel de endeudamiento registrado en los estados financieros, obteniendo una tasa de 1,97%, la cual después del efecto fiscal corresponde a 1,12%

Los datos utilizados para la estimación de la tasa efectiva de impuestos, el costo de la deuda y la estructura de capital de la empresa fueron obtenidos a partir de los estados financieros suministrados por Carlixplast S.A.S. correspondientes al período 2024, así como de información financiera proporcionada directamente por la empresa para efectos del presente estudio. Por lo tanto, el uso de información financiera real permite que la tasa de descuento utilizada en la evaluación del proyecto refleje de manera más precisa el costo de oportunidad del capital bajo las condiciones específicas de la organización.

Finalmente, considerando la estructura financiera de la empresa, compuesta por 27,59% de deuda y 72,41% de patrimonio, se obtiene un Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) de 12,27% anual, valor que se adopta como tasa de descuento para la evaluación financiera del proyecto fotovoltaico desarrollado en esta investigación.

b. Tasa Interna de Retorno mínima aceptable

En coherencia con la teoría financiera, la Tasa Interna de Retorno (TIR) constituye un criterio complementario al Valor Presente Neto para evaluar la rentabilidad relativa de un proyecto de inversión. La regla de decisión establece que un proyecto es financieramente aceptable cuando la TIR supera el costo de oportunidad del capital de la empresa (Brealey, Myers & Allen, 2020; Damodaran, 2023):

$$TIR \geq WACC$$

En el presente estudio, el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) de Carlixplast fue estimado en 12,27% anual, incorporando el costo del capital propio, el costo de la deuda y el

riesgo país correspondiente al contexto colombiano. En consecuencia, se establece este valor como la Tasa Interna de Retorno mínima aceptable para el proyecto fotovoltaico.

c. Período de recuperación descontado máximo aceptable

Aunque el payback no constituye el criterio principal de decisión, su versión descontada permite evaluar riesgo de liquidez y exposición temporal (Damodaran, 2023).

Estudios sobre adopción industrial de energías renovables muestran mayor probabilidad de aprobación interna cuando el período de recuperación es inferior a 5 años (IEA, 2023).

En consecuencia, se establece como umbral:

$$\textit{Payback} \leq 5 \text{ años}$$

d. Condición de robustez financiera bajo escenario conservador

Dado que los incentivos tributarios están condicionados a certificación regulatoria, el proyecto deberá mantener:

- $VPN \geq 0$
- $TIR \geq WACC$

Esto considerado bajo un escenario conservador sin incentivos o con reducción del 10% en generación proyectada, conforme a recomendaciones de análisis de sensibilidad en inversiones energéticas (World Bank, 2023).

En síntesis, la revisión de estos elementos evidencia que la viabilidad de este tipo de iniciativas no depende únicamente de la disponibilidad del recurso solar, sino de la interacción entre condiciones técnicas de instalación, incentivos regulatorios, estabilidad normativa, en especial la capacidad del proyecto para generar valor económico para la empresa.

A partir de esta base conceptual, el siguiente capítulo desarrolla la metodología de investigación y el procedimiento de análisis utilizado para comparar las alternativas propuestas

para Carlixplast S.A.S., mediante herramientas de evaluación financiera y modelos de decisión que permitan identificar la opción más viable bajo las condiciones reales del entorno industrial y regulatorio colombiano.

3. Método

La metodología empleada en esta investigación responde a la necesidad de establecer criterios objetivos, comparables y replicables para evaluar la viabilidad de implementar un sistema solar fotovoltaico en una empresa industrial del departamento de Santander.

El enfoque metodológico integra análisis documental, modelación técnica y financiera, y la construcción de una matriz de evaluación multicriterio que permita sustentar la toma de decisiones estratégicas (Keeney & Raiffa, 1993).

Todo el proceso se diseñó para garantizar coherencia directa con los objetivos de investigación, especialmente con el propósito de establecer y estimar criterios de decisión aplicables al caso de Carlixplast S.A.S.

De este modo, el estudio adopta un enfoque mixto con predominio cuantitativo (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018), debido a que la decisión final depende principalmente de:

- Proyecciones de generación energética.
- Modelación financiera de flujos de caja.
- Estimación de ahorros en términos de VPN, TIR y Payback.
- Comparación objetiva de alternativas.

El componente cualitativo respalda la interpretación normativa, la identificación de riesgos y el análisis de la literatura técnica (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

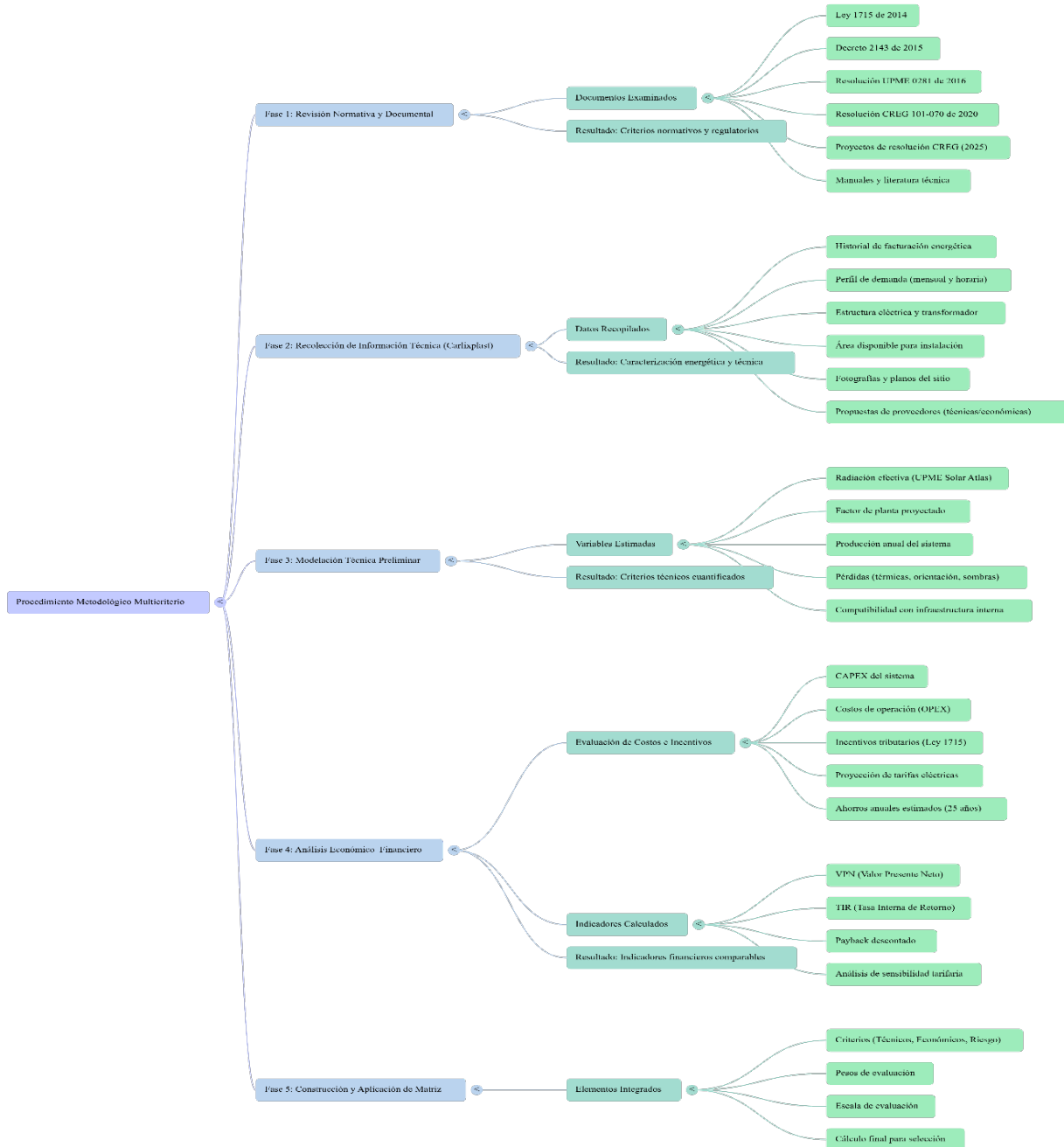
Estos dos enfoques permiten comprender el caso de Carlixplast, desde un punto de vista integral con los estándares de evaluación de proyectos energéticos en entornos industriales.

Por lo tanto, el presente proyecto corresponde a un estudio No Experimental, pues no se manipulan variables o se interviene en la operación eléctrica de la empresa en estudio. Siendo así, el estudio se clasifica como descriptivo y analítico, pues combina la caracterización detallada de un proceso de interpretación con la toma de decisiones.

En el contexto de un estudio descriptivo, esta investigación examina y documenta el marco normativo aplicable, el potencial solar disponible en la región, el comportamiento real del consumo energético de la empresa y las especificaciones técnicas de las propuestas presentadas por los proveedores (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Al mismo tiempo, adquiere un carácter analítico al transformar dicha información en criterios comparables, estimando los indicadores financieros como VPN, TIR y periodo de recuperación en los aspectos a evaluar de las alternativas comerciales mediante una matriz multicriterio que integra dimensiones técnicas, económicas y regulatorias.

Figura 1.

Procedimiento metodológico para la evaluación multicriterio de la implementación de sistemas fotovoltaicos



Nota. Elaborada con base en el diseño metodológico del estudio

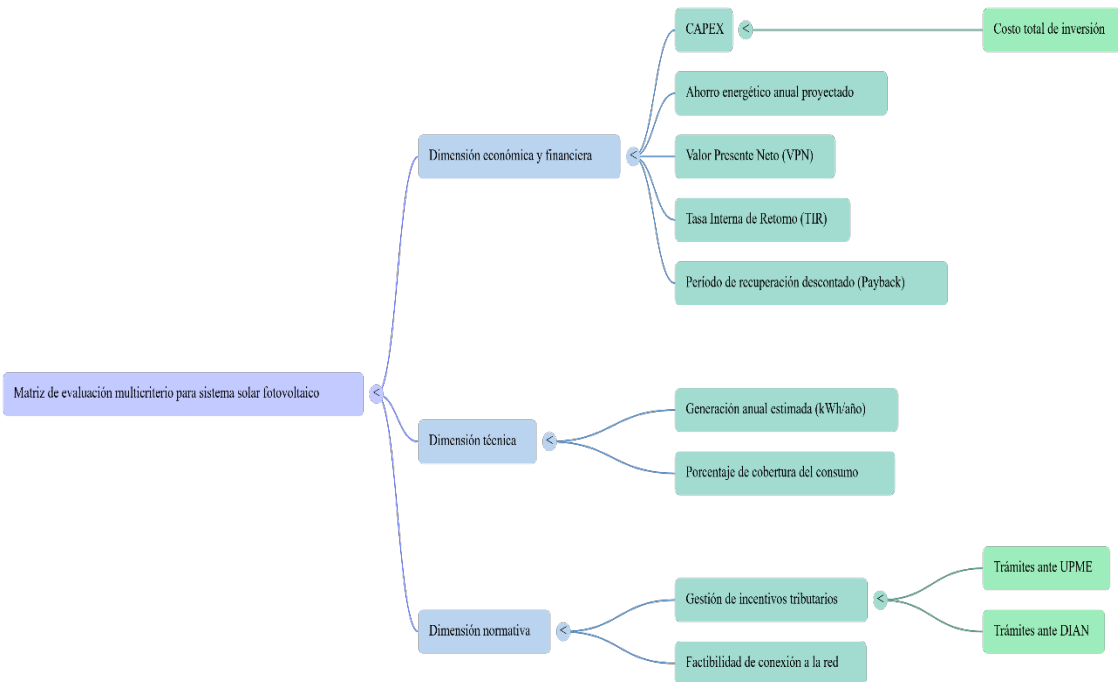
3.1 Diseño y aplicación de la matriz de evaluación multicriterio

La matriz multicriterio es el instrumento que permite comparar objetivamente las opciones disponibles para Carlixplast, considerando simultáneamente factores técnicos, económicos y regulatorios. Su construcción se fundamentó en literatura académica sólida sobre MCDM (Multi-Criteria Decision Making), aplicada específicamente al sector energético (Hwang & Yoon, 1981).

Partiendo de ello se escogieron 9 criterios, basados en la literatura y descritos en el capítulo anterior, así:

Figura 2.

Estructura conceptual de la matriz de evaluación multicriterio utilizada para comparar las alternativas de implementación del sistema solar fotovoltaico



Nota. Elaborada con base en el diseño metodológico MCDM.

Esta agrupación es consistente con el marco sugerido por Pohekar & Ramachandran (2004) y Kahraman et al. (2009).

3.2 Ponderación de criterios de la matriz

La asignación de pesos a los criterios de la matriz de evaluación multicriterio constituye una etapa metodológica fundamental dentro del proceso de toma de decisiones, dado que define la importancia relativa de cada criterio en el cálculo del puntaje global de las alternativas evaluadas.

En el contexto de decisiones de inversión estratégica, la ponderación permite reflejar las prioridades de la organización y asegurar que el proceso de evaluación sea estructurado, transparente y replicable, tal como lo señalan estudios recientes sobre métodos de decisión multicriterio aplicados a problemas complejos de ingeniería y sostenibilidad (Malefaki et al., 2025).

Diversos autores coinciden en que los criterios económicos deben tener un peso predominante dentro del análisis, debido a que las decisiones de inversión en tecnologías renovables responden, en primera instancia, a la creación de valor financiero dentro de la organización. Por ello, para el presente estudio la ponderación de los criterios se realizó mediante un enfoque jerárquico por dimensiones, ampliamente utilizado en marcos de análisis multicriterio “*Multi-Criteria Decision Making (MCDM)*”, en el cual se asignan pesos iniciales a grandes grupos de criterios y posteriormente estos se distribuyen entre los criterios específicos que los conforman (Petrichenko et al., 2026).

Este enfoque permite mantener coherencia en la matriz y facilita la trazabilidad de la decisión final, especialmente cuando se emplean métodos aditivos como el Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model - WSM) (Malefaki et al., 2025).

Estudios como el de Wüstenhagen y Menichetti en 2012, demuestran en evaluaciones multicriterio aplicadas al sector energético que la dimensión económica representa entre el 40% y el 60% de la ponderación total, ya que integra variables decisivas como el costo de inversión, los ahorros proyectados y la rentabilidad.

En coherencia con esta evidencia, la presente investigación asigna un peso del 50% a la dimensión económico-financiera, reconociendo que la decisión de adoptar un sistema fotovoltaico en Carlixplast S.A.S. está directamente relacionada con su impacto sobre sus costos energéticos y la competitividad de la empresa.

En el caso de la dimensión técnica, se estableció un peso del 30% considerando que la viabilidad operativa del sistema depende de factores como la generación energética proyectada y la capacidad del sistema para cubrir una proporción significativa del consumo eléctrico de la empresa. Aunque estos elementos no determinan por sí solos la decisión final, sí condicionan el comportamiento real del sistema y, en consecuencia, los flujos de ahorro que alimentan el análisis financiero (IRENA, 2023; NREL, 2023).

Manuales técnicos ampliamente aceptados, como los de BUN-CA y SEAS, así como informes recientes de IRENA, resaltan que un análisis financiero robusto es insuficiente si el sistema no cumple con criterios mínimos de rendimiento técnico, razón por la cual estos criterios deben tener un peso considerable, aunque subordinado a lo económico (BUN-CA,2022; SEAS,2011; IRENA, 2021; IRENA,2023).

Finalmente, la dimensión normativa y de riesgo se pondera con un 20%, en concordancia con estudios recientes sobre incertidumbre regulatoria y su efecto en inversiones en energías renovables realizados por investigaciones como las de Vega-Araújo y Muñoz Cabré y los reportes del World Bank, donde muestran que, si bien los incentivos regulatorios y la estabilidad normativa influyen en los flujos económicos del proyecto, su peso relativo suele ser menor frente a la viabilidad técnica y la rentabilidad financiera; ya que estos criterios operan como moduladores de riesgo pero no deciden la adopción por sí mismos, sin embargo pueden acelerar o impedir la implementación dependiendo de su cumplimiento (World Bank, 2023; Wang et al., 2009).

Una vez definidos los pesos por dimensión, estos se distribuyeron entre los criterios específicos que integran cada dimensión. Con el fin de evitar introducir subjetividad adicional en la ponderación y garantizar transparencia en el proceso de evaluación, los pesos se asignaron de forma uniforme entre los criterios pertenecientes a cada dimensión, tal como recomiendan Belton y Stewart (2002) y Triantaphyllou (2000) cuando se emplean métodos de comparación por pares como el Analytic Hierarchy Process (AHP).

De esta manera, los cinco criterios de la dimensión económica reciben un peso individual de 0,10, los dos criterios de la dimensión técnica reciben un peso de 0,15 cada uno, y los dos criterios de la dimensión normativa reciben un peso de 0,10 cada uno, asegurando que la suma total de las ponderaciones sea igual a uno.

3.3 Normalización de criterios y evaluación objetiva de las alternativas

Basándonos en la estructura WSM, es de vital importancia garantizar que la valoración de las alternativas comerciales ofertadas a Carlixplast, se realice por medio de procedimientos

verificables y replicables, en especial cuando los criterios que se establecen como decisorios suelen presentarse en unidades de medida diferentes entre sí, como lo son valores monetarios, cantidades energéticas y/o porcentajes.

En este caso, es indispensable consolidar los datos en una escala común que permitan compararlos; por lo tanto y tomando en cuenta la literatura especializada en métodos de decisión multicriterio, la cual recomienda el uso de un esquema de normalización matemática, que permita convertir los valores originales en indicadores comparables antes de realizar la categorización ponderada de resultados (Hwang & Yoon, 1981; Triantaphyllou, 2000; Pohekar & Ramachandran, 2004).

En resumen, para los criterios cuantitativos, como el CAPEX, el ahorro energético anual proyectado, el VPN, entre otros, se aplicará la normalización lineal como el procedimiento que transformará cada variable en valores comparables, teniendo en cuenta que este procedimiento distingue entre criterios de beneficio y criterios de costo, según la naturaleza del indicador evaluado (Triantaphyllou, 2000).

Los criterios de beneficio corresponden a aquellos en los cuales un mayor valor representa un mejor desempeño de la alternativa, como ocurre con el ahorro energético anual o la generación energética del sistema.

Para estos casos, la normalización se calcula mediante la siguiente expresión (Hwang & Yoon, 1981; Triantaphyllou, 2000):

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max(X_j)}$$

donde:

- X_{ij} representa el valor original del criterio j para la alternativa i

- $Max (X_j)$ corresponde al valor máximo observado para ese criterio entre las alternativas evaluadas
- X'_{ij} es el valor normalizado utilizado en la matriz multicriterio.

Por su parte, los criterios de costo corresponden a aquellos en los cuales un menor valor representa un mejor desempeño, como ocurre con el CAPEX o el período de recuperación descontado.

En estos casos, la normalización se calcula mediante la siguiente expresión (Triantaphyllou, 2000; Wang et al., 2009):

$$X'_{ij} = \frac{\min(X_j)}{X_{ij}}$$

donde:

- $Min (X_j)$ corresponde al valor mínimo observado del criterio entre las alternativas analizadas.

Este procedimiento permite transformar variables heterogéneas en una escala comparable, la relación de preferencia entre alternativas.

Diversos estudios aplicados a la evaluación de tecnologías energéticas han utilizado la normalización para integrar indicadores técnicos, financieros y regulatorios dentro de modelos de decisión multicriterio (Pohekar & Ramachandran, 2004; Wang et al., 2009). Además de los criterios cuantitativos, algunos elementos del análisis corresponden a condiciones discretas de cumplimiento, particularmente aquellas asociadas a aspectos regulatorios o administrativos del proyecto.

En este tipo de situaciones, la literatura en análisis de decisión multicriterio establece que los criterios pueden representarse mediante variables binarias, las cuales toman únicamente dos

valores posibles y permiten indicar si una alternativa cumple o no con un requisito específico dentro del proceso de evaluación (Belton & Stewart, 2002; Greco, Ehrgott & Figueira, 2016).

El uso del método binario de evaluación se justifica cuando ciertos criterios pueden representar requisitos obligatorios o elementos incluidos dentro de una propuesta técnica, más no variables susceptibles a medición cuantitativa. Por lo tanto, la codificación binaria permite incorporar dichos criterios dentro del modelo multicriterio sin introducir escalas subjetivas de valoración, manteniendo la coherencia del modelo cuantitativo (Keeney & Raiffa, 1993; Greco et al., 2016).

Bajo este enfoque metodológico, los criterios de cumplimiento se representan mediante una codificación binaria, definida de la siguiente manera:

- 1: la alternativa cumple con el criterio evaluado o incluye explícitamente el servicio requerido dentro de la propuesta.
- 0: la alternativa no contempla dicho elemento o no garantiza su cumplimiento dentro del alcance del proyecto.

En el presente estudio, este método se aplica a los criterios relacionados con la gestión de incentivos tributarios ante la UPME y la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN), así como a la factibilidad del proceso de conexión del sistema fotovoltaico a la red eléctrica, dado que estos aspectos dependen de la inclusión explícita de dichos servicios dentro de las propuestas presentadas por cada proveedor.

Una vez obtenidos los valores normalizados para los criterios cuantitativos y los valores binarios para los criterios de cumplimiento, se procede a integrar todos los resultados mediante el Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model - WSM). Donde el puntaje total de cada

alternativa se calcula como la suma de los productos entre el peso asignado a cada criterio y el valor normalizado correspondiente, de acuerdo con la siguiente expresión (Triantaphyllou, 2000):

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{ij}$$

donde:

- S_i representa el puntaje total de la alternativa i
- w_j corresponde al peso asignado al criterio j
- x_{ij} representa el valor normalizado o binario del criterio j para la alternativa i

Por consiguiente, la alternativa que obtenga el mayor puntaje ponderado será considerada la opción más favorable dentro del conjunto evaluado, siempre que cumpla simultáneamente con los umbrales financieros mínimos definidos previamente en el marco referencial mediante el cálculo del Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) de la empresa, particularmente la condición de VPN positivo y TIR superior al costo promedio ponderado de capital (WACC).

3.4 Estructura de la matriz de evaluación multicriterio

Con el fin de aplicar el Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model-WSM) y garantizar coherencia entre el diseño metodológico y la etapa de resultados, se definió la estructura de la matriz de evaluación multicriterio utilizada en el presente estudio de la siguiente manera.

La matriz se construye de forma tabular y está compuesta por cinco elementos fundamentales:

- Criterios de evaluación
- Pesos asignados a cada criterio

- Valores observados para cada alternativa
- Valores normalizados obtenidos mediante las ecuaciones definidas en la sección

anterior

- Puntaje ponderado final de cada alternativa.

Cada fila de la matriz representa un criterio de evaluación, mientras que cada columna corresponde a una alternativa tecnológica propuesta para la empresa.

Los pesos de los criterios permanecen constantes para todas las alternativas evaluadas, mientras que los valores asociados a cada criterio varían en función de las características técnicas y financieras de cada propuesta presentada por los proveedores.

En este estudio se evaluaron tres propuestas tecnológicas presentadas para la implementación del sistema fotovoltaico en Carlixplast S.A.S., correspondientes a los proveedores Social Solar, SEB e Innova Solar.

Los criterios utilizados en la matriz se derivan del análisis técnico, económico y normativo desarrollado en el marco referencial, y se agrupan en tres dimensiones principales: económica, técnica y normativa.

La ponderación de estas dimensiones se estableció previamente, asignando un peso del 50% a la dimensión económica, 30% a la dimensión técnica y 20% a la dimensión normativa.

De esta manera, la matriz final de evaluación multicriterio se estructura de la siguiente forma:

Tabla 4.

Matriz base de evaluación multicriterio (WSM)

Criterio	Dimensión	Tipo	Peso	Social Solar	SEB	Innova Solar
Inversión total (CAPEX)	Económica	Costo	0.10			
Ahorro energético anual	Económica	Beneficio	0.10			
Valor Presente Neto (VPN)	Económica	Beneficio	0.10			
Tasa Interna de Retorno (TIR)	Económica	Beneficio	0.10			
Período de recuperación descontado	Económica	Costo	0.10			
Generación anual estimada	Técnica	Beneficio	0.15			
Cobertura del consumo energético	Técnica	Beneficio	0.15			
Gestión de incentivos UPME / DIAN	Normativa	Binario	0.10			
Factibilidad del proceso de conexión	Normativa	Binario	0.10			
TOTAL			1.00			

Una vez incorporados los valores observados para cada criterio, se procede a aplicar el proceso de normalización de variables, con el fin de transformar los datos en una escala comparable y posteriormente, los valores normalizados se multiplicarán por el peso correspondiente de cada criterio.

Finalmente, el puntaje global de cada alternativa se obtiene mediante el Modelo de Suma Ponderada (WSM), el cual se calcula como la suma de los productos entre los valores normalizados y los pesos asignados a cada criterio.

De esta manera, la matriz de evaluación multicriterio permite integrar información técnica, económica y normativa dentro de un modelo cuantitativo estructurado que respalda la toma de decisiones estratégicas en la empresa objeto de estudio.

Con el fin de garantizar transparencia en la construcción de la matriz multicriterio y facilitar la trazabilidad de los datos utilizados en la evaluación, se realizó un proceso de operacionalización de los criterios definidos en el estudio, lo que permitió establecer para cada criterio su unidad de medida, el tipo de indicador (beneficio, costo o cumplimiento), el método de evaluación utilizado dentro del modelo y la fuente de los datos empleados en el análisis.

Tabla 5.

Criterios de la matriz multicriterio según su categorización

Criterio	Dimensión	Unidad de medida	Tipo de criterio	Método de evaluación	Fuente del dato
Inversión total (CAPEX)	Económica	COP	Costo	Normalización de costo	Propuestas técnicas de proveedores
Ahorro energético anual	Económica	COP/año	Beneficio	Normalización de beneficio	Proyección de ahorro energético del proveedor
Valor Presente Neto (VPN)	Económica	COP	Beneficio	Cálculo financiero del proyecto	Modelo financiero desarrollado en el estudio
Tasa Interna de Retorno (TIR)	Económica	%	Beneficio	Cálculo financiero del proyecto	Modelo financiero desarrollado en el estudio
Período de recuperación descontado	Económica	Años	Costo	Cálculo financiero del proyecto	Modelo financiero desarrollado en el estudio
Generación anual estimada	Técnica	kWh/año	Beneficio	Normalización de beneficio	Simulación energética presentada por proveedores

Criterio	Dimensión	Unidad de medida	Tipo de criterio	Método de evaluación	Fuente del dato
Cobertura del consumo energético	Técnica	% del consumo	Beneficio	Normalización de beneficio	Comparación entre generación proyectada y consumo histórico de la empresa
Gestión de incentivos UPME/DIAN	Normativa	Cumple / No cumple	Binario	Método binario (1 = incluye gestión / 0 = no incluye)	Alcance técnico de la propuesta del proveedor
Factibilidad del proceso de conexión	Normativa	Cumple / No cumple	Binario	Método binario (1 = incluye gestión de conexión / 0 = no incluye)	Alcance técnico de la propuesta del proveedor

4. Resultados

Una vez definidos los criterios de evaluación y la estructura de ponderación descrita en el capítulo metodológico, se procedió a aplicar la matriz de evaluación multicriterio a las alternativas de sistemas fotovoltaicos propuestas para Carlixplast S.A.S.

Esta etapa tiene como objetivo integrar la información técnica, económica y normativa consolidada previamente, y transformarla en un puntaje agregado que permita sustentar la toma de decisión estratégicas de inversión de manera objetiva.

4.1 Consolidación de datos técnicos y financieros de las propuestas evaluadas

En esta sección se presentan los datos técnicos, económicos y normativos reportados por los proveedores evaluados para la implementación del sistema solar fotovoltaico en Carlixplast S.A.S. Esta consolidación constituye la base empírica del análisis comparativo, ya que a partir de estos valores se desarrollan posteriormente la modelación financiera, la normalización de criterios y el cálculo del puntaje ponderado mediante el Modelo de Suma Ponderada (WSM).

Con el fin de garantizar trazabilidad metodológica, únicamente se incluyen las variables correspondientes a los criterios definidos en la matriz de evaluación multicriterio.

Tabla 6.

Consolidación de datos base de las propuestas

Criterio	Unidad	Social Solar	SEB	Innova Solar
Inversión total (CAPEX)	COP	767.313.039	770.915.208	780.000.000
Ahorro energético anual	COP/año	175.025.065	194.416.548	188.136.000
Generación anual estimada	kWh/año	299.642	313.110	312.000
Cobertura del consumo energético	%	21%	22,11%	22,6 %*
TIR reportada	%	39%	No reportada	No reportada
Payback reportado	años	3,06	2,08	5

Nota. * Valor estimado a partir de la generación anual proyectada y el consumo energético anual de la empresa. (ver Apéndice C). Elaborada con base en las propuestas de proveedores.

A partir de la información consolidada se observa que las tres propuestas presentan niveles similares de inversión inicial y generación energética proyectada. Sin embargo, no todos los

proveedores reportan de manera homogénea los indicadores financieros clave del proyecto, particularmente el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Por esta razón, se desarrolló un modelo financiero homogéneo que permite calcular estos indicadores.

4.2 Modelación financiera homogénea de las propuestas

Debido a que las propuestas analizadas no reportan de manera uniforme los indicadores financieros necesarios para la evaluación del proyecto, se desarrolló un modelo financiero unificado que permite calcular el VPN, la TIR y el período de recuperación descontado bajo los mismos criterios de evaluación para todas las propuestas (Brealey, Myers & Allen, 2022).

En este contexto, un modelo financiero unificado se entiende como una estructura de cálculo en la cual los indicadores financieros del proyecto se estiman utilizando las mismas variables económicas, el mismo horizonte temporal de evaluación y la misma tasa de descuento, de manera que los resultados obtenidos para cada alternativa sean comparables bajo condiciones equivalentes (Ross, Westerfield & Jaffe, 2022).

Este enfoque es ampliamente recomendado en evaluaciones comparativas de proyectos de inversión, ya que permite garantizar la consistencia metodológica entre alternativas y evita distorsiones derivadas del uso de supuestos diferentes entre proveedores (Damodaran, 2023); para garantizar la comparabilidad entre alternativas, el cálculo de los indicadores financieros se realizó utilizando las siguientes variables:

Tabla 7.

Variables utilizadas en la modelación financiera del proyecto

Variable	Valor
Vida útil del sistema	25 años
Tasa de descuento	WACC de Carlixplast (12,27 %) *
Degradación anual de paneles	0,50%*
Costos de operación y mantenimiento	1% del CAPEX anual
Horizonte de evaluación	30 años

Nota: *Cálculo del estudio. IRENA (2023) y NREL (2023).

Partiendo de estas variables utilizadas en el modelo financiero, se procedió a construir el flujo de caja proyectado del sistema fotovoltaico para cada una de las alternativas evaluadas.

El flujo de caja representa la secuencia de entradas y salidas de efectivo generadas por el proyecto a lo largo de su vida útil y constituye la base para el cálculo de indicadores financieros como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) (Brealey et al., 2023; Ross et al., 2025). Por ello, en proyectos de autogeneración energética, los beneficios económicos provienen principalmente del ahorro generado por la sustitución del consumo de energía eléctrica de la red, mientras que los egresos corresponden a la inversión inicial del sistema y a los costos de operación y mantenimiento de este.

Consecuentemente, los costos de operación y mantenimiento (O&M) se estimaron como el 1% del CAPEX anual, valor ampliamente utilizado en la literatura técnica para sistemas fotovoltaicos industriales (IRENA, 2023).

Así, a partir de las variables definidas anteriormente se calculó el flujo de caja anual del proyecto mediante la siguiente expresión:

$$FC = \text{Ahorro anual} - O\&M$$

donde:

- FC : flujo de caja anual en el proyecto
- $Ahorro_{anual}$: ahorro económico generado por la energía producida por el sistema

fotovoltaico

- $O\&M$: costos anuales de operación y mantenimiento del sistema

Para el año inicial de inversión, el flujo de caja corresponde al desembolso asociado al costo de instalación del sistema:

$$FC_0 = -CAPEX$$

donde:

- $CAPEX$: inversión inicial del sistema fotovoltaico.

De la información recopilada en las propuestas y de las variables definidas anteriormente, se obtuvieron los valores necesarios para estimar los flujos de caja del proyecto para cada alternativa analizada, como se describe a continuación:

Tabla 8.

Variables y cálculo del flujo de caja anual del proyecto fotovoltaico

Propuesta	CAPEX (COP)	Ahorro anual estimado (COP/año)	O&M anual (1% CAPEX)	Flujo de caja anual (COP)
Social Solar	767.313.039	175.025.065	7.673.130	167.351.935
SEB	770.915.208	194.416.548	7.709.152	186.707.396
Innova Solar	780.000.000	188.136.000	7.800.000	180.336.000

Nota. Elaborada con base en las propuestas de proveedores.

A partir de la estimación del flujo de caja anual del proyecto fotovoltaico para cada una de las alternativas analizadas, se consolidó la base para la estimación de los indicadores financieros

utilizados en la evaluación de la viabilidad económica del proyecto. Estos indicadores permiten determinar si el proyecto genera valor para la empresa y si su rentabilidad supera el costo de capital utilizado como tasa de descuento (Brealey et al., 2023; Ross et al., 2025).

En consecuencia, los indicadores financieros utilizados para evaluar la viabilidad económica del proyecto fueron calculados como se evidencia a continuación:

El Valor Presente Neto (VPN) del proyecto se estimó a partir de los flujos de caja proyectados y la tasa de descuento correspondiente al costo promedio ponderado de capital (WACC), utilizando la siguiente expresión (Brealey et al., 2023):

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t}$$

donde FC_t corresponde al flujo de caja del proyecto en el año t , r representa la tasa de descuento (WACC) y n el horizonte de evaluación del proyecto.

En el caso de la Tasa Interna de Retorno (TIR) se calculó como la tasa de descuento que iguala a cero el Valor Presente Neto del proyecto, de acuerdo con la siguiente expresión (Ross et al., 2025):

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t}$$

Finalmente, el período de recuperación descontado se estimó determinando el momento en el cual el valor presente acumulado de los flujos de caja iguala la inversión inicial del proyecto (Brealey et al., 2023) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+r)^t} = CAPEX$$

Donde:

- FC: flujo de caja del proyecto en el año t
- r : tasa de descuento del proyecto (WACC)
- t : período de tiempo
- T : año en el que se recupera la inversión
- CAPEX: inversión inicial del proyecto

Con base en las ecuaciones anteriores, se calcularon los indicadores financieros del proyecto para cada propuesta evaluada. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 9.

Resultados de los indicadores financieros del proyecto

Propuesta	CAPEX (COP)	Flujo de caja anual (COP)	VPN (COP)	TIR (%)	Payback descontado (años)
Social Solar	767.313.039	167.351.935	521.055.606	21,65	7,15
SEB	770.915.208	186.707.396	666.462.584	24,11	6,11
Innova Solar	780.000.000	180.336.000	608.327.228	22,99	6,55

Nota: Para el cálculo de los indicadores financieros se utilizaron variables constantes para todas las alternativas evaluadas: vida útil del sistema fotovoltaico de 30 años, tasa de descuento equivalente al WACC de la empresa (12,27 %) y costos de operación y mantenimiento estimados en 1% del CAPEX anual, de acuerdo con referencias de la literatura técnica sobre sistemas fotovoltaicos (IRENA, 2023; Brealey et al., 2023). Elaborada con base en las propuestas de los proveedores.

Los resultados presentados en la Tabla 8, permiten empezar a identificar el comportamiento financiero de cada alternativa de inversión a partir de los principales indicadores utilizados en la

evaluación del proyectos. En términos generales, las tres propuestas presentan indicadores positivos, lo que sugiere que la implementación del sistema fotovoltaico resulta financieramente viable bajo las condiciones analizadas. No obstante, se observan diferencias relevantes en la magnitud del Valor Presente Neto, la rentabilidad medida a través de la Tasa Interna de Retorno y el tiempo de recuperación de la inversión, lo cual permite establecer comparaciones entre las alternativas evaluadas.

Estos indicadores constituyen los criterios financieros decisorios del estudio, ya que permiten determinar el nivel de creación de valor económico asociado a cada propuesta. Con el fin de integrar estos resultados dentro del proceso de selección de la alternativa más conveniente para la empresa, en la siguiente sección se procede a aplicar la matriz de evaluación multicriterio, la cual permite comparar las propuestas de manera estructurada mediante la normalización y ponderación de los criterios financieros previamente calculados.

4.3 Normalización de los criterios financieros para la matriz de evaluación

Una vez calculados los indicadores financieros del proyecto para cada alternativa evaluada, es necesario transformar estos valores a una escala común que permita su comparación dentro de la matriz de evaluación multicriterio.

Para resolver esta diferencia de unidades, se aplicó la normalización de criterios, procedimiento ampliamente utilizado en métodos de decisión multicriterio cuando se integran variables heterogéneas dentro de un mismo modelo de evaluación (Triantaphyllou, 2000; Tzeng & Huang, 2011).

En el presente estudio se utilizó la normalización min - máx, mediante el cual los criterios de beneficio se normalizan dividiendo cada valor entre el mayor valor observado del criterio, mientras que los criterios de costo se normalizan dividiendo el menor valor observado entre cada valor evaluado (Triantaphyllou, 2000).

Para los criterios de beneficio (VPN, TIR y flujo de caja anual) se utilizó la siguiente expresión:

$$N_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{max}}$$

Para el criterio de costo (Payback descontado) se utilizó la expresión:

$$N_{ij} = \frac{x_{min}}{x_{ij}}$$

donde:

- N_{ij} : valor normalizado del criterio i para la alternativa j
- x_{ij} : valor original del criterio
- x_{max} : mayor valor observado del criterio
- x_{min} : menor valor observado del criterio

A partir de las expresiones anteriores y utilizando los flujos de caja estimados para cada alternativa, se calcularon los indicadores financieros normalizados del proyecto. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla

Tabla 10.

Resultados obtenidos de la normalización de los indicadores financieros del proyecto

Propuesta	VPN (COP)	VPN normalizado	TIR (%)	TIR normalizado	Payback (años)	Payback normalizado	Flujo de caja (COP)	Flujo normalizado
Social Solar	521.055.606	0,782	21,65	0,898	7,15	0,854	167.351.935	0,896
SEB	666.462.584	1	24,11	1	6,11	1	186.707.396	1
Innova Solar	608.327.228	0,913	22,99	0,954	6,55	0,933	180.336.000	0,966

Nota. Elaborada con base en las propuestas de los proveedores.

Finalmente, a partir de estos valores se procede a construir la matriz de decisión que permitirá identificar la alternativa con el mejor desempeño financiero para la empresa objeto de estudio.

4.4 Aplicación de la matriz de evaluación multicriterio

Una vez obtenidos los valores normalizados de los indicadores financieros y consolidados los datos técnicos y normativos de cada propuesta, se procede a aplicar la matriz de evaluación multicriterio, la cual constituye el instrumento central de análisis comparativo en el presente estudio.

A partir de esta matriz base se incorporan los valores normalizados de cada criterio para las alternativas evaluadas. Donde, posteriormente, cada valor normalizado es multiplicado por el peso correspondiente del criterio, siguiendo el principio del Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model-WSM), con el fin de obtener un puntaje agregado para cada propuesta.

El puntaje final de cada alternativa se obtiene mediante la suma de los productos entre el peso del criterio y el valor normalizado correspondiente, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r_{ij}$$

donde:

- S_j : puntaje total de la alternativa j
- w_i : peso asignado al criterio i
- r_{ij} : valor normalizado del criterio i para la alternativa j

Este procedimiento permite integrar todos los criterios considerados dentro de un único indicador de desempeño, facilitando la identificación de la alternativa que presenta el mejor equilibrio entre rentabilidad financiera, desempeño técnico y viabilidad regulatoria.

A partir de los valores normalizados y de los pesos asignados a cada criterio, se construye la matriz de evaluación multicriterio, en la cual se calculan los valores ponderados para cada alternativa y se obtiene el puntaje total comparativo de cada propuesta.

Tabla 11.

Matriz de evaluación multicriterio para la selección del sistema solar fotovoltaico (WSM)

Criterio	Tipo	Peso	Social Solar (valor)	Normalizado	Ponderado	SEB (valor)	Normalizado	Ponderado	Innova Solar (valor)	Normalizado	Ponderado
CAPEX (COP)	Costo	0.10	767.313.039	1.000	0.100	770.915.208	0.995	0.099	780.000.000	0.984	0.098
Ahorro anual (COP)	Beneficio	0.10	175.025.065	0.900	0.090	194.416.548	1.000	0.100	188.136.000	0.968	0.097
VPN (COP)	Beneficio	0.10	521.055.606	0.782	0.078	666.462.584	1.000	0.100	608.327.228	0.913	0.091
TIR (%)	Beneficio	0.10	21,65	0.898	0.090	24,11	1.000	0.100	22,99	0.954	0.095
Payback (años)	Costo	0.10	7,15	0.854	0.085	6,11	1.000	0.100	6,55	0.933	0.093
Generación anual (kWh)	Beneficio	0.15	299.642	0.957	0.144	313.110	1.000	0.150	312.000	0.997	0.149
Cobertura consumo (%)	Beneficio	0.15	21	0.929	0.139	22,11	0.978	0.147	22,6	1.000	0.150
Gestión incentivos UPME	Binario	0.10	Sí	1	0.100	Sí	1	0.100	No	0	0.000
Factibilidad conexión	Binario	0.10	Sí	1	0.100	Sí	1	0.100	Sí	1	0.100
PUNTAJE TOTAL		1.00			0.927			0.996			0.873

Los resultados obtenidos muestran que la propuesta presentada por SEB alcanza el mayor puntaje agregado dentro de la matriz de evaluación multicriterio, con un valor de 0,996, superando a las alternativas Social Solar (0,927) e Innova Solar (0,873).

Este resultado se explica principalmente por el mejor desempeño de la propuesta SEB en los indicadores financieros clave, particularmente en el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación descontado, los cuales constituyen criterios decisivos fundamentales dentro de la evaluación económica del proyecto.

Adicionalmente, esta alternativa presenta el mayor nivel de generación energética estimada y el mayor porcentaje de cobertura del consumo eléctrico de la empresa, lo que refuerza su desempeño dentro de la dimensión técnica. Finalmente, la propuesta cumple con los criterios normativos evaluados, incluyendo la gestión de incentivos ante UPME así como la factibilidad del proceso de conexión.

4.5 Estimación del Costo Nivelado de la Energía (LCOE) mediante el modelo UPME

Con el fin de fortalecer la evaluación económica del proyecto fotovoltaico, se incorporó el cálculo del costo nivelado de la energía (LCOE) mediante el uso del modelo parametrizado de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), disponible en su plataforma oficial: <https://lcoev2.upme.gov.co/flexible>.

El modelo seleccionado corresponde al simulador flexible de LCOE, el cual permite estimar el costo unitario de generación eléctrica a partir de variables técnicas, económicas y regulatorias del proyecto, integrando costos de inversión, operación y mantenimiento, así como condiciones de financiamiento y vida útil del sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, la parametrización del simulador se realizó con base en la información técnica y financiera de la alternativa seleccionada en la matriz multicriterio (SEB), así como en los valores previamente estimados en el desarrollo del presente estudio.

Los datos utilizados en el simulador se integran a continuación:

Tabla 12

Variables de entrada para el cálculo del LCOE en el simulador UPME

Variable	Valor	Unidad	Fuente / Justificación
Capacidad instalada	0,2485	MW	Propuesta SEB
Generación anual	313,11	MWh/año	Propuesta SEB
Vida útil	30	años	Literatura técnica
Factor de planta	14,38	%	Cálculo propio
WACC	8,08	%	Valor generado por parametrización de simulador UPME en proyectos fotovoltaicos para Girón, Santander
Tasa de degradación	0,3	%	Literatura técnica
Inversión total	0,841	MMUS\$/MW	Conversión del CAPEX
O&M fijo	3,07	USD/MW-año	
O&M variable	0	USD/MWh	No aplica
Combustible	0	MBTU/MWh	No aplica
Emisiones	0	—	No aplica
Renta líquida gravable	2.31	MMUS\$	Estados financieros

Nota: *Cálculo del estudio. IRENA (2023) y NREL (2023).

A pesar de tener los parámetros principales requeridos, algunos requeridos por el simulador no se encontraban directamente disponibles en la información suministrada por el proveedor, por lo que fueron estimados mediante procedimientos técnicos y financieros, como el factor de planta (FP). Este factor representa la relación entre la generación real del sistema y la generación máxima teórica en operación continua (CONAHCYT, s.f.).

Representado de la siguiente manera:

$$FP = \frac{\text{Energía anual}}{\text{Capacidad instalada} \times 8760}$$

$$FP = \frac{313.110}{248,5 \times 8760} = 14,38\%$$

El FP de 14,38% obtenido, se calculó a partir de la relación entre la energía anual proyectada del sistema, obtenida de la propuesta técnica del proveedor y la energía máxima teórica que podría generarse si el sistema operara continuamente a su capacidad instalada durante todo el año.

Esta capacidad instalada corresponde a la potencia nominal del sistema fotovoltaico, derivada del total de horas en un año de 8760, permitiendo establecer una base de comparación entre la generación real y el escenario ideal de operación continua.

En el caso de la inversión, se expresó en unidades de millones de dólares por megavatio (MMUS\$/MW), conforme a los requerimientos del modelo UPME. Por lo tanto, el valor del CAPEX fue tomado de la propuesta económica del proveedor en pesos colombianos y convertido a dólares utilizando la tasa representativa del mercado (TRM) de 3,689.97COP, valor normalizado dividiéndolo entre la capacidad instalada del sistema en megavatios, obteniendo un indicador comparable en términos de costo por unidad de capacidad instalada de 0,841/MMUS\$/MW.

Representado de la siguiente manera:

$$CAPEX = \frac{770.915.208}{TRM \times MW \times 10^6}$$

Así mismo, la renta líquida gravable se determinó a partir de la información financiera de la empresa, utilizando la utilidad reportada antes de los impuestos para el año 2024, la cual corresponde a \$2.338.801.724 COP. Este valor representa la base sobre la cual se aplican los

beneficios tributarios del proyecto dentro del modelo. De esta manera, siendo expresado en unidades requeridas por el simulador, este valor equivale a 2,31 MMUS\$.

Finalmente, los costos de operación y mantenimiento (O&M) del sistema fotovoltaico para la propuesta seleccionada SEB, fueron estimados como un porcentaje del costo de inversión inicial (CAPEX), adoptando un valor del 0,5% anual, acorde con referencias técnicas para sistemas de pequeña escala y bajos requerimientos de mantenimiento (IRENA, 2023).

Considerando una inversión total de 770.915.208 COP, el costo anual de O&M se calculó en 3.854.576 COP/año. Este valor contempla actividades rutinarias de operación, seguimiento y mantenimiento preventivo, tales como inspección general del sistema, limpieza de módulos, monitoreo del desempeño y verificación periódica de los equipos.

Para expresar este costo en función de la energía producida, se consideró la generación anual estimada del sistema, correspondiente a 313.110 kWh/año, equivalente a 313,11 MWh/año. Con base en ello, se obtuvo un costo de operación y mantenimiento de aproximadamente 12,31 COP/kWh, es decir, 12.311 COP/MWh.

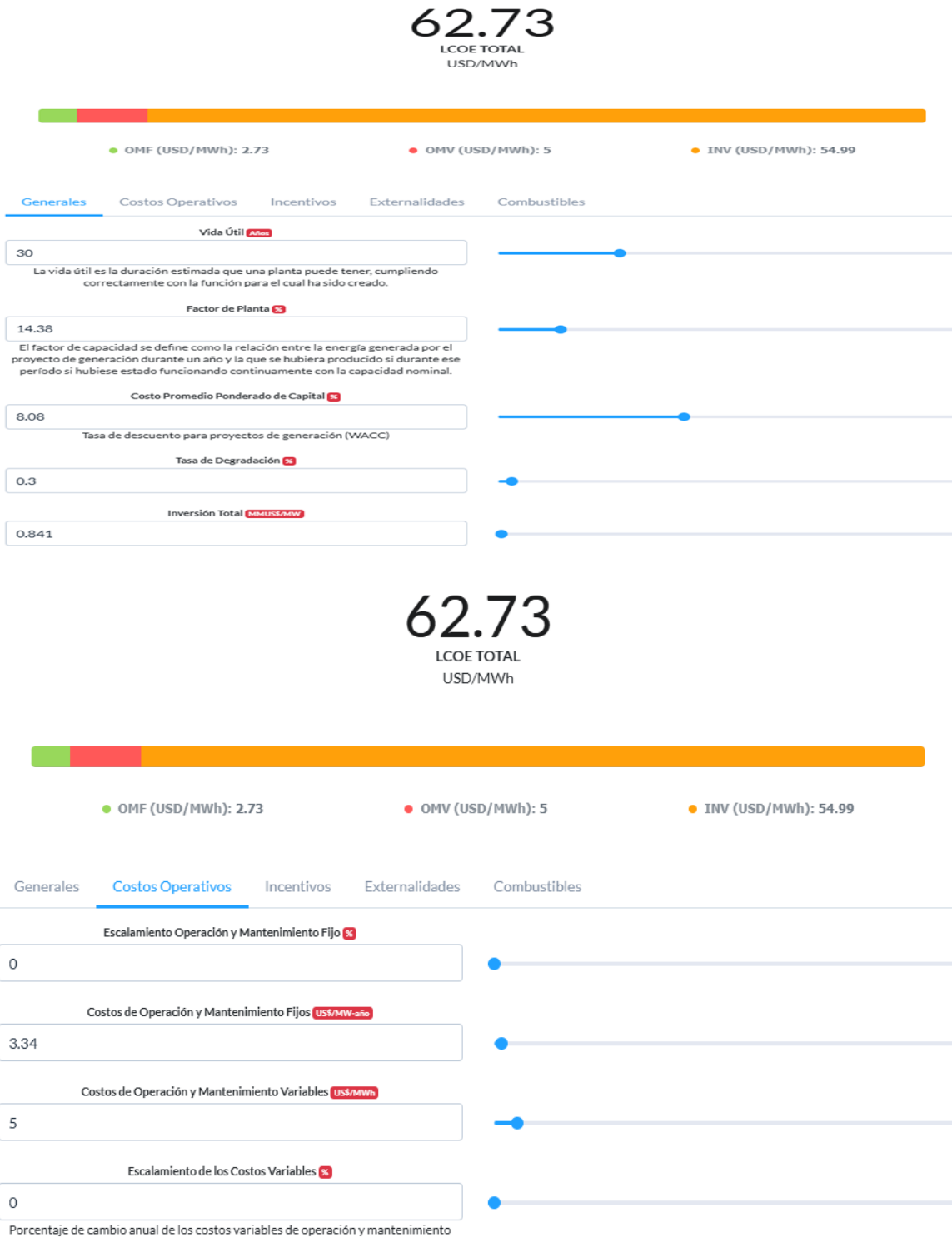
Finalmente, al convertir este valor utilizando una tasa de cambio de 3.689,97 COP/USD, el costo de O&M variable corresponde a aproximadamente 3,34 USD/MWh, expresado en estas unidades por requerimiento del modelo flexible de la UPME.

Este resultado se ubica en el rango bajo reportado para sistemas fotovoltaicos, lo cual es consistente con la escala del proyecto, su configuración tecnológica y los bajos requerimientos de mantenimiento (NREL,2018).

Entendiendo lo anterior y para efectos del modelo flexible, se obtuvieron los siguientes resultados para la determinación del LCOE por medio del modelo flexible de la UPME. Se adjunta evidencia de la parametrización en el simulador:

Figura 3.

Simulación del Costo Nivelado de Energía (LCOE) mediante el modelo flexibe de la UPME (2025).



62.73
LCOE TOTAL
USD/MWh



● OMF (USD/MWh): 2.73 ● OMV (USD/MWh): 5 ● INV (USD/MWh): 54.99

Generales Costos Operativos **Incentivos** Externalidades Combustibles

Metodo de depreciación Deducción Especial a la inversión Alcance de la deducción especial a la inversión

Opciones de depreciación

Método de depreciación: Línea recta

Periodo de depreciación (Años): 5

Valor de salvamento (%): 0
Porcentaje de la inversión total. El valor de salvamento es modelado al final de la vida útil del proyecto

Depreciación año 1 (%): 20

Depreciación año 2 (%): 20

Depreciación año 3 (%): 20

Depreciación año 4 (%): 20

Depreciación año 5 (%): 20

62.73
LCOE TOTAL
USD/MWh



● OMF (USD/MWh): 2.73 ● OMV (USD/MWh): 5 ● INV (USD/MWh): 54.99

Generales Costos Operativos **Incentivos** Externalidades Combustibles

Metodo de depreciación **Deducción Especial a la inversión** Alcance de la deducción especial a la inversión

Incentivos Tributarios

Deducción especial a la inversión año 1 (%): 0

Deducción especial a la inversión año 2 (%): 48

Deducción especial a la inversión año 3 (%): 0

Deducción especial a la inversión año 4 (%): 0

Deducción especial a la inversión año 5 (%): 0

Renta líquida gravable de la compañía sin el proyecto (MMUSD/MW): 2.31

62.73
LCOE TOTAL
USD/MWh



● OMF (USD/MWh): 2.73 ● OMV (USD/MWh): 5 ● INV (USD/MWh): 54.99

Generales Costos Operativos Incentivos **Externalidades** Combustibles

Escalamiento Impuesto CO2 %

0

Porcentaje de cambio anual del impuesto CO2

Escalamiento Impuesto SO2 %

0

Porcentaje de cambio anual del impuesto SO2

Escalamiento Impuesto NOx %

0

Porcentaje de cambio anual del impuesto NOx

62.73
LCOE TOTAL
USD/MWh



● OMF (USD/MWh): 2.73 ● OMV (USD/MWh): 5 ● INV (USD/MWh): 54.99

Generales Costos Operativos Incentivos Externalidades **Combustibles**

Escalamiento del Combustible %

0

Porcentaje de cambio anual del combustible

Tasa de Consumo del Combustible MBTU/MWh

0

Precio del Combustible Principal USD/MBTU

0

El resultado obtenido del modelo parametrizado de la UPME arroja un Costo Nivelado de Energía (LCOE) de 62,73 USD/MWh para la oferta de proyecto fotovoltaico seleccionado donde

este valor representa el costo unitario de generación de energía bajo las condiciones técnicas, financieras y tributarias específicas de la empresa Carlixplast.

En este sentido, al comparar el LCOE estimado con el costo actual de adquisición de energía desde la red, se observa que el costo de generación mediante el sistema fotovoltaico es inferior al precio pagado actualmente por la empresa. Esto implica que, por cada unidad de energía generada internamente, Carlixplast incurriría en un menor costo en comparación con el esquema tradicional de consumo, generando así un ahorro directo en su gasto energético.

Es importante señalar que este resultado se encuentra condicionado por un factor de planta del 14,38%, el cual refleja la relación entre la energía anual generada por el sistema (313.110 kWh) y la energía que se produciría si el sistema operara a plena capacidad durante las 8.760 horas del año. Este valor es consistente con las condiciones reales de operación de sistemas fotovoltaicos, caracterizados por generación intermitente dependiente de la radiación solar, lo cual incide directamente en el costo nivelado de la energía.

5. Discusión

El análisis de los resultados obtenidos permite confirmar que la implementación de un sistema fotovoltaico en Carlixplast S.A.S. es financieramente viable y consistente con los criterios de creación de valor definidos en el marco teórico.

A partir de la aplicación de la matriz de evaluación multicriterio, la propuesta de SEB se posicionó como la alternativa más favorable, resultado que se explica por su desempeño superior en la mayoría de los criterios económicos y financieros considerados en el modelo.

Es posible evidenciar que aunque SEB fue la propuesta categóricamente mejor, Social Solar presento un costo de inversión menor, sin embargo en indicadores de rentabilidad financiera resulta ligeramente inferior, explicando su menor puntaje total dentro de la matriz en consecuencia de la falta de gestión ante la UPME. Por lo que en la medida del acceso a los incentivos regulatorios se ajuste, podría ser también una alternativa relativamente igual de favorable para Carlixplast, que la de SEB.

En el caso de Innova Solar, aunque la propuesta presenta indicadores financieros positivos y un desempeño técnico competitivo, su puntaje total resulta menor dentro de la matriz debido principalmente a un mayor costo de inversión inicial y a la ausencia de gestión completa de incentivos regulatorios dentro de la propuesta evaluada. Estos factores reducen su desempeño relativo frente a las otras alternativas consideradas.

En conjunto, estos resultados evidencian que la propuesta de SEB no solo cumple los umbrales mínimos de decisión, sino que maximiza la generación de valor dentro del conjunto de alternativas analizadas.

Por otro lado, el resultado obtenido para el Costo Nivelado de la Energía (LCOE), estimado en aproximadamente 62,73 USD/MWh, evidencia una mejora sustancial en la competitividad del proyecto frente a escenarios previamente evaluados. Este valor se ubica dentro de rangos competitivos tanto a nivel internacional como en el contexto de sistemas fotovoltaicos industriales, lo cual refuerza la solidez financiera de la alternativa seleccionada.

Este valor se encuentra directamente influenciado por un factor de planta del 14,38%, que a pesar de solo impactar en el 22% de la necesidad energética de Carlixplast, sí logra posicionar este proyecto en la generación de energía con un costo competitivo dentro del contexto nacional, lo cual refuerza la viabilidad técnica del proyecto y valida su capacidad para sustituir parcialmente el consumo de energía de la red.

Entiendo lo anterior, dicho 22% desde la perspectiva operativa, implica una reducción directa en la dependencia de la red eléctrica y, en consecuencia una disminución en los costos operativos asociados al consumo de energía.

En términos de costo de generación, el sistema fotovoltaico presenta un Costo Nivelado de la Energía (LCOE) aproximado de 62,73 USD/MWh, equivalente a cerca de 231 COP/kWh bajo una tasa de cambio de 3.689,97 COP/USD. Este valor representa el costo real de producir energía a lo largo de la vida útil del proyecto y permite compararlo directamente con las tarifas del mercado eléctrico.

Desde una perspectiva económica, este nivel de LCOE implica que la empresa puede generar su propia energía a un costo significativamente inferior frente a las tarifas promedio del sector industrial en Colombia, que suelen oscilar entre 400 y 700 COP/kWh. En este contexto, el sistema fotovoltaico permite obtener un diferencial de ahorro aproximado de 170 a 470 COP por kWh generado, dependiendo de la tarifa de referencia utilizada.

Considerando la producción anual estimada del sistema (313.110 kWh), este diferencial se traduce en un ahorro económico anual que puede superar los 100 millones de COP, siendo consistente con el ahorro proyectado del modelo financiero (194.416.548 COP/año), el cual incorpora condiciones reales de consumo y costos energéticos de la empresa. Como consecuencia directa, el periodo de recuperación de la inversión se reduce de manera sustancial, pasando de

aproximadamente 5 años a cerca de 2 años y 1 mes, lo cual representa una disminución significativa del riesgo financiero y una aceleración en la generación de valor.

Este comportamiento evidencia que el LCOE obtenido no solo valida la competitividad del proyecto, sino que también refleja su capacidad de generar ahorros estructurales en el costo de la energía, permitiendo a la empresa estabilizar sus gastos operativos frente a la volatilidad del mercado eléctrico.

Adicionalmente, al incorporar los beneficios tributarios asociados a la normativa vigente (UPME) incluidos por SEB en su propuesta, el proyecto experimenta una mejora significativa en su desempeño financiero. En este escenario, se estima un retorno equivalente al 48% de la inversión inicial, correspondiente a 370.039.300 COP, lo que reduce el CAPEX neto del proyecto a aproximadamente 400.875.908 COP.

Como consecuencia directa, el periodo de recuperación de la inversión se reduce de manera sustancial, pasando de aproximadamente 5 años a cerca de 2 años y 1 mes, lo cual representa una disminución significativa del riesgo financiero y una aceleración en la generación de valor.

Además el nivel de LCOE fortalece la proyección de ahorro anual, pues la propuesta de SEB proyecta un ahorro anual de 194.416.548 COP, el valor más alto entre las alternativas evaluadas. Que traducido a la expectativa de payback descontado, se podría esperar que en el tiempo aproximado de 5 años para recuperar la inversión, Carlixplast hubiera generado un ahorro anual de 972.082.740 COP, lo que significa un 26,7% a favor de la empresa aún después de recuperar la inversión inicial.

En términos de costo de generación, el sistema fotovoltaico presenta un Costo Nivelado de la Energía (LCOE) aproximado de 62,73 USD/MWh, valor que se posiciona como altamente competitivo frente al costo de adquisición de energía desde la red eléctrica en el contexto industrial

colombiano. Este nivel de costo refleja una estructura eficiente del proyecto y permite evidenciar que la autogeneración no solo es viable, sino económicamente atractiva. Considerando la generación anual estimada del sistema (313.110 kWh), este diferencial de costo se traduce en un ahorro sostenido a lo largo de la vida útil del proyecto.

Bajo una expectativa de operación de 30 años, la energía total generada alcanzaría aproximadamente 9.393.300 kWh, lo que permite dimensionar el impacto económico acumulado del sistema. En este sentido, el ahorro anual proyectado de 194.416.548 COP implicaría un beneficio económico acumulado cercano a 5.832.496.440 COP durante la vida útil del proyecto

Este resultado evidencia que, más allá de la recuperación de la inversión inicial, el sistema fotovoltaico actúa como un mecanismo de generación de valor sostenido, permitiendo a la empresa producir energía a un costo estable y predecible frente a un entorno caracterizado por la volatilidad tarifaria. En consecuencia, el LCOE no solo valida la competitividad del proyecto en términos de costo unitario de generación, sino que también permite dimensionar el impacto económico de largo plazo asociado a la autogeneración.

Cabe resaltar que, aunque algunas alternativas presentan ventajas puntuales como un menor CAPEX o una mayor cobertura del consumo, estas no compensan el desempeño superior de la propuesta de SEB en términos de rentabilidad, generación de valor y recuperación de la inversión, lo cual justifica su selección final.

En consecuencia, la implementación del sistema fotovoltaico no debe entenderse solo como una inversión en infraestructura energética, sino como una estrategia de optimización financiera y posicionamiento competitivo en el largo plazo.

Adicionalmente junto con los beneficios económicos directos asociados a la reducción del consumo de energía de la red, la implementación del sistema fotovoltaico genera impactos

positivos en términos ambientales, particularmente en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

En este sentido, la generación anual estimada del sistema implica una reducción significativa en la huella de carbono de la empresa, al sustituir parcialmente energía proveniente de fuentes convencionales del sistema eléctrico.

Lo que más allá del beneficio ambiental directo, este resultado adquiere relevancia en el contexto de los mercados de carbono, en los cuales la reducción de emisiones puede convertirse en un activo económico, pues a nivel internacional, existen mecanismos mediante los cuales países o empresas con altas emisiones compensan su impacto financiando proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo, como Colombia.

Estos esquemas se materializan a través de instrumentos como los bonos o créditos de carbono, que representan reducciones verificadas de emisiones y pueden ser comercializados en mercados voluntarios o regulados; pues de acuerdo con el World Bank en 2023, los mercados de carbono se han consolidado como una herramienta clave para canalizar inversión hacia proyectos de energía renovable en economías emergentes, permitiendo que iniciativas como la autogeneración solar generen beneficios adicionales más allá del ahorro energético.

En el caso colombiano, si bien el mercado de carbono aún se encuentra en desarrollo, el país participa activamente en esquemas de mitigación climática y cuenta con potencial para la generación de créditos de carbono asociados a proyectos de energías renovables. Donde, según la International Energy Agency (2023), este tipo de mecanismos permite que empresas en países en desarrollo reciban compensaciones económicas por la reducción de emisiones, lo que puede mejorar la rentabilidad de proyectos sostenibles.

Por lo tanto, aunque este beneficio no fue incorporado directamente en el modelo financiero del presente estudio, representa un potencial de valorización adicional del proyecto, el cual podría traducirse en ingresos futuros o en ventajas competitivas asociadas a sostenibilidad y cumplimiento de estándares ambientales.

6. Conclusiones

En primer lugar, la revisión de la literatura permitió establecer un marco conceptual, técnico y normativo sólido para la evaluación de proyectos de autogeneración solar en el sector industrial.

Análisis que logro evidenciar que la implementación de sistemas fotovoltaicos en Colombia está respaldada por un conjunto de incentivos tributarios, lineamientos regulatorios y criterios técnicos ampliamente documentados, los cuales no solo facilitan su adopción, sino que impactan de manera directa la rentabilidad de los proyectos. De igual manera, se demostró que la evaluación de este tipo de inversiones debe fundamentarse en criterios de creación de valor, diferenciándolos claramente de parámetros técnicos que, si bien son necesarios, no determinan por sí mismos la decisión de inversión.

Por consiguiente, el análisis de las condiciones energéticas, técnicas y económicas de Carlixplast S.A.S. permitió establecer que la empresa presenta un entorno altamente favorable para la implementación de un sistema fotovoltaico y su perfil de consumo energético, caracterizado por una demanda elevada y operación predominantemente diurna, junto con la disponibilidad de área

útil y las condiciones de radiación solar en el departamento de Santander, configuran un escenario óptimo para la autogeneración.

Desde el punto de vista económico, la estructura tarifaria de la empresa y su nivel de consumo consolidan el potencial de generación de ahorros significativos, lo que confirma la factibilidad integral del proyecto.

De igual manera, la estimación de los parámetros financieros y la aplicación de criterios decisorios permitieron demostrar, de manera cuantitativa, la viabilidad económica del proyecto, pues la construcción de un modelo financiero unificado, junto con la aplicación de indicadores financieros, justifican que la alternativa seleccionada no solo cumpla con los umbrales mínimos de aceptación, sino que genere valor económico para la empresa; alternativa que en conjunto con el cálculo del LCOE permite validar que la generación del sistema fotovoltaico sea competitivo frente al costo de adquisición de energía de la red.

En conclusión, a partir de los resultados obtenidos, se concluye que la implementación de un sistema fotovoltaico en Carlixplast S.A.S. constituye una decisión estratégica que trasciende el ámbito energético, al convertirse en un mecanismo de optimización financiera. Por lo tanto, el proyecto aporta beneficios ambientales relevantes, al contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, con potencial de valorización futura mediante mecanismos como los mercados de carbono. Y que por consiguiente, la adopción de este tipo de soluciones posiciona a la empresa no solo en términos de eficiencia económica, sino también en línea con tendencias globales de sostenibilidad y transición energética, fortaleciendo su competitividad en el largo plazo.

Referencias Bibliográficas

- Agudelo, A. O., Arango-Manrique, L. I., & Ospina, J. A. P. (2021). *Ranking the barriers to the development of the renewable energy technologies in Colombia*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/357284109_Ranking_the_barriers_to_the_development_of_the_renewable_energy_technologies_in_Colombia
- Alcaldía Mayor de Bogotá, D. C. (2016). Tipo de norma + número de la norma de año. Título de la norma. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=144187>
- Belton, V., & Stewart, T. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer.
- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of corporate finance* (13th ed.). McGraw-Hill Education.
- BUN-CA. (2002). *Manual sobre energía renovable: Solar fotovoltaica* (1ª ed.). Programa de Asistencia Técnica en Energía Renovable para Centroamérica. 5. SEAS,
- Cámara de Comercio de Bucaramanga [CCB]. (2023). *Nacimiento de la transición energética: SANTANDER, CLAVE EN LA TRANSICIÓN*. <https://www.camaradirecta.com/revista-directa/el-nacimiento-de-la-transicion-energetica>
- Cámara de Comercio de Bucaramanga [CCB]. (2023). *Nacimiento de la transición energética: SANTANDER, CLAVE EN LA TRANSICIÓN*. <https://www.camaradirecta.com/revista-directa/el-nacimiento-de-la-transicion-energetica>
- Castaño-Gómez, Manuela, & García-Rendón, John Jairo. (2020). Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia. *Lecturas*

- de Economía*, (93), 23-64. Epub April 07, 2021.
<https://doi.org/10.17533/udea.le.n93a338727>
- Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014 — Por la cual se regulan los incentivos para el desarrollo de las fuentes no convencionales de energía*.
https://cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/ley_1715_2014.htm?utm_source
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). (s.f.). *Factor de planta*. <https://energia.conahcyt.mx/planeas/electricidad/factor-planta>
- Damodaran, A. (2012). *Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset* (3rd ed.). Wiley.
- Damodaran, A. (2023). *Applied corporate finance* (5th ed.). John Wiley & Sons
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2015). *Decreto 1083 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector de Función Pública*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=64682>
- Echevarría Gómez, M. C., Pérez Gutiérrez, R., Vega García, Y., & Muñoz Hidalgo, A. R. (2025). Innovación social: un camino hacia la transformación energética de comunidades rurales. *Uniandes Episteme*, 12(1), 114–127.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=564679988010>
- Gómez, C., & Cárcel-Carrasco, J. (2019). Elección de sistemas de gestión para el mantenimiento, rehabilitación y eficiencia energética de edificios. 3C Empresa. *Investigación y pensamiento crítico*, (8), 12–63. <https://doi.org/10.17993/3cemp.2019.080339.12-63>
- Greco, S., Ehrgott, M., & Figueira, J. (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer.

- Grupo San Valero. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. SEAS Estudios Abiertos.
- Hamada, R. S. (1972) The effect of the firm's capital structure on the systematic risk of common stocks. *The Journal of Finance*, 27(2), 435–452. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1972.tb00971.x>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Gaining an edge: The role of energy efficiency in enhancing competitiveness*. IEA.
- International Energy Agency. (2020). *Projected costs of generating electricity 2020*. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- International Energy Agency. (2020). *Trends in photovoltaic applications 2020*. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/10/IEA-PVPS_Trends_Report_2020.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-power-generation-costs-in-2023>
- International Renewable Energy Agency. (2021). *Renewable power generation costs in 2020*. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29.
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs*. Cambridge University Press.

- Ken Research. (2023). *Colombia Renewable Energy Market | 2019–2030 | Market Challenges*.
<https://www.kenresearch.com/colombia-renewable-energy-market>
- López, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberländer, N., & Oei, P.-Y. (2020). Solar PV generation in Colombia – A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1266-1279.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Malefaki, S., Markatos, D., Filippatos, A., & Pantelakis, S. (2025). A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods and normalization techniques in holistic sustainability assessment for engineering applications. *Aerospace*, 12(2), 100.
<https://www.mdpi.com/2226-4310/12/2/100>
- Milkes, I. S. (2025). Transformación de la matriz energética en Colombia: Hacia una transición sostenible y responsable. *Cuadernos de Derecho Regulatorio*, 3, 87–98.
<https://www.revistasmarcialpons.es/index.php/cuadernosdederechoregulatorio/article/view/irit-transformacion-de-la-matriz-energetica-en-colombia>
- Ministerio de Minas y Energía [MinEnergía]. (2022). *Plan Energético Nacional 2022–2050*.
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2026, 4 de marzo). *Gobierno ordena devolver más de \$150 mil millones a usuarios de gas natural por cobros adicionales en transporte*.
<https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/gobierno-ordena-devolver-mas-de-150-mil-millones-a-usuarios-de-gas-natural-por-cobros-adicionales-en-transporte/>
- Morgan J.P. (2023). *Emerging Markets Bond Index (EMBI) methodology*.

- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). *Cambiar por:*
https://www.researchgate.net/publication/327778934_System_advisor_model_SAM_simulation_modelling_of_a_concentrating_solar_thermal_power_plant_with_comparison_to_actual_performance_data
- National Renewable Energy Laboratory. (2018). *Best practices in photovoltaic system operations and maintenance (O&M)*. U.S. Department of Energy.
<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73822.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory. (2018). *Best practices in photovoltaic system design and installation*. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73822.pdf>
- Petrichenko, L., Mutule, A., Hlusovs, S., Zarins, R., Novosads, P., & Diahovchenko, I. (2026). Multi-Criteria Decision Analysis Framework for Evaluating Tools Supporting Renewable Energy Communities. *Sustainability*, 18(1), 29. <https://www.mdpi.com/2071-1050/18/1/29>
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Prosantander. (2025). *Transición energética con visión territorial: Santander*.
https://prosantander.org/wp-content/uploads/2025/12/VF_TRANSICION-ENERGETICA-CON-VISION-TERRITORIAL.pdf
- Ross, S. A., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2022). *Corporate finance* (13th ed.). McGraw-Hill Education.
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6.ª ed.). McGraw-Hill

- Superintendencia Financiera de Colombia [SFC]. (2021). *Taxonomía Verde Colombiana: Guía para la financiación sostenible*.
<https://www.superfinanciera.gov.co/publicaciones/10109182/industrias-supervisadasfinanzas-sosteniblestaxonomiase-taxonomia-verde-de-colombia-10109182/>
- Superintendencia Financiera de Colombia [SFC]. (2021). *Taxonomía Verde Colombiana: Guía para la financiación sostenible*.
<https://www.superfinanciera.gov.co/publicaciones/10109182/industrias-supervisadasfinanzas-sosteniblestaxonomiase-taxonomia-verde-de-colombia-10109182/>
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer.
- Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. CRC Press. Boca Raton, FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11032>
- U.S. Energy Information Administration. (2024). *Capacity factor*.
https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Capacity_factor
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2023). *Análisis del potencial de autogeneración en el sector industrial colombiano*.
https://www1.upme.gov.co/Documents/Autogeneracion_Sector_Industrial_Comercial.pdf
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2025). *Plan indicativo de expansión de la generación eléctrica 2025–2039*. Ministerio de Minas y Energía.
https://docs.upme.gov.co/SIMEC/Energia%20Electrica/PIEG/2025-2039/Plan_Generacion_2025-2039.pdf

- Vitola Herrera, H. F. (2022). *Estudio de factibilidad para la construcción de sistemas de energía solar fotovoltaica en la zona rural de San José de Uré, Córdoba* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making*.
- World Bank. (2023). *Colombia can reach its ambitious climate goals and boost economic growth*.
<https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/07/24/colombia-puede-alcanzar-sus-ambiciosas-metas-climaticas-y-aumentar-su-crecimiento>
- Wüstenhagen, R., & Menichetti, E. (2012). Strategic choices for renewable energy investment: Conceptual framework and opportunities for further research. *Energy Policy*, 40, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.050>