

Revisión sistemática de técnicas y herramientas para la mejora simultánea de la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético Colombiano: Aplicación en la empresa Celsia.

Jeily Camila Amorocho Carvajal

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniería Industrial

Director

Edna Rocío Bravo Ibarra

Doctora en Administración de Empresas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2026

### Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía espiritual y fortaleza en los momentos de mayor desafío, permitiéndome culminar esta etapa con sabiduría y perseverancia.

A mis padres, Vidal Enrique Amorocho y Doris Cecilia Carvajal, por ser el motor de mi vida. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro es el reflejo de la educación y los valores que sembraron en mí.

A mi novio, **Nicolas Portala**, quien me acompaña y animo en gran parte de este proceso demostrando su paciencia infinita hacia mi brindándome motivación constante para seguir adelante.

A mis perros, **Tuco y Broky**, compañeros fieles en mis largas noches de estudio, por ser mi refugio en los momentos de cansancio y mi mayor fuerte de amor al estar lejos de casa; Mi Broky que ya no está, pero vive para siempre en mi corazón, en cada recuerdo y en cada instante de amor que me regalo.

Y a mí misma, por la disciplina, la resiliencia y la convicción de que con esfuerzo todo es posible.

### **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron a la materialización de este proyecto:

A la **Universidad Industrial de Santander**, por brindarme un espacio de excelencia académica y formación integral que me ha permitido crecer como profesional y ser humano.

A mi directora de proyecto, **Ph.D. Edna Rocío Bravo Ibarra**, por su rigurosidad académica, su orientación experta y por retarme constantemente a elevar la calidad de esta investigación. Su visión fue fundamental para estructurar este trabajo.

A mi tutora, **Ing. Ingrid Mariana Castellanos Estévez**, por su acompañamiento constante, sus valiosas correcciones y su disposición para guiarme en los aspectos metodológicos y técnicos del desarrollo del libro.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Planteamiento del problema.....	18
1.1. Formulación de la pregunta de investigación .....	20
1.2. Objetivos.....	21
1.2.1. Objetivo general.....	21
1.2.2 Objetivos específicos .....	21
1.3. Cumplimiento de objetivos.....	21
2. Marco referencial.....	23
2.1 Marco de antecedentes.....	23
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	23
2.1.2 Antecedentes nacionales .....	26
2.2 Marco teórico.....	29
2.2.1. Eficiencia operativa en el sector energético.....	29
2.2.2. Innovación en organizaciones energéticas.....	30
2.2.3. Ambidestreza organizacional: gestión simultánea de eficiencia e innovación.....	31
2.2.4. Digitalización como habilitador de gestión dual .....	32
2.2.5. Contexto de transición energética y capacidades dinámicas .....	33
3. Metodología .....	36
3.1 Enfoque de la investigación.....	36
3.2. Tipo de investigación.....	36
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información .....	37
3.4. Técnicas de análisis de la información .....	37

3.5. Procedimiento .....	38
3.5.1. Evaluación de calidad de los artículos .....	41
4.Resultados .....	44
4.1. Tendencias de la literatura .....	44
4.2. Análisis bibliométrico .....	45
4.1.1. Co-ocurrencia de palabras clave .....	45
4.1.2. Análisis bibliométrico: Co-autoría.....	48
4.3. Análisis preliminar de la literatura.....	51
4.3.1. Técnicas globales para la mejora simultánea de eficiencia e innovación .....	51
4.3.2. Desafíos operativos y de innovación en el sector energético colombiano.....	54
4.3.3. Estrategias de innovación implementadas en Colombia.....	55
4.3.4. Marco de política pública, regulación y actuación empresarial en Colombia .....	58
4.4. Hallazgos del análisis bibliométrico y tendencias globales .....	60
4.5 Caracterización técnica de herramientas para la mejora simultánea .....	62
4.5.1. Digitalización y automatización de procesos.....	63
4.5.2. Tecnologías de gestión de activos distribuidos (BESS y microredes).....	64
4.5.3. Modelos de negocio servitizados y transferencia de riesgo .....	65
4.6. Evaluación de la aplicabilidad en el contexto estratégico de Celsia S.A. E.S.P.....	66
4.6.1. Alineación con la estrategia corporativa dual .....	67
4.6.2. Materialización de la digitalización: el programa 'ReimaginarC' .....	67
4.6.3. Innovación en modelos de negocio: la spin-off Atera .....	69
4.6.4. Gestión de la intermitencia: almacenamiento y transmisión .....	69
4.7 Matriz de evaluación de aplicabilidad y síntesis de hallazgos.....	70
4.7.1. Visualización de resultados.....	71

4.8. Síntesis del capítulo de resultados .....	73
5. Discusión de resultados.....	75
6. Conclusiones .....	78
6.1 Limitaciones de la investigación.....	81
7. Recomendaciones .....	83
7.1. Recomendaciones para la estrategia corporativa de Celsia S.A. E.S.P. ....	83
7.2. Recomendaciones para el sector y la regulación energética .....	84
7.3. Recomendaciones para futuras investigaciones.....	84
Referencias Bibliográficas .....	86
Apéndices	100

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Relación de cumplimiento de objetivos específicos y ubicación en el documento .....	22
<b>Tabla 2.</b> Criterios de inclusión y exclusión para la RSL.....	39
<b>Tabla 3.</b> Comparativa estructural entre el modelo energético tradicional y el modelo servitizado (EaaS).....	66
<b>Tabla 4.</b> Matriz de evaluación de aplicabilidad de tecnologías para la eficiencia e innovación en el sector energético colombiano.....	70

**Lista de figuras**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Resultado de la búsqueda filtrada en Scopus (2020-2025) .....	40
<b>Figura 2.</b> Mapa de co-ocurrencia de palabras clave del autor (Scopus, 2020-2025) .....	46
<b>Figura 3.</b> Producción científica por año (2020-2025) .....	48
<b>Figura 4.</b> Distribución por tipo de documento .....	49
<b>Figura 5.</b> Mapa de co-autoría (Scopus, 2020-2025, autores con $\geq 2$ documentos) .....	50
<b>Figura 6.</b> Representación esquemática de la estructura temática del campo de investigación. ...	62
<b>Figura 7.</b> Impacto de la automatización en tiempos operativos y administrativos (Caso AES Colombia).....	64
<b>Figura 8.</b> Mecanismo de compensación de costos mediante eficiencias operativas .....	68
<b>Figura 9.</b> Modelo de ecosistema de eficiencia operativa e innovación.....	72
<b>Figura 10.</b> Matriz de priorización tecnológica según madurez y viabilidad local .....	73

**Lista de apéndices**

	<b>Pág.</b>
<b>Apéndice A.</b> Artículo de Investigación derivado .....	100

## Glosario

**Ambidestreza organizacional:** capacidad de una organización para gestionar eficientemente las operaciones actuales (explotación) mientras simultáneamente se adapta a los cambios del entorno y desarrolla nuevas oportunidades (exploración).

**Automatización Robótica de Procesos (RPA):** tecnología de software que utiliza robots o bots para automatizar tareas digitales repetitivas y basadas en reglas, permitiendo reducir tiempos operativos y minimizar errores humanos en procesos administrativos.

**Bibliometría:** método de análisis cuantitativo que utiliza herramientas estadísticas y matemáticas para medir la producción, impacto y tendencias de la literatura científica en un campo de estudio específico.

**Capacidades dinámicas:** habilidad de una empresa para integrar, construir y reconfigurar competencias internas y externas con el fin de responder rápidamente a entornos cambiantes.

**Contradicción sistémica:** tensión operativa inherente en organizaciones que deben cumplir objetivos opuestos simultáneamente, como la necesidad de estabilidad para la eficiencia versus la variabilidad requerida para la innovación.

**Digitalización profunda:** integración avanzada de tecnologías digitales en el núcleo de las operaciones empresariales, transformando no solo los procesos, sino el modelo de negocio y la toma de decisiones basada en datos.

**Eficiencia operativa:** capacidad de una organización para maximizar el rendimiento de sus activos y recursos, minimizando costos, tiempos y desperdicios en sus procesos productivos y administrativos.

**Energy as a Service (EaaS):** modelo de negocio en el cual el proveedor ofrece soluciones energéticas integrales (como iluminación o climatización) cobrando por el desempeño o servicio prestado, en lugar de vender la energía como un *commodity* o el equipo físico.

**Gemelos digitales (Digital Twins):** representación virtual dinámica de un activo, proceso o sistema físico que permite simular su comportamiento en tiempo real para optimizar su operación y predecir fallas.

**Recursos Energéticos Distribuidos (DER):** pequeñas unidades de generación o almacenamiento de energía (como paneles solares o baterías) ubicadas cerca del punto de consumo, que descentralizan la producción energética.

**Sistemas de Almacenamiento de Energía (BESS):** *Battery Energy Storage Systems*. Infraestructura tecnológica diseñada para almacenar energía eléctrica en baterías y liberarla cuando el sistema lo requiere, proveyendo servicios de regulación de frecuencia y soporte de voltaje.

**Tensión operativa:** conflicto estratégico que surge al intentar equilibrar la estandarización necesaria para la eficiencia de costos con la flexibilidad requerida para la innovación y adaptación tecnológica.

## Resumen

**Título:** Revisión sistemática de técnicas y herramientas para la mejora simultánea de la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético Colombiano: Aplicación en la empresa Celsia.

**Autor:** Jeily Camila Amorocho Carvajal

**Palabras clave:** Eficiencia operativa, innovación, ambidestreza organizacional, sector energético, transición energética, digitalización.

**Descripción:** Esta investigación aborda la tensión operativa no resuelta en el sector energético colombiano, definida por una contradicción sistémica: la exigencia de estandarización para la eficiencia de costos choca con la necesidad de flexibilidad para la innovación en la transición energética. Ante la gestión fragmentada de estas variables, el objetivo general fue identificar las técnicas implementadas en el país para resolver esta tensión y evaluar su aplicabilidad en Celsia S.A. E.S.P. La metodología siguió un enfoque mixto, integrando una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) bajo protocolo PRISMA sobre un corpus de 923 documentos científicos (con filtrado por criterios de calidad) y un estudio de caso validado mediante el análisis de los reportes corporativos del periodo 2020-2025. Los resultados evidenciaron que, aunque la literatura global presenta una fragmentación teórica, la evidencia empírica en Celsia demostró que la digitalización profunda (RPA y Centro NOVA) generó ahorros operativos de 165.000 millones de COP. Estos recursos validaron un mecanismo de financiación cruzada donde la eficiencia operativa (PermaneC) sostiene la inversión en innovación (EnergizarC). Se concluye que la eficiencia opera como el habilitador financiero de la innovación, resolviendo la contradicción inicial mediante modelos de negocio servitizados y de rotación de activos fortaleciendo la competitividad, sostenibilidad y resiliencia organizacional

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de ingeniería físico macacina. Escuela de estudios industriales y empresariales  
Director:Edna Rocio Bravo Ibarra . Doctora en Administración de Empresas

## Abstract

**Title:** Systematic review of techniques and tools for the simultaneous improvement of operational efficiency and innovation in the Colombian energy sector: Application in the company Celsia.

**Author:** Jeily Camila Amorocho Carvajal

**Keywords:** Operational efficiency, innovation, organizational ambidexterity, energy sector, energy transition, digitalization.

**Description:** This research addresses the unresolved operational tension in the Colombian energy sector, defined by a systemic contradiction: the requirement for standardization to achieve cost efficiency conflicts with the need for flexibility to drive innovation during the energy transition. Given the fragmented management of these variables, the general objective was to identify the techniques implemented in the country to resolve this tension and evaluate their applicability to Celsia S.A. E.S.P. The methodology followed a mixed-methods approach, integrating a Systematic Literature Review (SLR) under the PRISMA protocol on a corpus of 923 scientific documents (filtered by quality criteria) and a case study validated through the analysis of corporate reports from the 2020-2025 period. The results revealed that, although global literature presents theoretical fragmentation, empirical evidence at Celsia demonstrated that deep digitalization (RPA and NOVA Center) generated operational savings of COP 165,000 million. These resources validated a cross-financing mechanism where operational efficiency (*PermaneC*) sustains investment in innovation (*EnergizarC*). It is concluded that efficiency operates as the financial enabler of innovation, resolving the initial contradiction through servitized business models and asset rotation. Strengthening competitiveness, sustainability, and comprehensive strategic organizational resilience.

\*Degree Work

\*\*Faculty of Physical and Mathematical Engineering. School of Industrial and Business Studies.  
Director: Edna Rocio Bravo Ibarra . Doctor of Business Administration

## Introducción

El sector energético a nivel mundial atravesó durante el periodo de estudio una etapa de transformación acelerada y estructural, impulsada por la imperiosa necesidad de avanzar hacia la descarbonización de las matrices productivas y la sostenibilidad ambiental a largo plazo. En dicho escenario global, tal como lo documentaron extensamente Borowski (2021) y Ahmad et al. (2021), las organizaciones energéticas se enfrentaron a una exigencia estratégica dual de alta complejidad: por un lado, debían optimizar su eficiencia operativa existente para mantener la competitividad en costos; y por otro, se vieron obligadas a desarrollar capacidades de innovación orientadas a la adopción de tecnologías emergentes y nuevos modelos de negocio. Frente a este reto, la digitalización emergió como un habilitador determinante, al ofrecer instrumentos avanzados como la inteligencia artificial, el análisis de datos masivos (Big Data), el internet de las cosas (IoT) y los gemelos digitales para gestionar la complejidad técnica y organizacional inherente a esta transición.

Colombia no fue ajena a esta dinámica de cambio global. El país enfrentó retos energéticos propios y significativos, marcados por un crecimiento sostenido de la demanda eléctrica y una presión consecuente sobre la infraestructura existente. Las investigaciones y proyecciones de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) indicaron un aumento anual promedio de la demanda, tendencia que incrementó la exigencia sobre la optimización de activos y la confiabilidad del suministro. Como respuesta institucional, el marco de política pública nacional priorizó la transición energética y la modernización del sector, buscando articular la productividad con la innovación tecnológica, lineamientos que quedaron establecidos en documentos rectores como el CONPES 4075 y la Hoja de Ruta de Transición Energética Justa.

No obstante, la adopción efectiva de estas mejoras conjuntas en el territorio nacional encontró barreras tecnológicas, económicas y regulatorias específicas. En el plano tecnológico, autores como Giraldo et al. (2021) y Parra et al. (2024) reportaron la persistencia de sistemas heredados y rezagos en las capacidades digitales de las empresas locales. En paralelo, el marco regulatorio y los incentivos, supervisados por entidades como la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG, 2022, 2024a), presentaron desafíos en su interpretación que condicionaron las decisiones de inversión en modelos híbridos de operación.

Al analizar el contexto específico de empresas representativas del sector como Celsia S.A. E.S.P., se evidenció que, a pesar de los esfuerzos individuales por incorporar nuevas tecnologías, existía una carencia estructural en la gestión integrada de estos procesos. El vacío metodológico identificado trascendió la simple ausencia de un marco sistemático; su raíz se encontró en la existencia de una tensión operativa no resuelta entre la eficiencia, que por naturaleza exige estandarización, control de variabilidad y estabilidad de procesos, y la innovación, que por el contrario demanda experimentación, flexibilidad y tolerancia al error. Las herramientas tradicionales utilizadas en el contexto colombiano gestionaban estas variables de manera aislada o fragmentada, lo que generó fallos sistémicos al intentar su integración simultánea. Dicha falta de sistematización limitó la capacidad de las organizaciones para navegar la complejidad de la transición energética, provocando escenarios donde las iniciativas de eficiencia restringían involuntariamente el potencial innovador, afectando el desempeño y la competitividad organizacional.

Bajo esta perspectiva, la pertinencia de la presente investigación se justifica en la necesidad práctica de proporcionar una base conceptual sólida y una ruta metodológica que orientara la toma de decisiones estratégicas en Celsia y otras compañías del sector, con una mirada orientada a la

implementación y viabilidad real. Desde una dimensión teórica, el estudio aspiró a generar aportes al conocimiento mediante la síntesis y el análisis crítico de la intersección específica entre eficiencia operativa e innovación en el contexto energético nacional, un nicho donde la literatura previa, si bien documentaba estrategias aisladas como las analizadas por Cerón et al. (2025) o Beltrán-Gallego et al. (2023), evidenciaba una dispersión significativa.

Sumado a lo anterior, este trabajo contribuye al campo de la ingeniería industrial al aplicar herramientas de revisión sistemática para estructurar un conocimiento aplicable que respondió a las exigencias de competitividad y sostenibilidad del mercado actual. A partir de esta necesidad, se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera pueden aplicarse en el contexto estratégico de Celsia S.A. E.S.P. las técnicas y herramientas que permiten incrementar simultáneamente la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético colombiano?

Para dar respuesta a este interrogante y cubrir el vacío detectado, se estableció como objetivo general identificar, a partir de una revisión sistemática de la literatura académica reciente, las técnicas, métodos y herramientas implementadas por empresas del sector energético en Colombia para incrementar simultáneamente la eficiencia operativa y la innovación, con el fin ulterior de analizar su aplicabilidad en el caso específico de Celsia S.A. E.S.P. Este objetivo se articuló con la necesidad de superar la adopción fragmentada de prácticas, proponiendo una lectura integrada que considerara las restricciones tecnológicas y regulatorias propias del sector.

En cuanto a la ruta metodológica, el estudio se desarrolló bajo un enfoque mixto con alcance exploratorio y descriptivo. En primer lugar, se realizó la revisión sistemática (RSL) para localizar tendencias globales; seguido de la evaluación de aplicabilidad en el contexto de Celsia S.A. E.S.P. mediante matrices de factibilidad; y por último, se elaboró un artículo de carácter publicable (disponible en el Anexo A) que sintetiza los hallazgos y da cumplimiento al objetivo

de difusión. Para orientar la lectura, el documento se estructura en siete capítulos: el Capítulo 1 presenta las generalidades; el Capítulo 2 expone el marco referencial; el Capítulo 3 detalla la metodología; el Capítulo 4 integra los resultados de la revisión bibliométrica y del caso aplicado; seguido de la Discusión (Capítulo 5), Conclusiones (Capítulo 6) y Recomendaciones (Capítulo 7).

## 1. Planteamiento del problema

El análisis preliminar de la literatura revela un panorama dinámico y complejo en el sector energético, tanto a nivel global como específicamente en Colombia. Investigaciones como las de Borowski (2021) y Ahmad et al. (2021) evidencian una tendencia mundial hacia la adopción de tecnologías digitales avanzadas (IA, IoT, gemelos digitales) para buscar mejoras conjuntas en eficiencia operativa e innovación. No obstante, la implementación efectiva de estas estrategias enfrenta barreras considerables, como lo detallan los estudios específicos sobre el contexto colombiano.

Actualmente en Colombia, la crisis energética emerge como un desafío apremiante que afecta el suministro eléctrico, situación derivada de factores climáticos y del crecimiento sostenido de la demanda. Esta tensión deriva de factores climáticos y, de manera notable, del crecimiento sostenido de la demanda energética, una presión confirmada por las proyecciones de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) que anticipan un aumento anual promedio del 2,38% entre 2025 y 2038. Dicha perspectiva pone en evidencia la necesidad urgente de optimizar la infraestructura y las operaciones existentes.

Este escenario impulsa una transformación profunda en el sector, marcada por la necesidad de responder simultáneamente a retos ambientales, económicos y tecnológicos. Las empresas del sector enfrentan la exigencia dual de mejorar su eficiencia operativa actual mientras desarrollan la capacidad de innovar en procesos, tecnologías y modelos de negocio para adaptarse a la transición energética y la digitalización. La literatura colombiana confirma estos retos; Giraldo et al. (2021) y Parra et al. (2024), por ejemplo, señalan barreras tecnológicas como sistemas heredados y lenta adopción digital.

Empresas como Celsia S.A. E.S.P., donde se aplicará este estudio, participan activamente en la cadena de valor energética y buscan adoptar nuevas tecnologías. Sin embargo, persiste el reto de integrar de manera efectiva y simultánea prácticas que mejoren la eficiencia operativa y la innovación. La literatura sobre Colombia, si bien documenta estrategias aisladas de digitalización o adopción de renovables, no ofrece aún un marco consolidado para abordar esta simultaneidad de manera estratégica.

No obstante, el problema central trasciende la simple ausencia de un marco; su raíz se encuentra en una tensión operativa no resuelta. Según Borowski (2021) e Ismail et al. (2024), las empresas energéticas enfrentan una contradicción sistémica: los procesos de eficiencia buscan reducir la variabilidad y estandarizar operaciones para minimizar costos, mientras que los procesos de innovación requieren, por definición, introducir variabilidad, experimentar y asumir riesgos controlados. En el contexto colombiano, autores como Giraldo et al. (2021) y Parra et al. (2024) sugieren que, al no existir mecanismos que integren estas dos fuerzas, las organizaciones terminan gestionándolas en silos separados. Esto provoca que las inversiones en digitalización se subutilicen o que las iniciativas de eficiencia restrinjan involuntariamente el potencial innovador, limitando la capacidad organizacional para navegar la complejidad de la transición energética.

La pertinencia práctica de esta investigación radica en su potencial para subsanar esta falta de sistematización, proporcionando una base conceptual y práctica que, como se espera, oriente la toma de decisiones estratégicas en Celsia y otras empresas. Desde la perspectiva teórica, el estudio aportará al conocimiento al analizar específicamente la intersección entre eficiencia operativa e innovación bajo las condiciones particulares del sector energético colombiano, un área donde el análisis preliminar sugiere una necesidad de mayor síntesis. Adicionalmente, posee pertinencia

disciplinar al aplicar métodos de revisión sistemática propios de la ingeniería industrial para estructurar conocimiento aplicable a la gestión de operaciones y la innovación tecnológica.

Para abordar esta falta de un marco sistemático, este estudio se centrará en los subtemas clave identificados como relevantes en el análisis preliminar: (a) El impacto dual de tecnologías digitales específicas (IA, gemelos digitales, IoT), como documentan Borowski (2021) e Ismail et al. (2024); (b) La conexión entre estrategias de integración de renovables y optimización operativa, analizada por autores como Cerón et al. (2025) en Colombia; (c) Los nuevos modelos de negocio emergentes, estudiados por Beltrán-Gallego et al. (2023); y (d) La influencia del marco regulatorio nacional, abordada en documentos de la CREG (2022, 2024a). El análisis integrado de estos aspectos es fundamental para construir la base de conocimiento aplicable.

En consecuencia, esta investigación busca llenar el vacío identificado, proporcionando un análisis estructurado y actualizado de las técnicas y herramientas que la evidencia sugiere como efectivas para la mejora simultánea de la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético colombiano. Los resultados aspiran a servir como un insumo valioso para Celsia S.A. E.S.P. y otras organizaciones del sector.

### **1.1. Formulación de la pregunta de investigación**

Considerando que la problemática central reside en la gestión fragmentada de la tensión operativa entre la eficiencia que exige estandarización y la innovación que demanda flexibilidad, y ante la evidencia de que las herramientas actuales en el contexto colombiano abordan estas variables de manera aislada limitando la competitividad organizacional, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera pueden aplicarse en el contexto estratégico de Celsia S.A. E.S.P. las técnicas y herramientas que permiten incrementar simultáneamente la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético colombiano?

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

Identificar, a partir de una revisión sistemática de la literatura académica reciente, las técnicas, métodos y herramientas implementadas por empresas del sector energético en Colombia para incrementar simultáneamente la eficiencia operativa y la innovación, con el fin de analizar su aplicabilidad en la empresa Celsia S.A E.S.P.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Identificar desafíos del sector energético en Colombia relacionados con la eficiencia operativa y la innovación.

Localizar las diferentes técnicas que han sido implementadas por empresas del sector energético colombiano para mejorar simultáneamente la eficiencia operativa y fomentar la innovación.

Evaluar la aplicabilidad y efectividad de las prácticas identificadas en el contexto específico de Celsia S.A. E.S.P.

Elaborar un artículo de carácter publicable que reúna las características más importantes del desarrollo de la investigación

## **1.3. Cumplimiento de objetivos**

El desarrollo del presente trabajo de investigación se estructuró para dar respuesta sistemática a los compromisos adquiridos en la propuesta aprobada. A continuación, la Tabla 1 detalla la trazabilidad entre los objetivos específicos planteados, la descripción metodológica de su ejecución y la ubicación de los resultados y evidencias dentro del documento final.

**Tabla 1.***Relación de cumplimiento de objetivos específicos y ubicación en el documento*

<b>Objetivo específico</b>	<b>Descripción del cumplimiento (estrategia y hallazgos)</b>	<b>Ubicación (Capítulo / Sección)</b>
1. Identificar desafíos del sector energético en Colombia relacionados con la eficiencia operativa y la innovación.	Cumplido. Se ejecutó una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) sobre un corpus de 923 documentos. Mediante análisis bibliométrico (VOSviewer) y contraste regulatorio (CREG vs. CONPES), se identificó la "disonancia estructural" como el desafío principal, donde la regulación de costos restringe la inversión en I+D.	Cap. 2: Marco Referencial (Contexto regulatorio)  Cap. 4: Resultados RSL (4.1 Análisis bibliométrico)
2. Localizar las diferentes técnicas implementadas por empresas del sector para mejorar simultáneamente la eficiencia y la innovación.	Cumplido. Tras aplicar criterios de calidad (QA1-QA3), se aislaron técnicas específicas: Digitalización profunda (RPA), gestión de activos (BESS) y modelos servitizados (EaaS). Se validó teóricamente que estas herramientas reducen el OPEX y liberan capital para la innovación.	Cap. 4: Resultados RSL (4.2 Hallazgos técnicos)  Cap. 5: Discusión (Análisis de herramientas)
3. Evaluar la aplicabilidad y efectividad de las prácticas identificadas en el contexto específico de Celsia S.A. E.S.P.	Cumplido. Mediante análisis documental de reportes corporativos (2020-2025), se demostró empíricamente la efectividad del modelo de Celsia (ahorros de 165.000 M COP reinvertidos en innovación). Se diseñó una matriz de aplicabilidad que prioriza tecnologías según viabilidad financiera.	Cap. 4: Resultados Caso Celsia (4.3 Evidencia empírica)  Cap. 5: Discusión (Matriz de aplicabilidad)
4. Elaborar un artículo de carácter publicable que reúna las características más importantes de la investigación.	Cumplido. Se sintetizaron la metodología PRISMA, los hallazgos de la RSL y la validación del caso Celsia en un manuscrito estructurado bajo normas de publicación científica, consolidando la evidencia de la relación simbiótica eficiencia-innovación.	Cap. 6: Conclusiones  Anexos: Artículo científico final (Anexo A)

**Nota.** Trazabilidad metodológica que vincula los objetivos específicos con los hallazgos obtenidos y su ubicación en el documento.

## 2. Marco referencial

### 2.1 Marco de antecedentes

Es preciso distinguir la naturaleza de los documentos analizados en este capítulo frente a los presentados posteriormente en los resultados de la investigación (Capítulo 4). En esta sección de Antecedentes, se priorizó la revisión de tesis de posgrado y literatura gris académica (nacional e internacional) para contextualizar el abordaje pedagógico y la estructuración de proyectos similares en el ámbito universitario. Por el contrario, la Revisión Sistemática de Literatura (RSL) detallada en el Capítulo 4 se circunscribe exclusivamente a artículos científicos **de alto impacto (Scopus)**, con el fin de extraer las tendencias de vanguardia tecnológica y herramientas validadas por la comunidad científica global. Esta distinción metodológica evita la duplicidad y permite contrastar el estado del arte académico-formativo (aquí presentado) con la frontera del conocimiento científico (presentada en los resultados).

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

Cannata (2023), en su tesis de maestría para el KTH Royal Institute of Technology, se propuso explorar el estado de la digitalización del sector eléctrico en Europa. Su objetivo principal fue evaluar los impactos de diversas tecnologías digitales sobre el sistema eléctrico y sus principales actores interesados, particularmente los Operadores de Sistemas de Transmisión (TSO, por sus siglas en inglés: *Transmission System Operators*) y los Operadores de Sistemas de Distribución (DSO, por sus siglas en inglés: *Distribution System Operators*). El alcance de su trabajo incluyó una revisión del marco regulatorio europeo y el nivel de despliegue de tecnologías clave como los medidores inteligentes y la conectividad 5G, para contextualizar la percepción de los operadores.

Para llevar a cabo su evaluación, Cannata (2023) empleó una metodología mixta, combinando una revisión extensiva de literatura con una herramienta de investigación primaria: una encuesta en línea. La encuesta fue diseñada con base en siete indicadores clave de desempeño (KPIs, por sus siglas en inglés: *Key Performance Indicators*) predefinidos. Dicha encuesta se distribuyó a los TSO miembros de la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad (ENTSO-E, por sus siglas en inglés: *European Network of Transmission System Operators for Electricity*) y a un grupo seleccionado de DSO europeos para recoger sus experiencias directas con la digitalización.

Los resultados obtenidos por Cannata (2023) indicaron una percepción positiva general de los operadores sobre las tecnologías digitales. Se constató que la digitalización mejora la observabilidad y el monitoreo de las redes, lo que a su vez potencia la estabilidad, la confiabilidad y la eficiencia operativa del sistema eléctrico. Además, estas tecnologías favorecen la integración de más generación renovable y una mayor participación de los clientes. Sin embargo, la autora también resalta desafíos asociados, principalmente el aumento de amenazas relacionadas con la ciberseguridad y la privacidad de los datos debido a la mayor cantidad de información compartida.

El estudio de Cannata (2023) resulta fundamental para la presente investigación, ya que aporta una perspectiva validada empíricamente (a través de encuestas a operadores) sobre cómo la digitalización impacta directamente la eficiencia operativa y la gestión de redes. Su valor radica en la identificación de beneficios concretos (como el mejor monitoreo y la estabilidad) y la alerta sobre retos críticos (ciberseguridad), hallazgos que son plenamente transferibles para el análisis de brechas en el caso colombiano.

Por otro lado, Negi (2024), en su tesis de maestría para la Universidad de Vaasa, se centró en investigar la integración de las tecnologías de la información (IT) y las tecnologías

operacionales (OT) dentro de los sistemas energéticos digitalizados basados en electricidad (EBDES). El objetivo primordial fue explorar las oportunidades y los desafíos asociados a esta convergencia IT/OT, prestando especial atención a la mejora de la eficiencia operativa, la ciberseguridad y la aplicación de análisis de datos en tiempo real. El alcance incluyó el análisis del rol de componentes específicos como variadores de frecuencia (VFD), Controladores Lógicos Programables (PLC, por sus siglas en inglés: *Programmable Logic Controllers*) y sistemas de Control Supervisorio y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés: *Supervisory Control and Data Acquisition*) en este proceso de integración y los riesgos cibernéticos asociados.

La metodología empleada por Negi (2024) fue un enfoque mixto que utilizó análisis de triangulación para combinar datos cuantitativos y cualitativos. La recolección de datos primarios se realizó a través de encuestas dirigidas a profesionales del sector energético, complementadas con talleres y entrevistas semiestructuradas. Estos métodos permitieron obtener tanto perspectivas amplias sobre tendencias como conocimientos detallados sobre experiencias y desafíos técnicos específicos de la integración IT/OT. La revisión de literatura secundaria abarcó estándares de ciberseguridad (como IEC 62443 y NIST) y tecnologías habilitadoras (IoT, ML, Blockchain).

Los resultados de Negi (2024) reflejan que la integración IT/OT efectivamente potencia la eficiencia operativa en los sistemas energéticos digitalizados basados en electricidad (EBDES, por sus siglas en inglés: *Electricity-Based Digitalized Energy Systems*), habilitando el mantenimiento predictivo y permitiendo respuestas más flexibles a los cambios operativos mediante una mejor gestión de datos. Sin embargo, la investigación también concluye que persisten desafíos importantes, siendo la interoperabilidad entre sistemas IT y OT heredados una barrera técnica considerable.

Además, se confirma la criticidad de la ciberseguridad, dado que la convergencia amplía la superficie de ataque y expone a los sistemas OT, tradicionalmente aislados, a nuevas vulnerabilidades. La contribución de esta tesis a la presente investigación es valiosa porque aborda directamente la convergencia tecnológica IT/OT, un habilitador técnico fundamental para lograr la mejora simultánea de eficiencia e innovación. Proporciona un análisis de los beneficios operativos (mantenimiento predictivo, flexibilidad) y, de manera muy pertinente para el contexto colombiano, profundiza en los obstáculos de interoperabilidad y ciberseguridad que deben considerarse al evaluar la aplicabilidad de estas tecnologías.

### ***2.1.2 Antecedentes nacionales***

Riveros y Salcedo (2020), en su trabajo de grado para la Universidad Industrial de Santander (UIS), abordaron el diseño de un sistema para la automatización de la red de distribución eléctrica de media tensión perteneciente al campus principal de la universidad. El propósito central fue mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico ante posibles fallas. Dicho estudio se enfocó en proponer una alternativa tecnológica específica para esa red particular.

Para lograr su objetivo, los autores Riveros y Salcedo (2020) partieron de una revisión conceptual sobre automatización en redes de distribución, identificando elementos como IEDs, PLCs y SCADA, así como estrategias de reconfiguración. Posteriormente, analizaron la red de la UIS, definieron posibles escenarios de falla y propusieron una arquitectura de automatización (Tipo 4) basada en la detección automática y aislamiento de fallas, dividiendo la red en sectores operativos. La viabilidad técnica se evaluó mediante diagramas lógicos GRAFCET y la selección de equipos comerciales, complementada con un análisis financiero costo-beneficio.

El estudio de Riveros y Salcedo (2020) concluyó que la automatización propuesta era técnicamente factible y financieramente viable a largo plazo, destacando beneficios en la

continuidad del servicio. Este trabajo resulta relevante para la investigación en curso al ofrecer un caso de estudio colombiano detallado sobre la aplicación de tecnologías de automatización (innovación) con el fin explícito de mejorar aspectos operativos clave (eficiencia y confiabilidad) en una red de distribución. Aporta ejemplos concretos de las tecnologías (IED, SCADA, PLC) y metodologías (reconfiguración basada en fallas) que son objeto de análisis en esta revisión sistemática.

Por su parte, Báez (2024), desarrolló un informe de práctica en la Universidad de Antioquia centrado en el diseño de un modelo predictivo basado en inteligencia artificial (IA). Su objetivo fue predecir la cantidad de energía generada por sistemas solares fotovoltaicos, considerando las condiciones ambientales y geográficas. El trabajo buscaba explorar el potencial de la IA para gestionar la variabilidad inherente a esta fuente de energía renovable.

La metodología seguida por Báez (2024) incluyó la recopilación de datos históricos de generación solar y meteorológicos de fuentes públicas como NREL y NASA Power Larc. Realizó un preprocesamiento de estos datos, incluyendo normalización y análisis de correlación para seleccionar características relevantes. Posteriormente, seleccionó, entrenó y evaluó una red neuronal recurrente de tipo LSTM (Long Short-Term Memory), utilizando la métrica MAPE (Mean Absolute Percentage Error) para medir su desempeño predictivo.

Báez (2024) concluyó que el modelo LSTM implementado lograba un ajuste razonable a las tendencias de la radiación solar, a pesar de las limitaciones encontradas en la disponibilidad y granularidad de los datos públicos. Se determinó que la IA es una herramienta prometedora para la predicción energética en este ámbito. La relevancia de este antecedente para el presente estudio radica en que ilustra una aplicación específica de IA (innovación) en el contexto colombiano, orientada a optimizar la gestión de un recurso energético renovable, lo cual impacta indirectamente

la eficiencia general del sistema. Proporciona un ejemplo de las *técnicas* de análisis de datos y aprendizaje automático que forman parte del espectro de herramientas a revisar.

Por último, Bonilla y Pérez (2020) estructuraron en su tesis de maestría para la Universidad EAFIT una propuesta de rutas de acción para la implementación de la tecnología blockchain en las actividades de distribución y comercialización de energía eléctrica dentro del mercado colombiano. El propósito fue explorar cómo esta tecnología podría facilitar la transición energética, aprovechando las nuevas capacidades digitales y fomentando la sostenibilidad.

La investigación de Bonilla y Pérez (2020) se basó en un método descriptivo que combinó una revisión documental exhaustiva sobre el sistema eléctrico colombiano y la tecnología blockchain, con entrevistas semiestructuradas a siete expertos del sector energético y tecnológico del país. A partir del contraste entre la teoría, los casos internacionales y las percepciones de los expertos locales, analizaron el marco legal y propusieron alternativas de gestión de mercado, evaluando también el impacto económico potencial.

Bonilla y Pérez (2020) propusieron rutas de acción que involucran la política pública, la medición avanzada y la liberalización del mercado como pasos previos o paralelos a la adopción de blockchain para transacciones energéticas o gestión de prosumidores. Concluyeron que, si bien blockchain ofrece potencial para generar eficiencias operativas (reducción de costos en facturación, atención al cliente, gestión de energía) y habilitar nuevos modelos de negocio, su implementación requiere cambios técnicos e ideológicos importantes en el esquema tradicional colombiano. Este trabajo es altamente pertinente pues analiza directamente una tecnología innovadora (blockchain) en el contexto colombiano de distribución y comercialización, vinculándola explícitamente con mejoras en la eficiencia operativa y la transformación del mercado, aspectos centrales de la presente revisión sistemática.

## 2.2 Marco teórico

### 2.2.1. *Eficiencia operativa en el sector energético*

La eficiencia operativa constituye un imperativo estratégico para empresas del sector energético, particularmente en contextos de márgenes ajustados y alta competencia. Sharma et al. (2020) definen este concepto en empresas energéticas como la capacidad de maximizar el rendimiento de activos físicos mientras se minimizan pérdidas técnicas, comerciales y costos operacionales a lo largo de la cadena de valor energética. Esta perspectiva tradicional, centrada en optimización de recursos en generación, transmisión y distribución, ha dominado la gestión de empresas energéticas durante décadas.

Sin embargo, diversos autores cuestionan la suficiencia de esta visión convencional ante las transformaciones sectoriales contemporáneas. Taghizadeh-Hesary y Yoshino (2019) argumentan que en contextos de transición energética la eficiencia debe reconceptualizarse para incorporar la gestión óptima de portafolios energéticos diversificados que incluyen fuentes renovables con características de intermitencia y variabilidad. Estos autores plantean que la medición de la eficiencia debe integrar tanto los indicadores técnicos tradicionales (pérdidas de transmisión o disponibilidad de plantas) como la capacidad de respuesta flexible ante fluctuaciones en generación renovable y demanda variable.

Kumar et al. (2021) complementan esta perspectiva al introducir dimensiones ambientales en la conceptualización de eficiencia operativa. Según estos investigadores, las presiones regulatorias por descarbonización obligan a las empresas energéticas a integrar variables de sostenibilidad en sus indicadores de desempeño, generando una noción ampliada de eficiencia que trasciende la simple optimización económica. Esta visión multidimensional de la eficiencia (técnica, económica y ambiental) resulta particularmente relevante para empresas colombianas que

enfrentan simultáneamente retos de competitividad económica y cumplimiento de compromisos climáticos.

Desde una perspectiva de gestión de operaciones, Zeng et al. (2017) identifican que la eficiencia en el sector energético se apoya en tres pilares fundamentales: optimización de activos físicos (plantas, redes, infraestructura), gestión eficiente de recursos humanos y operacionales, y digitalización de procesos para reducir tiempos de respuesta y mejorar toma de decisiones. Estos autores demuestran empíricamente que empresas energéticas con altos niveles de eficiencia operativa tienden a implementar sistemas integrados de gestión que conectan información en tiempo real desde múltiples puntos de la cadena de valor.

Por su parte, Newbery et al. (2018) introducen la noción de eficiencia adaptativa, particularmente relevante en mercados energéticos desregulados. Según estos investigadores, más allá de la eficiencia estática (hacer bien lo que ya se hace), las empresas energéticas requieren eficiencia dinámica: la capacidad de ajustar rápidamente configuraciones operativas ante cambios en condiciones de mercado, disponibilidad de combustibles o regulaciones. Esta distinción entre eficiencia estática y dinámica resulta fundamental para comprender las técnicas que empresas colombianas implementan en contextos regulatorios cambiantes.

### ***2.2.2. Innovación en organizaciones energéticas***

La innovación en el sector energético ha trascendido el enfoque puramente tecnológico para integrar modelos de negocio y procesos organizacionales, distinguiéndose entre mejoras incrementales y transformaciones radicales (Bossink, 2020). Esta dinámica se ve condicionada por las características del sector, como las infraestructuras de larga duración y los marcos regulatorios estrictos. Surge así el dilema de la innovación regulada (Hansen y Nygaard, 2021), donde las empresas enfrentan tensiones al intentar adoptar tecnologías emergentes o modelos de negocio

disruptivos (como la generación centralizada) dentro de regulaciones diseñadas históricamente para privilegiar la estabilidad sobre la experimentación.

La transición hacia las renovables agudiza esta complejidad, demandando innovación simultánea en múltiples dimensiones: tecnológica, organizacional, de procesos y de modelos comerciales (Ngar-yin et al., 2018). Para gestionar esta multiplicidad de frentes, las empresas recurren a ecosistemas de innovación, estableciendo alianzas estratégicas con startups y universidades para acceder a capacidades que no pueden desarrollar internamente (Richter, 2020). De hecho, la innovación abierta (colaboración con actores externos) resulta particularmente efectiva en sectores regulados, permitiendo a las firmas superar las limitaciones de innovar de manera aislada (Stucki y Woerter, 2019).

Un eje particular de esta transformación es la innovación digital. Tecnologías como las redes inteligentes y los medidores avanzados habilitan nuevos modelos de servicio energético que eran imposibles en paradigmas analógicos (Llera-Sastresa et al., 2017). Sin embargo, su adopción enfrenta barreras significativas, incluyendo la resistencia organizacional, la falta de capacidades técnicas internas y la ciberseguridad. A su vez, soluciones emergentes como el blockchain, que podrían facilitar modelos descentralizados de comercialización, aún presentan limitaciones considerables en cuanto a su madurez técnica y regulatoria (Ahl et al., 2020).

### ***2.2.3. Ambidestreza organizacional: gestión simultánea de eficiencia e innovación***

La teoría de la ambidestreza organizacional define la capacidad de equilibrar la explotación de mercados actuales con la exploración de nuevas oportunidades (O'Reilly & Tushman, 2021), generando tensiones por recursos. Para gestionar esto, las organizaciones implementan dos arquitecturas principales: la separación estructural, donde unidades distintas se especializan en

explotación (operaciones) o exploración (innovación), o la integración contextual, donde los equipos alternan entre ambas tareas (Raisch et al., 2018). La evidencia sugiere que la separación estructural es más efectiva en organizaciones grandes, mientras que la integración contextual se adapta mejor a entornos dinámicos.

Además de la estructura, la gestión puede ser secuencial (alternar períodos) o simultánea (gestión paralela), siendo esta última crucial en industrias como la energética, donde la eficiencia y la innovación deben coexistir permanentemente (Birkinshaw & Gupta, 2022). Aplicando esto al sector, Solaimani y Van (2021) documentan casos exitosos en empresas energéticas donde las áreas operativas tradicionales, enfocadas en la eficiencia, conviven con laboratorios de innovación autónomos. El éxito de este modelo radica en mantener la autonomía operativa de cada unidad, pero asegurando una alineación estratégica unificada desde la alta dirección.

Finalmente, la ambidestreza se configura como un proceso dinámico antes que como un estado estable, demandando ajustes continuos frente a cambios en el entorno competitivo, tecnológico y regulatorio (Jansen et al., 2016). Para sostener este proceso, el rol del liderazgo es fundamental. Los altos ejecutivos deben actuar como integradores estratégicos, articulando una visión que justifique ambas actividades, asignando recursos de manera equilibrada y gestionando activamente los conflictos inevitables entre las unidades de explotación e innovación (Cantarello et al., 2017).

#### ***2.2.4. Digitalización como habilitador de gestión dual***

La transformación digital reduce la tensión entre eficiencia e innovación. Se define como la integración de tecnologías (IoT, IA, etc.) en procesos centrales para habilitar ambos objetivos simultáneamente (Ghobakhloo et al., 2021). En el sector energético, esta dualidad funcional es clave: tecnologías como las redes inteligentes optimizan activos en tiempo real (eficiencia) y, a la

vez, generan datos masivos que alimentan ciclos de innovación continua en nuevos servicios (Llera-Sastresa et al., 2017). Las plataformas digitales facilitan modelos disruptivos como la comercialización peer-to-peer, reduciendo costos transaccionales (eficiencia) y permitiendo la experimentación (innovación), aunque enfrentan barreras regulatorias y técnicas (Ahl et al., 2020).

Sin embargo, la digitalización es una transformación organizacional, no solo tecnológica. Requiere el desarrollo de nuevas capacidades como la alfabetización digital de la fuerza laboral, la agilidad en la toma de decisiones y una cultura que valore la experimentación (Warner y Wäger, 2019). Esto se alinea con las capacidades de innovación basadas en datos (Parida et al., 2019), donde la analítica avanzada permite optimizar procesos existentes y, simultáneamente, identificar oportunidades de innovación que eran invisibles en paradigmas analógicos, creando nuevos modelos de negocio centrados en servicios digitales.

Finalmente, la implementación en sectores tradicionales como la energía presenta desafíos críticos. Hanelt et al. (2021) identifican tensiones entre los sistemas *legacy* que soportan la eficiencia operativa actual y las nuevas arquitecturas digitales necesarias para la innovación. Estas tensiones se ven exacerbadas por resistencias organizacionales al cambio. Por lo tanto, las empresas energéticas requieren estrategias deliberadas para gestionar esta transición, combinando la modernización tecnológica incremental con una gestión proactiva del cambio organizacional.

### ***2.2.5. Contexto de transición energética y capacidades dinámicas***

El sector energético global atraviesa una transformación caracterizada por la descarbonización, descentralización, digitalización y democratización. Geels et al. (2017) describen esta transición como un proceso multinivel donde el régimen sociotécnico establecido interactúa con nichos emergentes bajo la influencia del panorama global. En el caso específico de América Latina y Colombia, Rodríguez-Padilla et al. (2022) identifican desafíos particulares como

la dependencia histórica de la hidroelectricidad, la necesidad de integrar renovables no convencionales en zonas aisladas y la urgencia de actualizaciones regulatorias que equilibren el acceso universal con la modernización de redes.

La velocidad de estas transformaciones es variable; Sovacool (2016) argumenta que, aunque suelen tomar décadas por diversas inercias, pueden acelerarse con señales políticas claras y reducciones de costos tecnológicos, factores presentes en el contexto colombiano. Para navegar este entorno, el marco de capacidades dinámicas de Teece (2018) resulta esencial, definiendo habilidades organizacionales para detectar oportunidades (*sensing*), aprovecharlas movilizand recursos (*seizing*) y reconfigurar activos para mantener la competitividad (*transforming*).

Warner y Wäger (2019) aplican este marco específicamente al sector energético, señalando que las empresas exitosas desarrollan capacidades para detectar señales tempranas de cambio, reconfigurar rápidamente sus carteras de activos entre generación convencional y renovable, y ajustar sus estructuras para equilibrar la operación eficiente con la experimentación en nuevos segmentos.

Sin embargo, poseer estas capacidades no garantiza el éxito; Helfat y Peteraf (2015) introducen el concepto de calidad de las capacidades dinámicas, que depende de su pertinencia técnica y evolutiva frente al entorno local. Finalmente, Augier y Teece (2021) enfatizan que estas capacidades emergen de la interacción entre procesos, activos y un liderazgo estratégico capaz de articular una visión clara y gestionar las tensiones entre eficiencia e innovación, aspecto central para la aplicabilidad en Celsia S.A. E.S.P.

Los fundamentos teóricos presentados (eficiencia operativa, innovación organizacional, ambidestreza, digitalización, transición energética y capacidades dinámicas) proveen el andamiaje conceptual necesario para analizar críticamente las técnicas que emergerán de la revisión

sistemática de literatura y evaluar su pertinencia y aplicabilidad en el contexto específico de una empresa energética colombiana inmersa en procesos de transformación sectorial.

### **3. Metodología**

A continuación, se detalla el diseño metodológico que orientó la investigación, justificando el enfoque, tipo de estudio, las técnicas de recolección y análisis, y el procedimiento fásico para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto.

#### **3.1 Enfoque de la investigación**

El proyecto adoptó un enfoque mixto, definido como un diseño que integra sistemáticamente los métodos cuantitativos y cualitativos en un mismo estudio (Creswell y Plano, 2018). Esta elección se justifica por la naturaleza de los objetivos:

1. La fase cuantitativa se aplicó al análisis bibliométrico, donde se midieron indicadores de producción científica, frecuencias de autores y palabras clave, y se mapean redes estructurales usando VOSviewer.
2. La fase cualitativa se empleó en el análisis temático de la literatura y en la evaluación de la aplicabilidad de las técnicas en el caso de estudio Celsia, requiriendo interpretación y síntesis.

#### **3.2. Tipo de investigación**

El estudio tuvo un alcance (o tipo) exploratorio y descriptivo.

Fue exploratorio porque el objetivo consistió en examinar un tema más específico y poco estudiado (Hernández Sampieri et al., 2014). El carácter exploratorio se fundamenta en la falta de un marco claro y sistemático sobre la intersección simultánea de la eficiencia operativa y la innovación. Adicionalmente, esta naturaleza exploratoria se refuerza al aplicar el análisis a un contexto particular (Celsia S.A E.S.P.) para evaluar su aplicabilidad (Objetivo 3).

Por otro lado, un alcance descriptivo consiste en especificar propiedades y características importantes de un fenómeno (Hernández-Sampieri et al., 2014, p. 92). Este tipo de estudio resultó pertinente para el presente proyecto, ya que se buscó detallar y caracterizar las técnicas, herramientas y desafíos identificados en la literatura (Objetivo 2).

### **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información**

La técnica principal para las Fases 1 y 2 fue la Revisión Sistemática de Literatura (RSL). Petticrew y Roberts (2006) la definen como un método que busca identificar, evaluar y sintetizar toda la investigación disponible relevante para una pregunta de investigación particular. El instrumento para esta técnica fueron las ecuaciones de búsqueda (queries) diseñadas para las bases de datos científicas (principalmente Scopus).

Adicionalmente, para la Fase 2 se empleó el Análisis Documental. Bowen (2009) define esta técnica como un procedimiento sistemático para revisar o evaluar documentos (tanto impresos como electrónicos), requiriendo que los datos sean examinados e interpretados para obtener comprensión y desarrollar conocimiento empírico. El instrumento para esta técnica fue una ficha de recolección de datos diseñada para analizar y extraer información de fuentes públicas de Celsia S.A E.S.P. (reportes de sostenibilidad, informes de gestión, etc.).

### **3.4. Técnicas de análisis de la información**

El proyecto empleó tres técnicas principales de análisis de datos para procesar la información recolectada.

Primero, se utilizó el análisis bibliométrico. Pritchard (1969) acuñó el término para referirse a la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos a libros y otros medios de comunicación. En esta investigación, esta técnica cuantitativa se aplicó mediante el software

VOSviewer para procesar los metadatos exportados de Scopus (923 artículos). Su aplicación permitió visualizar las redes de co-autoría, co-ocurrencia de palabras clave e instituciones líderes.

Segundo, se aplicó el análisis temático (Síntesis). Braun y Clarke (2006) lo definen como un método para identificar, analizar y reportar patrones (temas) dentro de los datos cualitativos. Esta técnica se aplicó en la Fase 1 de manera cualitativa, mediante un cribado (screening: proceso de selección y filtrado de artículos o estudios para determinar cuáles son relevantes). Los artículos pertinentes se agruparon por temáticas para identificar los desafíos y técnicas.

Por último, se diseñó una matriz de evaluación. Esta herramienta analítica estructurada permitió la comparación sistemática de múltiples ítems (las técnicas identificadas en el análisis temático) contra un conjunto de criterios (el contexto estratégico de Celsia, obtenido del análisis documental) para evaluar su aplicabilidad

### **3.5. Procedimiento**

El proyecto se ejecutó siguiendo etapas secuenciales que aplican las técnicas descritas en las secciones anteriores alineándose directamente con los objetivos específicos del proyecto:

**Fase 1. Revisión sistemática de literatura (RSL):** (Esta fase da cumplimiento al Obj. 1: Identificar desafíos del sector energético en Colombia relacionados con la eficiencia operativa y la innovación y al Obj. 2: Localizar las diferentes técnicas que han sido implementadas por empresas del sector energético colombiano para mejorar simultáneamente la eficiencia operativa y fomentar la innovación. Esta fase inicial comprendió la recolección y el doble análisis de los datos bibliográficos. Primero, se aplicó la técnica de RSL ejecutando una ecuación de búsqueda amplia en la base de datos Scopus, buscando en los campos de título, resumen y palabras clave (Article title, Abstract, Keywords): ( ( operational efficiency OR eficiencia operativa OR process

optimization ) OR ( innovation OR innovación OR digitalization ) ) AND ( energy sector OR sector energético OR power sector ) AND ( Colombia )

Esta búsqueda inicial arrojó 1,795 documentos. Para refinar este conjunto y asegurar la pertinencia y actualidad, se aplicó un protocolo de filtrado con los criterios de inclusión y exclusión explícitos que se presentan en la Tabla 2.

## Tabla 2.

### *Criterios de inclusión y exclusión para la RSL*

<b>Criterio</b>	<b>Criterios de inclusión</b>	<b>Criterios de exclusión</b>
Periodo temporal	Publicaciones desde el 1 de enero de 2020 hasta la fecha de la búsqueda (2025).	Documentos publicados antes de 2020.
Tipo de documento	Article (Artículo) y Conference paper (Ponencia).	Revisiones (Reviews), Libros (Books), Capítulos de libro, Editoriales o Cartas al editor.
Área temática	Documentos clasificados en las áreas de Scopus: Energy, Engineering, Business, Management and Accounting, o Environmental Science.	Documentos de áreas temáticas no pertinentes (ej. Medicina, Química pura, Artes).
Contexto Geográfico	Documentos que incluyan Colombia en el título, resumen o palabras clave (según la ecuación de búsqueda).	Estudios que no mencionen el contexto colombiano.

Tras aplicar estos filtros, se obtuvo el conjunto de datos final de 923 artículos como se evidencia en la Figura 1. Sobre este conjunto se aplicaron dos técnicas de análisis:

1) El análisis bibliométrico, utilizando el software VOSviewer para procesar el archivo CSV exportado y generar mapas cuantitativos de autores, redes y palabras clave.

2) El análisis temático, que involucra el cribado (screening) de los artículos para seleccionar los más relevantes, los cuales se sintetizan y agrupan cualitativamente para identificar los desafíos y técnicas reportados.

**Figura 1.** Resultado de la búsqueda filtrada en Scopus (2020-2025)

The screenshot shows the Scopus search interface. At the top, there are search filters: 'Search within All fields' and 'Search documents \*' with the query '("operational efficiency" OR "eficiencia operativa" OR "process optimization")'. Below the filters are buttons for '+ Add search field', 'Reset', and 'Search Q'. The interface is set to 'Documents' with a 'Beta' badge. Below the search bar, it indicates '923 documents found' and provides options to 'Analyze results', 'Export', 'Download', 'Citation overview', and 'More'. The search results are displayed in a table with columns for Document title, Authors, Source, Year, and Citations. The first result is an article from 2025 titled 'Evaluation of sustainable consumption behavior according to sociodemographic factors in Indigenous communities' by Ayay-Arista, G., Estrada-Araoz, E.G., Bautista-Quispe, J.A., Pujaiico-Espino, J.R., and Carlos-Ramos, J.A. The source is 'Heritage and Sustainable Development', volume 7(1), pages 101-116.

Document title	Authors	Source	Year	Citations
201 <b>Evaluation of sustainable consumption behavior according to sociodemographic factors in Indigenous communities</b>	<a href="#">Ayay-Arista, G.</a> , <a href="#">Estrada-Araoz, E.G.</a> , <a href="#">Bautista-Quispe, J.A.</a> , ... <a href="#">Pujaiico-Espino, J.R.</a> , <a href="#">Carlos-Ramos, J.A.</a>	<a href="#">Heritage and Sustainable Development</a> , 7(1), pp. 101–116	2025	1

*Nota.* Captura de pantalla de la interfaz de Scopus mostrando la ecuación de búsqueda y los 923 documentos resultantes tras aplicar los filtros de periodo temporal, tipo de documento y área temática.

Para asegurar la calidad y pertinencia de los artículos seleccionados para el análisis temático, se aplicó un protocolo de evaluación de calidad. Cada uno de los 923 resúmenes se evaluó contra los siguientes criterios:

- Criterio 1 (Enfoque): ¿El artículo estudia explícitamente la eficiencia operativa y/o la innovación (o la digitalización como habilitador)?
- Criterio 2 (Contexto): ¿El estudio se aplica al sector energético (generación, transmisión, distribución, comercialización)?
- Criterio 3 (Aporte): ¿El artículo identifica técnicas, herramientas, estrategias o desafíos específicos (no es puramente teórico o descriptivo de políticas)?

Solo los artículos que cumplan positivamente con los tres criterios serán incluidos en la síntesis cualitativa final.

### ***3.5.1. Evaluación de calidad de los artículos***

Para garantizar la robustez de la evidencia recolectada, los artículos preseleccionados fueron sometidos a una evaluación de calidad metodológica antes de su inclusión final en la síntesis cualitativa. Siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA, se definieron tres criterios de calidad (QA) para reducir el riesgo de sesgo:

- QA1. Pertinencia técnica: El documento aborda explícitamente la interacción entre eficiencia operativa e innovación (no solo una de ellas por separado).
- QA2. Claridad metodológica: El estudio presenta datos empíricos, casos de estudio o modelos validados, descartando artículos de opinión o editoriales sin sustento.
- QA3. Actualidad tecnológica: La propuesta tecnológica analizada es vigente y aplicable al contexto de la Industria 4.0 (Big Data, IoT, IA), descartando tecnologías obsoletas para el sector energético.

Para operacionalizar estos filtros sin perder la visión global del campo, el análisis se ejecutó en dos niveles de profundidad. En una primera instancia, se procesó el corpus total de documentos resultantes de la búsqueda automática (n=923) para el análisis bibliométrico, lo que permitió mapear las grandes tendencias y redes de colaboración sin sesgos de selección manual. Posteriormente, para la identificación específica de herramientas y técnicas (objetivo central de la investigación), se aplicaron los Criterios de Calidad (QA1, QA2 y **QA3**) mediante lectura completa a la sub-muestra priorizada, asegurando que las herramientas extraídas cumplieran con estándares de validación empírica.

En cuanto a la delimitación temporal (2020-2025), se fundamentó estrictamente en la densidad de la producción científica identificada. Como se evidenció empíricamente en los resultados del estudio (ver Sección 4.1), la temática mostró un comportamiento de crecimiento

exponencial reciente, pues concentró la mayor madurez teórica y tecnológica en el último lustro y alcanzó su pico máximo de 221 documentos en 2024.

Asimismo, esta delimitación obedece a un criterio de vigencia tecnológica crítico en el contexto de la Industria 4.0. Diversos autores (Schwab, 2016; Xu et al., 2018) advierten que el ciclo de vida de las tecnologías digitales emergentes y sus modelos de aplicación oscila frecuentemente entre 3 y 5 años, dada la velocidad de la innovación disruptiva. En consecuencia, extender la búsqueda a literatura publicada antes de 2020 incrementaría el riesgo de analizar herramientas o marcos de gestión ya obsoletos (p. ej., arquitecturas de IoT previas a la estandarización del 5G o modelos de datos no nativos de la nube), lo cual diluiría la validez y aplicabilidad práctica de los hallazgos para la infraestructura actual de Celsia.

Por otro lado, esta Revisión Sistemática se diseñó con prioridad en la profundidad y exhaustividad del periodo vigente sobre la extensión histórica. La inclusión de literatura anterior a 2020 habría implicado incorporar marcos regulatorios ya derogados y tecnologías previas a la consolidación de la Industria 4.0, lo cual habría restado validez ecológica a los hallazgos frente a los desafíos de Celsia S.A. E.S.P. Por tanto, el rigor metodológico se garantizó mediante el análisis exhaustivo del periodo donde se agrupó la evidencia sustancial y aplicable.

**Fase 2. Evaluación de aplicabilidad en Celsia:** Esta fase da cumplimiento al Obj. 3: Evaluar la aplicabilidad y efectividad de las prácticas identificadas en el contexto específico de Celsia S.A. E.S.P.

Una vez identificadas y caracterizadas las técnicas en la Fase 1, esta segunda fase evaluó su pertinencia en el caso de estudio. Se aplicó la técnica de análisis documental, revisando sistemáticamente informes públicos (sostenibilidad, gestión) de Celsia S.A E.S.P. para recolectar información sobre su contexto estratégico, objetivos y capacidades operativas.

Los datos recolectados se analizaron empleando una matriz de evaluación. Esta herramienta analítica estructurada permitió la comparación sistemática de las técnicas identificadas en la RSL contra criterios definidos, derivados tanto de la literatura como del análisis documental de Celsia. La matriz se estructuró con los siguientes criterios de evaluación (columnas):

- Técnica/Herramienta: El método o práctica identificada en la RSL (p.ej., Gemelos Digitales, IA para mantenimiento predictivo).
- Alineación estratégica (Contexto Celsia): Se evaluará si la técnica responde a los objetivos estratégicos y necesidades publicadas por Celsia en sus informes (p.ej., sostenibilidad, eficiencia operativa, innovación digital).
- Barreras y facilitadores (Contexto Colombia): Análisis de los obstáculos (costos, regulación, tecnología heredada) y facilitadores (política pública) identificados en la literatura para el contexto colombiano.
- Juicio de aplicabilidad: Una evaluación final (Alta, Media, Baja) sobre la pertinencia y viabilidad de implementar dicha técnica en el contexto específico de la empresa.

**Fase 3. Producción científica:** Esta fase da cumplimiento al Obj. 4: Elaborar un artículo de carácter publicable que reúna las características más importantes del desarrollo de la investigación.

En la etapa final del proyecto, se utilizó la técnica de redacción científica. Esta fase consistió en sintetizar los resultados principales obtenidos en la revisión sistemática (Fase 1: desafíos y técnicas) y en la evaluación de aplicabilidad (Fase 2: matriz de evaluación). Estos hallazgos se estructuraron y redactaron siguiendo el formato de un artículo científico, con el objetivo de cumplir con la entrega del producto de investigación final.

## **4.Resultados**

La ejecución de la metodología, estructurada bajo un enfoque mixto de alcance exploratorio y descriptivo, permitió la recolección, sistematización y análisis de un acervo documental significativo sobre la intersección entre eficiencia operativa e innovación en el sector energético. Se consolidaron los hallazgos derivados de la revisión sistemática de literatura (RSL), articulándolos secuencialmente para responder a los objetivos específicos del estudio. En una primera instancia, se procesaron los metadatos bibliométricos para decantar las tendencias estructurales de la investigación global y nacional, identificando la fragmentación en la colaboración académica.

Posteriormente, se realizó una caracterización técnica de las herramientas y estrategias reportadas, contrastando la teoría global con la evidencia empírica de implementación en el contexto colombiano. Se examinaron los impactos cuantitativos de la digitalización, la gestión de activos distribuidos y los nuevos modelos de negocio, aislando aquellas variables que demostraron una correlación positiva con la mejora simultánea de los indicadores operativos y de innovación. A continuación, se presentan los resultados desglosados en dos bloques: el análisis de la estructura del campo de conocimiento y la caracterización técnica de las herramientas identificadas.

### **4.1. Tendencias de la literatura**

Esta sección presenta los resultados del proceso inicial de revisión de la literatura académica, fundamental para contextualizar el problema de investigación y dar cumplimiento a los primeros objetivos del proyecto. Se divide en dos partes complementarias: primero, un análisis bibliométrico cuantitativo que mapea la estructura del campo de estudio (autores, temas, tendencias) basándose en los 923 artículos recuperados de Scopus; y segundo, un análisis preliminar cualitativo que sintetiza los hallazgos temáticos de los artículos más relevantes,

enfocándose en la identificación de los desafíos y las técnicas de eficiencia operativa e innovación reportadas para el sector energético colombiano.

## **4.2. Análisis bibliométrico**

Como primera parte de la revisión de literatura, se realizó un análisis bibliométrico cuantitativo para mapear la estructura y las tendencias del campo de investigación. Este análisis se fundamentó en los metadatos de los 923 artículos recuperados de Scopus (2020-2025), tras aplicar los filtros metodológicos que centró la búsqueda únicamente en Artículos y Ponencias. Se emplearon dos técnicas complementarias utilizando el software VOSviewer: (1) el análisis de co-ocurrencia de palabras clave, que permite identificar los principales temas de investigación y sus interrelaciones; y (2) el análisis de co-autoría, que revela las redes de colaboración entre los investigadores más activos. La combinación de ambos análisis ofreció una visión integral tanto de la estructura temática como de la estructura social del campo estudiado, proporcionando un contexto cuantitativo para el análisis cualitativo posterior.

### ***4.1.1. Co-ocurrencia de palabras clave***

Para obtener una visión general de la estructura temática de la investigación reciente, se realizó un análisis bibliométrico de co-ocurrencia utilizando el software VOSviewer. Este análisis se aplicó al conjunto de datos de 923 artículos recuperados de Scopus (2020-2025). Se generó un mapa basado en las Palabras clave del autor (Author Keywords), estableciendo un umbral mínimo de 5 ocurrencias por palabra clave.

El resultado de este análisis se visualiza en la Figura 1. El mapa muestra las 107 palabras clave más frecuentes y sus relaciones de co-ocurrencia. El tamaño de cada nodo (círculo) en la figura es proporcional a la frecuencia de aparición de la palabra clave. Las líneas entre nodos



Alrededor de este núcleo, se observan otros temas relevantes. Climate change (cambio climático) con 33 ocurrencias y energy policy (política energética) con 24 ocurrencias forman un grupo temático importante. Dentro de este grupo o muy cercano a él se encuentra energy efficiency (eficiencia energética), con 23 ocurrencias, lo que sugiere que se investiga principalmente como una estrategia de mitigación climática y de política energética.

El término innovation (innovación) también está presente en el mapa, con 17 ocurrencias. Aunque relevante, su frecuencia es menor que la de los nodos centrales. Se conecta tanto a renewable energy como a temas económicos (economic growth, 17 ocurrencias) y ambientales (co2 emissions, 18 ocurrencias). Esto indica que la innovación se estudia en relación con las energías renovables y sus impactos más amplios. Otros temas visibles incluyen la digitalization (digitalización, 8 ocurrencias) y tecnologías específicas como artificial intelligence (inteligencia artificial, 11 ocurrencias), hydrogen (hidrógeno, 7 ocurrencias) y solar pv (9 ocurrencias), así como aspectos sociales como energy justice (justicia energética, 16 ocurrencias) y energy access (acceso a la energía, 6 ocurrencias).

El análisis de co-ocurrencia de palabras clave muestra un campo de investigación dominado por la transición hacia energías renovables (113 ocurrencias), el desarrollo sostenible (sustainable development, 48 ocurrencias) y el cambio climático (33 ocurrencias). Las palabras clave centrales del proyecto, energy efficiency (23 ocurrencias) e innovation (17 ocurrencias), están presentes y conectadas a los temas principales, pero sus frecuencias confirman cuantitativamente que no son los nodos más dominantes en este análisis temático. La eficiencia energética se asocia fuertemente con la mitigación climática, mientras que la innovación se vincula a las renovables y a los impactos económicos/ambientales. Este panorama temático, derivado de la co-ocurrencia, establece el contexto para el análisis cualitativo de los desafíos y técnicas

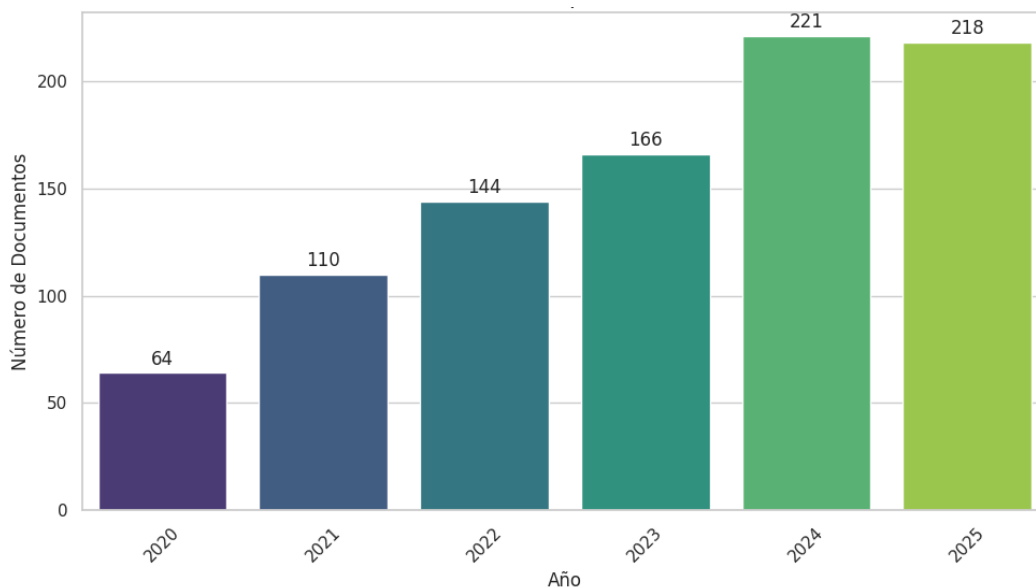
específicas que se aborda en la sección 3.2. Análisis adicionales, como el de co-autoría, complementarán esta visión bibliométrica.

#### 4.1.2. Análisis bibliométrico: Co-autoría

Para empezar el análisis de co-autoría, es necesario mostrar la distribución de los artículos por año. Se observa un interés sostenido en el tema durante el periodo 2020-2025 (ver figura 3). El año 2025 mostró menos artículos, lo cual es esperable, ya que la búsqueda se realizó cubriendo solo una fracción de ese año. La producción constante en los años anteriores confirma la pertinencia temporal del estudio.

#### Figura 3.

*Producción científica por año (2020-2025)*

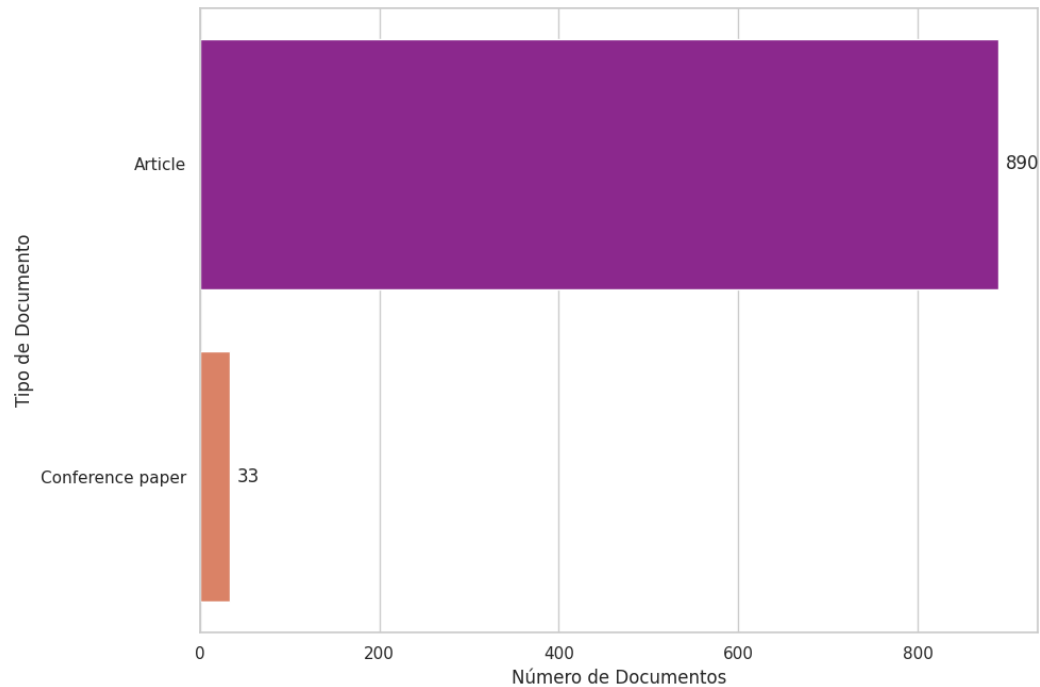


Por otro lado, la figura 4 presenta la composición de la literatura. Se evidencia que la gran mayoría de los documentos son artículos (artículos) y Conference papers (Ponencias). Esta distribución es positiva, ya que indica que la investigación se está publicando tanto en revistas

formales revisadas por pares, sugiriendo madurez en el tema, como en conferencias, lo que sugiere velocidad y novedad en el campo.

#### Figura 4.

*Distribución por tipo de documento*

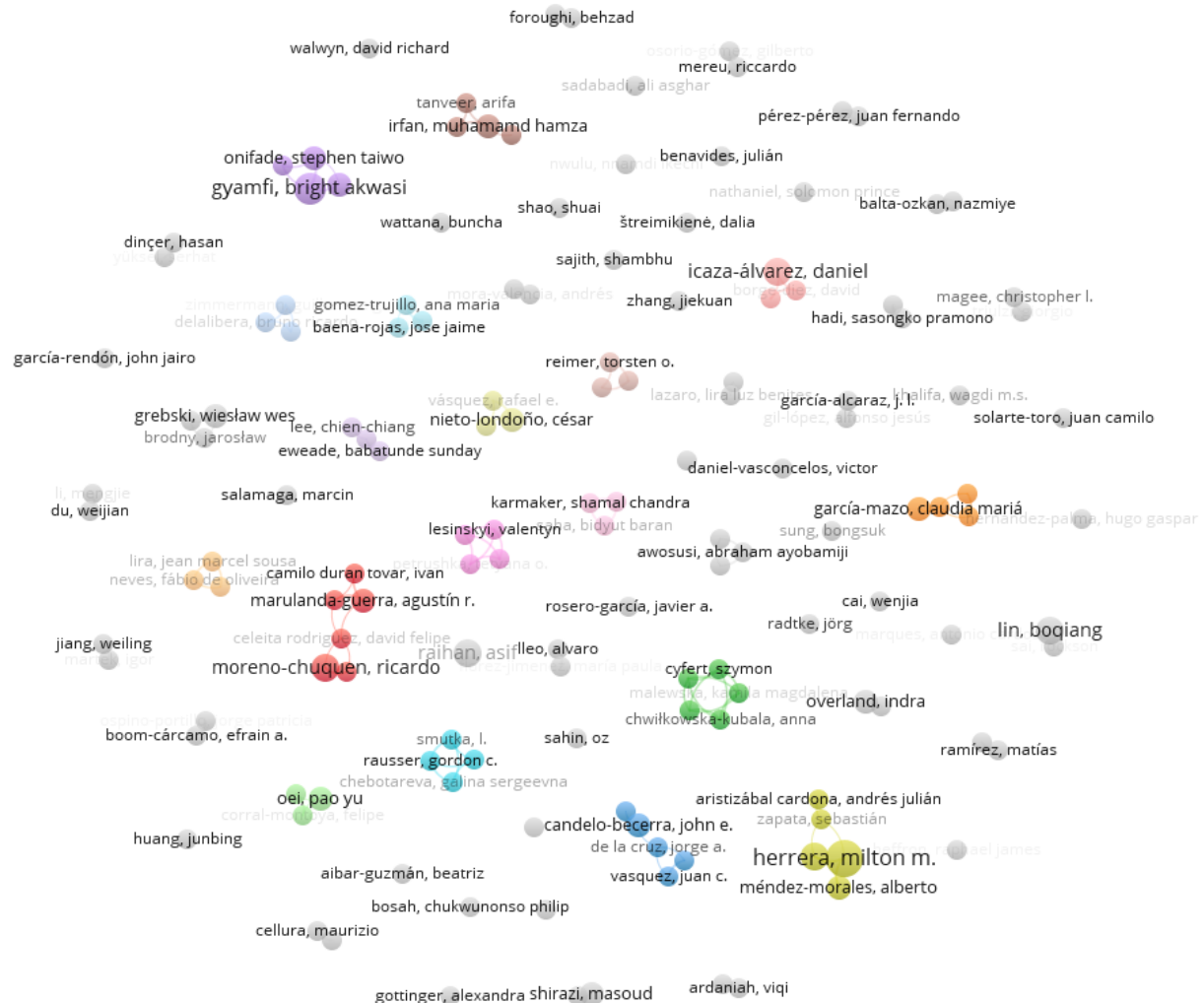


El mapa resultante se presenta en la Figura 5. Este mapa visualiza a los 145 autores (tras excluir un ítem no conectado) y sus relaciones de co-autoría. El tamaño de cada nodo representa la cantidad de documentos publicados por el autor dentro de este conjunto de datos. Los colores agrupan a los autores en clústeres de colaboración detectados por VOSviewer.

A continuación, se presenta la estructura de colaboración entre los investigadores más activos en el campo. Utilizando VOSviewer, se generó un mapa de co-autoría basado en los 923 artículos recuperados (2020-2025). Se incluyeron en el análisis aquellos autores con un mínimo de 2 publicaciones en el conjunto de datos, resultando en 146 autores. Se utilizó el método de conteo completo (Full counting).

**Figura 5.**

Mapa de co-autoría (Scopus, 2020-2025, autores con  $\geq 2$  documentos)



*Nota.* Mapa generado con VOSviewer basado en 923 artículos. Se muestran los 145 autores con al menos 2 publicaciones. El tamaño del nodo indica el número de documentos. Los colores sugieren clústeres de colaboración. La ausencia de líneas indica escasa o nula co-autoría directa *entre estos autores específicos*

La característica más notoria del mapa de co-autoría mostrado anteriormente es la ausencia casi total de líneas de conexión entre los nodos. Esto indica que, entre los autores más prolíficos (aquellos con 2 o más publicaciones en el área temática durante el periodo estudiado), existe una colaboración directa muy limitada o nula. Los autores aparecen dispersos, formando pequeños

grupos aislados (visibles por los colores) o como nodos individuales sin enlaces a otros autores dentro de este conjunto específico de 145 investigadores.

Este análisis sugiere que la red de colaboración en la investigación sobre eficiencia e innovación en el sector energético colombiano, al menos entre sus autores más recurrentes en los últimos 5 años, se encuentra altamente fragmentada. Los investigadores tienden a publicar en grupos cerrados o con colaboradores que no alcanzan el umbral de las 2 publicaciones para aparecer en este mapa. Esta dispersión podría indicar una falta de grandes redes consolidadas o una diversidad de equipos trabajando en paralelo sobre los temas identificados en el análisis de ocurrencia.

### **4.3. Análisis preliminar de la literatura**

Tras el mapeo cuantitativo de la producción científica reciente presentado en la sección anterior, este apartado se enfoca en el análisis cualitativo del contenido de la literatura recuperada. El objetivo es extraer y sintetizar la información pertinente para comprender los desafíos y las estrategias implementadas en el sector energético, tanto a nivel global como en el contexto colombiano, en relación con la mejora conjunta de la eficiencia operativa y la innovación.

#### ***4.3.1. Técnicas globales para la mejora simultánea de eficiencia e innovación***

La literatura internacional reciente converge en señalar que la mejora simultánea de la eficiencia operativa y la capacidad de innovación en el sector energético se apoya de manera fundamental en la adopción e integración de tecnologías digitales avanzadas. Diversos autores coinciden en identificar un conjunto de herramientas y enfoques específicos que actúan como catalizadores de esta doble mejora, permitiendo optimizar las operaciones actuales y, al mismo tiempo, habilitar nuevas formas de valor y adaptación futura dentro de la industria energética global.

Un primer grupo de estudios, que incluye los trabajos de Borowski (2021), Ahmad et al. (2021), Singh et al. (2022) y Simion et al. (2023), enfatiza el rol transformador de la digitalización integral y las tecnologías asociadas a la industria 4.0. Estos autores argumentan que la implementación de sistemas digitales, sensores y análisis de datos en tiempo real logra una optimización directa de procesos y una reducción de costos operativos. Adicionalmente, esta implementación sienta las bases para explorar la innovación. Borowski (2021) y Singh et al. (2022), por ejemplo, destacan cómo la digitalización facilita una toma de decisiones más ágil y fundamentada, elemento esencial tanto para la eficiencia diaria como para explorar nuevas oportunidades de negocio y servicio.

Dentro de este marco digital, la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) emergen como herramientas potentes con aplicaciones transversales. Ahmad et al. (2021), Szczepaniuk y Szczepaniuk (2022), y Camacho et al. (2024), entre otros, detallan su uso en la gestión predictiva del mantenimiento, la optimización de la generación y el consumo energético, además del manejo de grandes volúmenes de datos. Estos autores coinciden en que la IA/ML mejora la eficiencia al predecir fallos o ajustar la oferta y demanda en tiempo real, conjuntamente fomenta la innovación al permitir una mejor integración de fuentes renovables intermitentes y el desarrollo de nuevos servicios energéticos para los consumidores.

Otras tecnologías específicas también reciben atención por su doble impacto. Los gemelos digitales, según Borowski (2021), Bassey et al. (2024) e Ismail et al. (2024), permiten simular, monitorizar y optimizar activos físicos en un entorno virtual y en tiempo real. Esto se traduce directamente en mejoras de eficiencia y seguridad, al tiempo que facilita la innovación al permitir probar virtualmente modificaciones antes de implementarlas. Por otro lado, la tecnología Blockchain, como señalan Borowski (2021) y Kumar et al. (2020), es identificada por su potencial

para mejorar la eficiencia y transparencia en las transacciones energéticas y habilitar modelos de negocio descentralizados.

Por último, un conjunto relevante de autores, entre ellos Yu et al. (2024), Simion et al. (2023), Dall-Orsoletta et al. (2022) y Loock (2020), resalta que la tecnología por sí sola no es suficiente. Argumentan que la adopción de modelos de negocio innovadores (como microredes, plataformas colaborativas, modelos de 'energía como servicio') y la promoción de la colaboración abierta son igualmente importantes. Pese al consenso sobre la utilidad técnica de estas herramientas, la revisión sistemática detectó una limitación en la literatura consultada: el predominio de una visión tecno-céntrica que tiende a subestimar las fricciones organizacionales.

Si bien autores como Borowski (2021) y Simion et al. (2023) documentaron extensamente los beneficios operativos, se observó una escasez de estudios que abordaran críticamente las tasas de fracaso en la implementación o la 'paradoja de la productividad' digital en el sector energético. Este sesgo hacia los casos de éxito en la literatura global dejó un vacío de información sobre los riesgos de integración en contextos de recursos limitados, aspecto que esta investigación buscó subsanar.

No obstante, al analizar críticamente este corpus teórico global, se identifica un marcado sesgo tecnocéntrico. La literatura anglosajona tiende a asumir que la disponibilidad de la tecnología (IA, Blockchain) deriva automáticamente en eficiencia, ignorando las fricciones organizacionales y financieras propias de mercados regulados. Autores como Borowski (2021) y Simion et al. (2023) presentan la digitalización como una panacea universal, omitiendo en sus análisis las barreras de entrada que enfrentan las empresas en economías emergentes donde el costo de capital es elevado. Esta omisión constituye una contradicción fundamental que este estudio busca subsanar al contrastar la teoría global con la realidad operativa local.

#### ***4.3.2. Desafíos operativos y de innovación en el sector energético colombiano***

Continuando con el análisis, una vez identificadas las técnicas globales que potencian la eficiencia y la innovación, resulta pertinente examinar los obstáculos específicos que enfrenta el sector energético colombiano para adoptar e implementar estas mejoras. La literatura revisada, tanto internacional como con foco en Colombia, permite delinear un panorama complejo donde barreras tecnológicas, económicas, regulatorias y socioculturales interactúan, condicionando el ritmo y alcance de la transformación operativa y la capacidad innovadora en el país.

A pesar del potencial de las tecnologías digitales discutidas anteriormente, su adopción en Colombia enfrenta resistencias. Giraldo et al. (2021) y Parra et al. (2024) señalan que la persistencia de sistemas heredados (legacy systems) y una adopción digital aún incipiente dificultan la gestión de datos en tiempo real, la previsión y la toma de decisiones ágil. La integración de herramientas de la industria 4.0, aunque en marcha, todavía requiere inversiones considerables y una adaptación continua a mecanismos de mercado emergentes como la generación distribuida o la medición avanzada, lo que limita la eficiencia operativa actual.

Desde la perspectiva económica, los altos costos iniciales representan una barrera considerable, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (PYMES). Pinedo-López et al. (2024) y Gallego et al. (2021) indican que el acceso limitado a financiamiento, los largos períodos de retorno de la inversión y la percepción de riesgo por parte de las entidades financieras restringen la modernización y la exploración de soluciones innovadoras. López et al. (2020) añaden que la insuficiencia de incentivos financieros y fiscales específicos para proyectos de eficiencia y energías renovables frena la adopción a nivel industrial y residencial.

Más allá de la descripción normativa, se detecta una disonancia estructural entre la política pública declarada y la realidad operativa. Mientras que documentos como el CONPES 4075

promueven la innovación, la literatura de Rocha et al. (2022) evidencia que la rigidez regulatoria de la CREG penaliza involuntariamente la experimentación. Existe, por tanto, una contradicción no resuelta en la literatura nacional: se exige innovación a las empresas (Méndez-Rodríguez et al., 2020), pero se carece de mecanismos tarifarios que reconozcan el riesgo de dicha inversión. Identificar esta brecha es vital para entender por qué la adopción tecnológica en Colombia es más lenta que lo proyectado teóricamente.

Por otra parte, los factores socioculturales y de capital humano son igualmente relevantes. Gallego et al. (2021), Giraldo et al. (2021) y Parra et al. (2024) coinciden en que la resistencia al cambio dentro de las organizaciones y una cultura energética aún débil dificultan la adopción de nuevas tecnologías y prácticas de eficiencia. La falta de experiencia técnica y programas de formación insuficientes, como recalcan Pinedo-López et al. (2024) y Gallego et al. (2021), ralentizan la integración de prácticas innovadoras, afectando particularmente a las PYMES. Estos elementos configuran el entorno específico en el que empresas como Celsia deben operar y buscar mejoras.

#### ***4.3.3. Estrategias de innovación implementadas en Colombia***

Frente a los desafíos tecnológicos, económicos y regulatorios previamente delineados, el sector energético colombiano ya ha comenzado a implementar diversas estrategias de innovación para mejorar su desempeño y alinearse con las metas de transición energética. Los estudios revisados permiten identificar varias líneas de acción concretas que están siendo exploradas por diferentes actores del sector en el país, mostrando un esfuerzo por adaptar las tendencias globales al contexto nacional y buscar mejoras operativas junto con nuevas capacidades.

La digitalización de operaciones y gestión emerge como una de las estrategias preponderantes aplicadas en Colombia. Un grupo de investigaciones, incluyendo las de Giraldo et al. (2021), Parra et al. (2024) y Leguizamon-Perilla et al. (2023), documenta cómo empresas como AES Colombia han avanzado en la implementación de plataformas digitales. Estas plataformas, a menudo basadas en herramientas de la industria 4.0, permiten centralizar y gestionar información hidrológica, operativa y comercial, facilitando una visión más integrada del negocio.

La automatización de procesos es una aplicación directa de esta digitalización con impactos evidentes en la eficiencia. Parra et al. (2024) y Giraldo et al. (2021) describen casos donde la automatización de tareas como simulaciones de precios de energía o la conciliación de contratos ha resultado en una disminución apreciable de los tiempos operativos y la reducción de errores manuales. Esta optimización libera recursos y agiliza la operación. Adicionalmente, Leguizamon-Perilla et al. (2023) señalan que la modernización digital se extiende a la infraestructura existente, como las plantas hidroeléctricas antiguas, con el fin de extender su vida útil y mejorar su capacidad para integrarse a un sistema energético más flexible.

Paralelamente, la integración de energías renovables no convencionales y el desarrollo de soluciones energéticas descentralizadas constituyen otra área relevante de innovación en el país. Cerón et al. (2025), Arango-Manrique et al. (2021) y Budes et al. (2020) reportan sobre la promoción e implementación de proyectos de microredes y la incorporación de fuentes como la solar fotovoltaica y la eólica. Estas iniciativas resultan especialmente valiosas en zonas no interconectadas (ZNI), donde, según estos autores, permiten mejorar el acceso a la energía, la calidad del servicio y la sostenibilidad ambiental al reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Dentro de esta línea, el uso de sistemas híbridos (combinando diferentes fuentes renovables o renovables con almacenamiento) es una estrategia innovadora documentada. Beltrán-Gallego et

al. (2023) y Pupo-Roncallo et al. (2021) analizan cómo la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía facilita una mayor penetración de fuentes intermitentes como la solar y la eólica, aportando flexibilidad al sistema eléctrico y contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Investigaciones como la de Rocha-Meneses et al. (2023) exploran también el potencial, aún incipiente, de otras fuentes como el biogás a partir de biomasa residual.

La transformación del sector también está impulsando la exploración y adopción de nuevos modelos de negocio adaptados a la transición energética. Beltrán-Gallego et al. (2023) identifican ejemplos innovadores como el arbitraje energético, que aprovecha las fluctuaciones de precios mediante sistemas de almacenamiento, o la oferta de energía como servicio (XaaS), donde se vende el servicio energético en lugar del kilovatio-hora. Estos modelos buscan generar nuevas fuentes de ingresos y adaptarse a un mercado más dinámico y descentralizado.

Complementariamente, Arango-Manrique et al. (2021) y Singh et al. (2022) observan cómo las plataformas digitales y la creciente participación de startups tecnológicas están habilitando servicios energéticos más personalizados y facilitando la interacción directa entre generadores y consumidores. Sułek y Borowski (2024) y Gitelman y Kozhevnikov (2023), analizando tendencias más amplias, sitúan estas iniciativas dentro de un movimiento global hacia modelos de negocio energéticos más flexibles y centrados en el cliente, impulsados por la digitalización.

Para terminar, la literatura también reconoce un componente de innovación social y colaborativa en el panorama colombiano. Dall-Orsoletta et al. (2022) resaltan la tendencia hacia la innovación abierta, donde se establecen alianzas entre empresas del sector, universidades, centros de investigación y las propias comunidades para co-diseñar y co-implementar soluciones energéticas. Este tipo de colaboración puede acelerar la adopción de tecnologías y asegurar que

las soluciones respondan mejor a las necesidades locales. El rol de las políticas públicas es mencionado por autores como Pinedo-López et al. (2024) y Plazas-Niño et al. (2024) como un factor habilitador clave, aunque, como se discutió en la sección anterior, la necesidad de fortalecer y agilizar los marcos regulatorios sigue siendo un aspecto pendiente para maximizar el potencial innovador del sector.

#### ***4.3.4. Marco de política pública, regulación y actuación empresarial en Colombia***

El análisis de la literatura académica revela tendencias globales y desafíos específicos en Colombia; ahora, es pertinente examinar cómo el marco institucional y las acciones empresariales en el país reflejan y responden a esta realidad. Documentos oficiales y corporativos emitidos durante los últimos cinco años ofrecen una perspectiva complementaria sobre las directrices y prácticas que buscan impulsar la eficiencia operativa y la innovación dentro del sector energético nacional.

En el ámbito de la política pública, se observa un esfuerzo por vincular la productividad con la innovación tecnológica como parte de la transición energética. El Departamento Nacional de Planeación (2022) fijó esta dirección en el CONPES 4075, definiendo lineamientos y un plan de acción para incidir en la eficiencia y la adopción tecnológica a lo largo de la cadena de valor energética. Para operativizar esta visión, el Ministerio de Minas y Energía (2025) presentó la hoja de ruta de transición energética justa, ordenando instrumentos de implementación e incorporando habilitadores como la digitalización y la analítica de datos. Adicionalmente, el Ministerio de Minas y Energía (2024a, 2024b, 2024c, 2024d) publicó escenarios, estimaciones de costos y una metodología detallada para comunidades energéticas, buscando traducir la innovación en prácticas verificables.

La regulación ha desempeñado un papel activo para que los datos y la flexibilidad operativa se traduzcan en mejoras medibles. La Comisión de Regulación de Energía y Gas (2022) actualizó el marco de medición avanzada (AMI) y la gestión independiente de datos, estableciendo criterios de interoperabilidad y reglas de acceso, lo cual es fundamental para la trazabilidad entre agentes. Más adelante, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2024a, 2024b) diseñó un programa para fomentar la participación de la demanda en la bolsa de energía, con mecanismos de medición y verificación, primero de forma transitoria y luego proyectando un esquema permanente.

Desde la perspectiva de la planeación sectorial a largo plazo, la Unidad de Planeación Minero Energética (2024a) integró la innovación y la eficiencia en la actualización del Plan Energético Nacional 2024–2054, incluyendo apuestas sobre modernización de redes y automatización. Esta misma entidad operacionalizó instrumentos como el PROURE mediante resolución, enlazando metas de eficiencia con proyectos específicos. Estas acciones buscan orientar las inversiones y esfuerzos del sector hacia objetivos comunes de modernización y uso racional de la energía.

La supervisión, por su parte, aporta información valiosa para la evaluación operativa. La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2023, 2024a, 2024b) publicó informes sobre Zonas No Interconectadas (ZNI) y boletines tarifarios que permiten identificar presiones de costos y diferencias territoriales. Estos datos son insumos relevantes para que las empresas contrasten el impacto de sus proyectos de innovación sobre los costos unitarios y la confiabilidad del servicio en diferentes contextos.

Los informes corporativos recientes ilustran cómo las empresas están respondiendo a este marco institucional. Empresas Públicas de Medellín (2024) documentó iniciativas en gestión de activos y analítica orientadas a la reducción de pérdidas. De manera similar, Interconexión

Eléctrica S.A. E.S.P. (2024) presentó avances en automatización y eficiencia técnica en transmisión. Por su lado, el Grupo Energía Bogotá (2025) reportó programas de digitalización y gestión de riesgo operativo acompañados de indicadores de desempeño. Estos ejemplos sugieren una adopción progresiva de tecnologías que combinan innovación y búsqueda de productividad.

Puede decirse que, los documentos oficiales y corporativos colombianos identifican retos persistentes relacionados con la flexibilidad de las redes, la calidad y gobernanza de los datos, la coordinación institucional y la formación de capacidades. Las estrategias impulsadas se centran en habilitar mercados de flexibilidad, desplegar medición avanzada, desarrollar metodologías para comunidades energéticas y establecer lineamientos de planeación a largo plazo. La regulación actúa como un mecanismo clave al crear incentivos y requisitos de verificación que integran la digitalización con resultados operativos medibles.

#### **4.4. Hallazgos del análisis bibliométrico y tendencias globales**

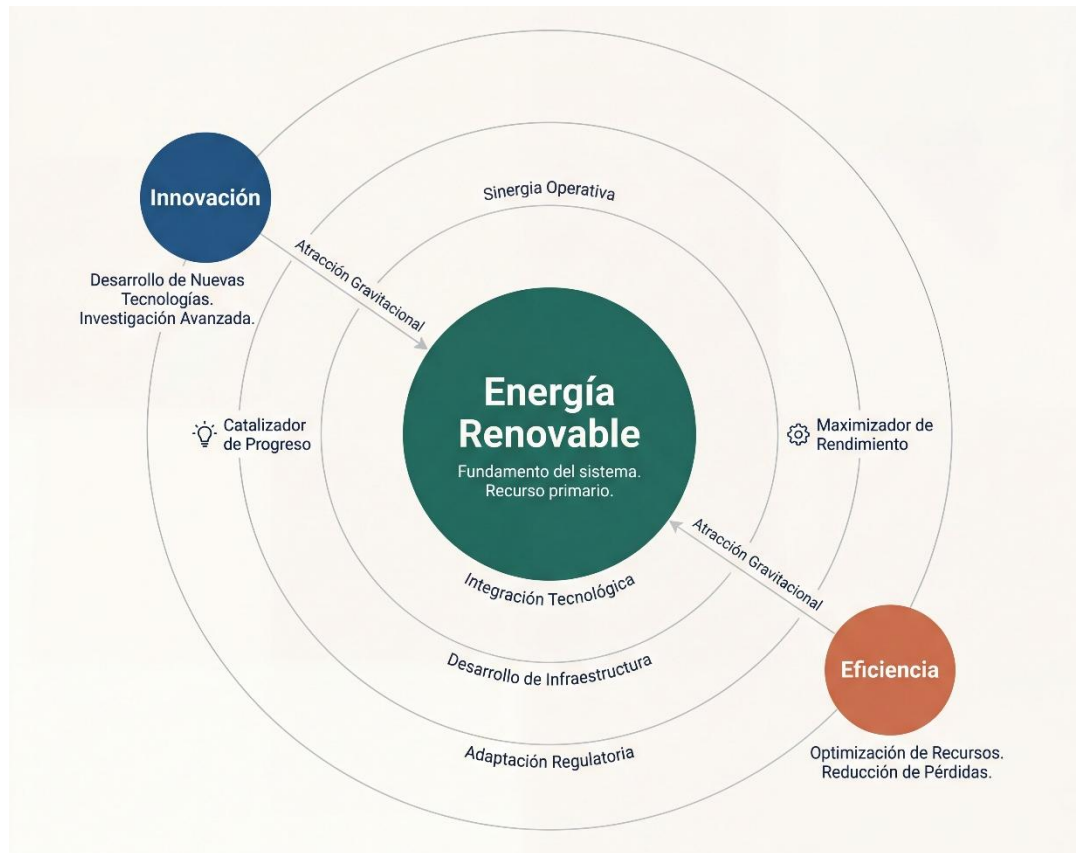
La fase inicial se centró en el análisis cuantitativo de un corpus final compuesto por 923 documentos recuperados de Scopus para el periodo 2020-2025. El análisis bibliométrico realizado permitió procesar los metadatos y mapear la estructura intelectual del campo. Se evidenció que la producción científica mantuvo un crecimiento sostenido, alcanzando un pico de 221 documentos en 2024, lo cual denotó la vigencia de la temática en la agenda académica. Sin embargo, el análisis de co-ocurrencia de palabras clave reveló una jerarquización temática donde el término *renewable energy* dominó el espectro con 113 ocurrencias, estableciéndose como el nodo central VOSviewer (2025).

Por otro lado, el análisis bibliométrico mostró que los conceptos de *energy efficiency* (23 ocurrencias) e *innovation* (17 ocurrencias) ocuparon posiciones periféricas en la red semántica, subordinados a clústeres más densos relacionados con *energy transition* (56 ocurrencias) y

*sustainability* (53 ocurrencias). Esta configuración topológica sugirió que la innovación y la eficiencia se investigaron mayoritariamente como variables instrumentales para lograr la descarbonización. Particularmente, se identificó que el término *Colombia* (12 ocurrencias) apareció vinculado al nodo de transición energética, confirmando un enfoque local centrado en la política del cambio de matriz más que en la gestión de la innovación operativa (VOSviewer, 2025).

Adicionalmente, el análisis de las redes sociales de colaboración académica arrojó resultados sobre la fragmentación de la comunidad científica. El estudio bibliométrico evidenció una desconexión entre los nodos de coautoría de los 145 investigadores más prolíficos, quienes aparecieron dispersos en clústeres aislados sin líneas de interacción robustas. Esta falta de cohesión estructural indicó la inexistencia de una masa crítica colaborativa consolidada que abordara la problemática de manera sistémica en el contexto analizado (VOSviewer, 2025). Para sintetizar esta configuración topológica, la Figura 6 esquematiza la jerarquización hallada, evidenciando visualmente la distancia relacional entre el núcleo consolidado de investigación y los tópicos periféricos

**Figura 6.** Representación esquemática de la estructura temática del campo de investigación.



*Nota.* El esquema ilustra la centralidad del término Energía Renovable y la ubicación periférica de Innovación y Eficiencia hallada en el análisis bibliométrico. Basada en los datos de co-ocurrencia procesados en VOSviewer (2025).

#### 4.5 Caracterización técnica de herramientas para la mejora simultánea

En respuesta al segundo objetivo específico, se caracterizaron técnicamente las estrategias que demostraron capacidad empírica para incrementar la eficiencia operativa y fomentar la innovación de manera concurrente. Se aislaron mecanismos específicos validados en la literatura reciente, con énfasis en su despliegue dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

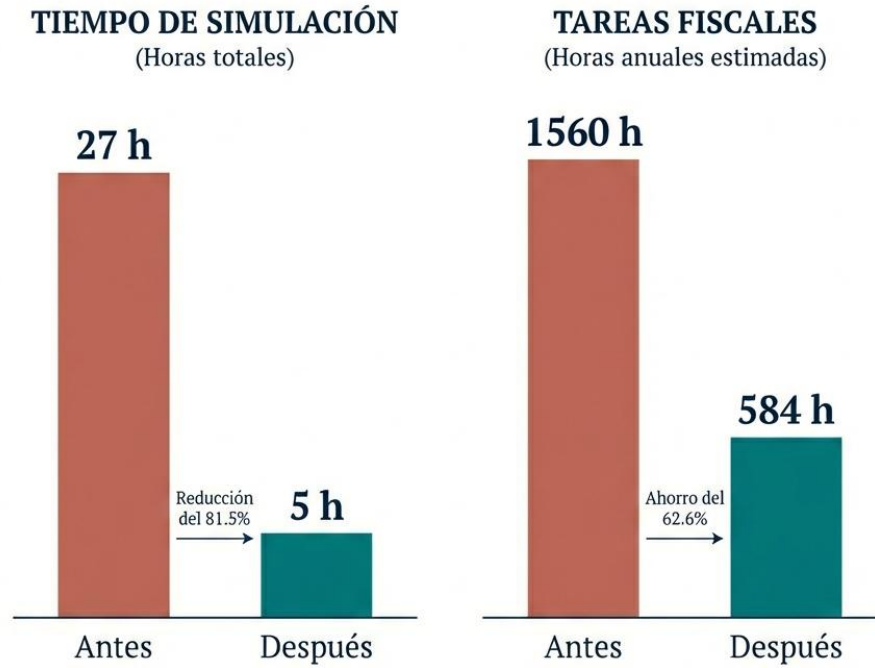
#### ***4.5.1. Digitalización y automatización de procesos***

Se determinó que la digitalización profunda actuó como el habilitador primario de la eficiencia operativa inmediata. Parra et al. (2024) y Giraldo et al. (2021) documentaron en el contexto colombiano el caso de AES Colombia, donde la implementación de arquitecturas de Industria 4.0 y la Automatización Robótica de Procesos (RPA) transformaron la gestión de datos operativos. La evidencia cuantitativa presentada por Parra et al. (2024) indicó que la automatización de las simulaciones de precios de energía logró reducir los tiempos de ejecución de 27 horas a 5 horas, liberando capacidad analítica para la toma de decisiones estratégicas.

Asimismo, Giraldo et al. (2021) evidenciaron un impacto directo en la carga administrativa asociada al cumplimiento regulatorio. La intervención digital permitió disminuir las horas de trabajo manual dedicadas a declaraciones fiscales de 1560 horas a 584 horas anuales, mitigando el riesgo de error humano. Leguizamon-Perilla et al. (2023) complementaron estos hallazgos señalando que estas herramientas permitieron la creación de plataformas de gestión de información hidrológica en tiempo real, constituyendo una innovación en la resiliencia de la organización ante eventos climáticos.

Para dimensionar el impacto de estas intervenciones, la Figura 7 sintetiza las ganancias en eficiencia reportadas, contrastando los tiempos de ejecución en los frentes operativo y administrativo antes y después de la automatización.

**Figura 7.** *Impacto de la automatización en tiempos operativos y administrativos (Caso AES Colombia)*



*Nota.* Comparativo de horas hombre dedicadas a procesos manuales antes y después de la implementación de herramientas RPA. Los porcentajes reflejan la ganancia en eficiencia neta. Datos adaptados de Parra et al. (2024) y Giraldo et al. (2021).

#### 4.5.2. Tecnologías de gestión de activos distribuidos (BESS y microredes)

El análisis técnico permitió identificar que la integración de Recursos Energéticos Distribuidos (DER) funcionó como un mecanismo dual de estabilización técnica y diversificación tecnológica. González-Dumar et al. (2024) y Pupo-Roncillo et al. (2021) señalaron que la alta penetración de fuentes renovables variables introdujo fluctuaciones de voltaje en el rango del 1% al 3.1% en niveles de tensión bajos, desafiando la confiabilidad de la red. Ante este reto, Pupo-Roncillo et al. (2021) evidenciaron que los Sistemas de Almacenamiento de Energía (BESS) actuaron como activos de infraestructura para proveer servicios complementarios de regulación de frecuencia y soporte de voltaje, mejorando la calidad de la potencia.

En el ámbito de la innovación para la expansión de cobertura, Cerón et al. (2025) y Arango-Manrique et al. (2021) documentaron que las microredes híbridas en Zonas No Interconectadas (ZNI) permitieron descentralizar la generación. Estos autores encontraron que la configuración técnica de estos sistemas, al combinar generación solar/eólica con respaldo, optimizó los costos operativos y garantizó la continuidad del suministro en regiones aisladas, validando un modelo de operación resiliente que superó las limitaciones de la extensión de red convencional.

#### ***4.5.3. Modelos de negocio servitizados y transferencia de riesgo***

Finalmente, se caracterizó la emergencia de modelos de negocio que redefinieron la lógica de apropiación de valor, transitando de la venta de energía a la prestación de servicios (EaaS). Sułek y Borowski (2024) analizaron cómo estos modelos permitieron superar las barreras financieras tradicionales. En el contexto nacional, Beltrán-Gallego et al. (2023) complementaron este análisis indicando que el mecanismo financiero subyacente se basó en la transferencia del riesgo de inversión: el proveedor asumió el gasto de capital (CAPEX) de la infraestructura y gestionó su operación, mientras que el cliente pagó por el servicio mediante un gasto operativo (OPEX).

Este enfoque, según lo discutido por Singh et al. (2022) y Beltrán-Gallego et al. (2023), mejoró la eficiencia económica del cliente industrial al eliminar la inversión inicial. Simultáneamente, constituyó una innovación en el modelo de ingresos de las empresas energéticas, permitiéndoles diversificar sus flujos de caja y reducir la exposición a la volatilidad de los precios de bolsa mediante contratos de largo plazo. Para sistematizar este cambio de paradigma, la Tabla 3 contrasta las dimensiones críticas del modelo tradicional frente a la propuesta servitizada, evidenciando las diferencias estructurales en la apropiación de valor y la gestión del riesgo

**Tabla 3.***Comparativa estructural entre el modelo energético tradicional y el modelo servitizado (EaaS)*

Variable de análisis	Modelo tradicional (venta de energía)	Modelo servitizado (Energy as a Service - EaaS)
Propuesta de valor	Suministro de <i>commodities</i> (kWh) unidireccional.	Solución integral (confort, iluminación, confiabilidad) centrada en el desempeño.
Propiedad del activo	El usuario final compra y es dueño de la infraestructura.	El proveedor o ESCO mantiene la propiedad de los activos instalados.
Mecanismo financiero	Basado en CAPEX: el cliente asume el 100% de la inversión inicial.	Basado en OPEX: el cliente paga una cuota periódica por el servicio, eliminando barreras de entrada.
Gestión del riesgo	El cliente asume el riesgo técnico, de operación y mantenimiento.	El proveedor asume el riesgo de desempeño técnico y garantiza la disponibilidad.
Flujo de ingresos	Transaccional y volátil (dependiente del precio de bolsa/tarifa).	Recurrente y predecible (contratos de largo plazo tipo PPA o <i>leasing</i> ).
Foco de eficiencia	Reducción de consumo por parte del usuario (incentivo débil).	Optimización tecnológica por parte del proveedor para maximizar el margen (incentivo fuerte).

*Nota.* Contrastación de las lógicas de operación y financiamiento. El modelo EaaS transfiere la carga de capital y riesgo del usuario al proveedor especializado. Basada en Sułek y Borowski (2024) y Beltrán-Gallego et al. (2023).

#### 4.6. Evaluación de la aplicabilidad en el contexto estratégico de Celsia S.A. E.S.P.

Tras la caracterización técnica de las herramientas globales, se procedió a validar la hipótesis de eficiencia e innovación simultánea mediante el análisis empírico de Celsia S.A. E.S.P., seleccionada por su rol como *utility* integrada en el mercado colombiano. El análisis de la documentación corporativa (2021-2024) permitió contrastar los hallazgos teóricos con la ejecución real de proyectos de inversión y transformación operativa. Se evidenció que la organización adoptó un enfoque sistémico donde la eficiencia financiera y operativa trascendió el cumplimiento de metas estáticas para convertirse en el habilitador de capital para la innovación estratégica. A continuación, se desglosan los mecanismos específicos mediante los cuales se materializó esta estrategia dual.

#### ***4.6.1. Alineación con la estrategia corporativa dual***

El análisis de los reportes integrados evidenció que la compañía estructuró su operación bajo dos grandes directrices estratégicas: PermaneC y EnergizarC, las cuales actuaron como los pilares de gestión para equilibrar la explotación del negocio *core* y la exploración de nuevos mercados. Celsia S.A. E.S.P. (2024) definió la estrategia PermaneC como el vehículo para la optimización de la estructura de capital y la excelencia operativa. Se encontró que el foco de esta estrategia fue la reducción sistemática del nivel de endeudamiento y la mejora de los márgenes EBITDA, liberando flujo de caja libre.

Este saneamiento financiero, documentado en los informes de gestión (Celsia S.A. E.S.P., 2023), constituyó la base de fondeo para EnergizarC, la estrategia orientada al crecimiento en renovables y nuevos negocios. Se observó una correlación directa: la eficiencia en la gestión de la deuda y el control de costos operativos (OPEX) permitieron a la empresa mantener un ritmo de inversión (CAPEX) sostenido en proyectos de innovación, incluso en periodos de alta volatilidad macroeconómica y altas tasas de interés. Así, se validó empíricamente que la eficiencia financiera actuó como el sustrato necesario para la innovación.

#### ***4.6.2. Materialización de la digitalización: el programa 'ReimaginarC'***

En el ámbito de la eficiencia operativa técnica, se analizó la implementación del programa de transformación digital denominado ReimaginarC. Celsia S.A. E.S.P. (2024) reportó que la integración de analítica avanzada y automatización generó ahorros acumulados cuantificados en 165.000 millones de COP. Al desagregar este dato, se determinó que la eficiencia se derivó estrictamente de la optimización de procesos de mantenimiento y gestión de activos.

Un elemento central identificado fue la puesta en marcha del Centro de Control NOVA. Según los datos técnicos presentados (Celsia S.A. E.S.P., 2022), esta infraestructura permitió

centralizar la operación de las plantas de generación y los activos de distribución, habilitando la operación 100% remota de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). Desde una perspectiva de ingeniería, esto significó la transición de un esquema de operación con presencia física local y respuesta reactiva, a un modelo de telecontrol predictivo.

El impacto de esta digitalización se reflejó en la estructura de costos. Se evidenció que, gracias a estas eficiencias, el crecimiento del OPEX de la compañía se mantuvo por debajo de la inflación acumulada del periodo (IPC), rompiendo la tendencia inercial del sector (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Este diferencial positivo validó la capacidad de la digitalización para absorber presiones inflacionarias externas sin comprometer la calidad del servicio. La Figura 8 ilustra la mecánica financiera de este escudo, donde los ahorros operativos contrarrestan el incremento natural de los costos indexados.

**Figura 8.** *Mecanismo de compensación de costos mediante eficiencias operativas*



**Nota.** El gráfico ilustra la gestión del OPEX. La barra roja representa la presión al alza por inflación (IPC). La barra verde representa los ahorros estructurales (165.000 M COP) logrados por digitalización, los cuales actúan como un escudo que mitiga el alza, resultando en un gasto real (barra azul) controlado. Basada en datos de Celsia S.A. E.S.P. (2024).

La figura muestra que el ahorro de 165.000 millones COP opera como un mecanismo estructural de cobertura. Al neutralizar el impacto inflacionario mediante eficiencia técnica, Celsia

logró proteger su margen EBITDA, demostrando que la digitalización actúa como un estabilizador financiero ante la volatilidad macroeconómica.

#### **4.6.3. Innovación en modelos de negocio: la spin-off Atera**

La investigación validó la aplicación del modelo de servitización (EaaS) descrito en la literatura mediante el análisis de Atera, una *spin-off* corporativa diseñada para gestionar la eficiencia energética en el sector industrial. Celsia S.A. E.S.P. (2024) perfiló a Atera como un gestor de activos térmicos y eléctricos, superando el rol tradicional de comercializador. El modelo de negocio identificado se basó en la sustitución tecnológica de calderas obsoletas y equipos ineficientes, donde Atera asumió la inversión inicial y el cliente remuneró el servicio a través de los ahorros generados (modelo ESCO).

Desde la ingeniería financiera, se analizó que este vehículo se planteó una meta de inversión de 500 millones de USD (Celsia S.A. E.S.P., 2024), una cifra que denotó la escalabilidad de la propuesta. Se observó que la innovación radicó en la capacidad de transformar un problema técnico del cliente (ineficiencia térmica y altos costos) en una oportunidad de inversión de largo plazo para la *utility*. Este esquema permitió a Celsia capturar valor más allá del medidor, integrando soluciones de monitoreo digital y optimización de consumo que fidelizaron al cliente industrial.

#### **4.6.4. Gestión de la intermitencia: almacenamiento y transmisión**

Finalmente, se evaluó la respuesta técnica ante el desafío de la intermitencia de las fuentes renovables. Se documentó la entrada en operación del proyecto Palmira 2, el primer sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS) a gran escala del país. Celsia S.A. E.S.P. (2024) detalló que este activo se configuró para entregar energía en horas pico y prestar servicios

complementarios de regulación de frecuencia al Sistema Interconectado Nacional (SIN), validando técnicamente el rol de los BESS como estabilizadores de red.

Paralelamente, se analizó la innovación en la estructura de propiedad de los activos de transmisión a través de las plataformas de inversión Caoba y C2. Se encontró que la lógica subyacente fue la rotación de activos maduros: Celsia transfirió activos de transmisión estabilizados a estos vehículos, liberando capital fresco para reinvertir en nuevos desarrollos (Celsia S.A. E.S.P., 2023). Esta ingeniería financiera permitió acelerar la expansión de la red y la integración de renovables sin sobre-apalancar el balance de la compañía, demostrando una gestión eficiente del ciclo de vida del activo.

#### 4.7 Matriz de evaluación de aplicabilidad y síntesis de hallazgos

Como cierre del proceso de contrastación, se consolidó la Matriz de Evaluación de Aplicabilidad (ver Tabla 4). Este instrumento sistematiza el cruce entre las capacidades tecnológicas identificadas en la revisión global y las realidades operativas del contexto colombiano, validado por el caso de estudio. La matriz pondera la viabilidad de implementación considerando tanto la alineación estratégica corporativa como las restricciones regulatorias y de mercado del entorno nacional.

**Tabla 4.**

*Matriz de evaluación de aplicabilidad de tecnologías para la eficiencia e innovación en el sector energético colombiano*

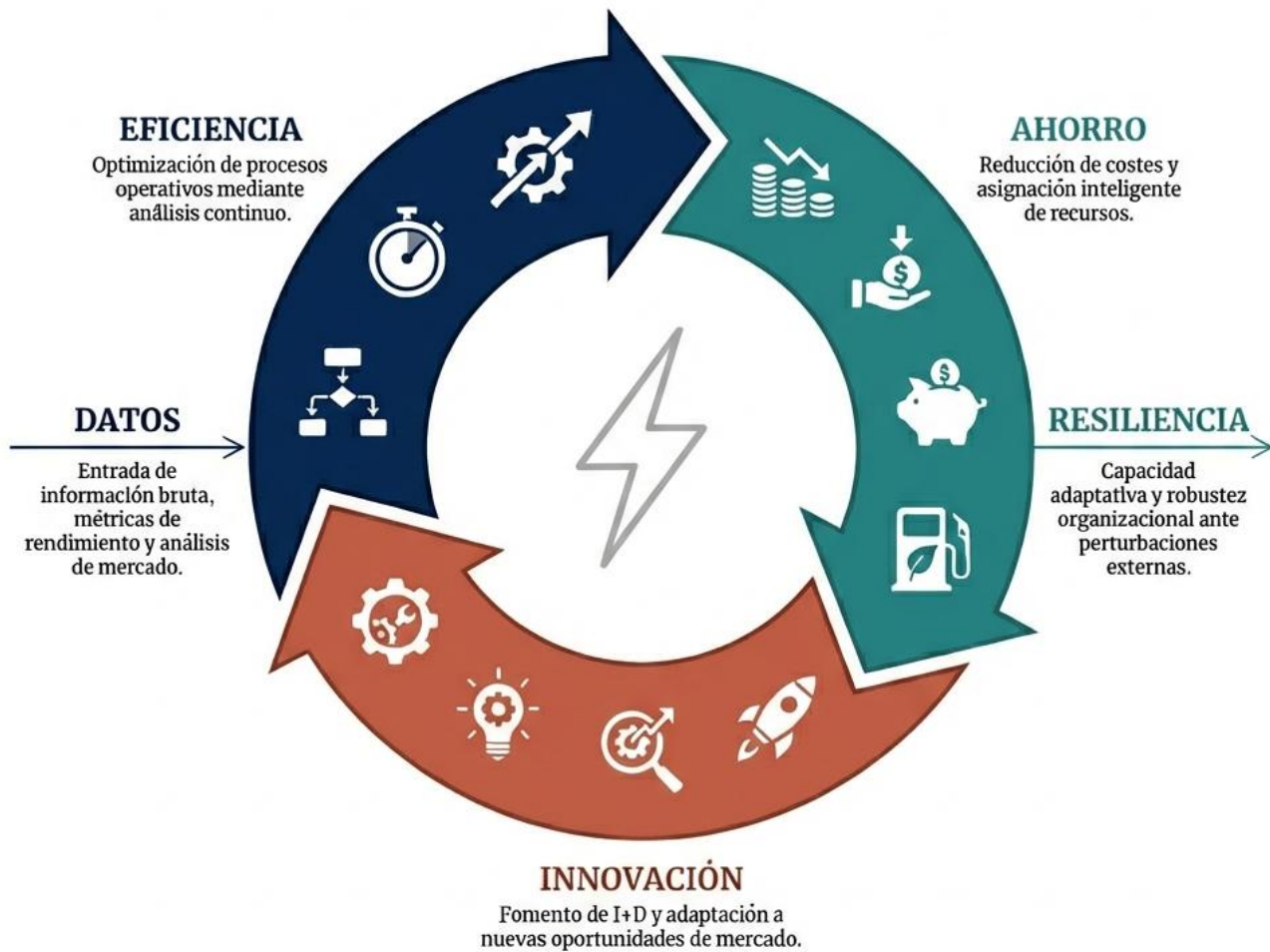
<b>Técnica / Herramienta</b>	<b>Alineación estratégica (contexto Celsia)</b>	<b>Barreras y facilitadores (contexto Colombia)</b>	<b>Juicio de aplicabilidad</b>
Sistemas BESS (Almacenamiento)	Directa: Soporta la estrategia EnergizarC al estabilizar la intermitencia en plantas solares y proveer servicios a la	Barrera: Incertidumbre regulatoria sobre la remuneración de servicios complementarios por parte de la CREG.  Facilitador: Necesidad crítica de	Alta. Tecnología validada técnicamente. Su expansión depende del cierre de brechas regulatorias, pero la necesidad operativa es inminente.

	red (Proyecto Palmira 2).	flexibilidad ante la penetración de renovables (González-Dumar et al., 2024).	
Automatización robótica (RPA) y analítica	Central: Eje del programa ReimaginarC. Habilita la reducción de costos base (OPEX) necesaria para la competitividad financiera.	Barrera: Resistencia al cambio cultural y obsolescencia de sistemas legados.  Facilitador: Alta disponibilidad de talento en TI y madurez de herramientas de Industria 4.0 (Parra et al., 2024).	Alta. Demostró retorno de inversión inmediato (ahorro de 165.000 M COP) y bajo riesgo de implementación técnica.
Modelos servitizados (EaaS / ESCO)	Estratégica: Fundamento de la <i>spin-off</i> Atera. Permite capturar valor detrás del medidor y fidelizar clientes industriales.	Barrera: Aversión al riesgo financiero en PYMES y falta de incentivos fiscales claros para la sustitución tecnológica (Beltrán-Gallego et al., 2023).  Facilitador: Altas tarifas de energía que incentivan la búsqueda de ahorros.	Alta. Modelo financiero robusto que traslada el CAPEX al proveedor, eliminando la barrera de entrada para el cliente final.
Microredes en zonas no interconectadas (ZNI)	Complementaria: Alineada con metas de responsabilidad social y expansión de cobertura, aunque no es el <i>core</i> de ingresos masivos.	Barrera: Complejidad logística en zonas dispersas y dependencia de subsidios estatales para la sostenibilidad financiera (Cerón et al., 2025).	Media. Técnicamente viable, pero su escalabilidad comercial depende de esquemas de financiación pública o mixta complejos.
Plataformas de inversión y rotación de activos	Financiera: Base de la estructura de capital (Caoba/C2). Permite reciclar capital para nuevas inversiones en desarrollo.	Facilitador: Apetito de inversionistas institucionales por activos de infraestructura estabilizados con flujos predecibles.	Alta. Innovación financiera probada que otorga ventaja competitiva en capacidad de despliegue de capital frente a operadores tradicionales.

**Nota.** Evaluación cualitativa basada en la triangulación de hallazgos bibliométricos, regulatorios y del caso de estudio.

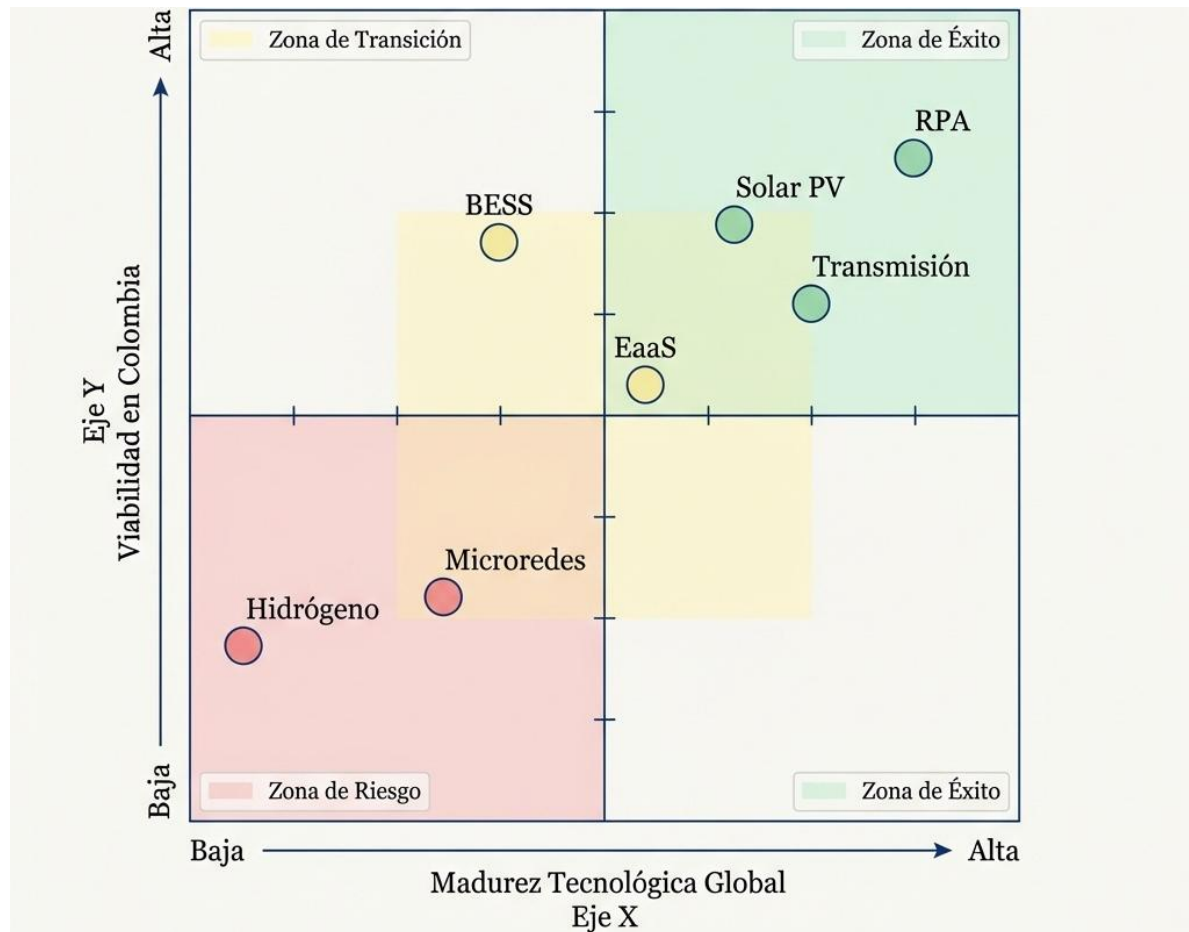
#### 4.7.1. Visualización de resultados

Para sistematizar la dinámica sistémica identificada entre las variables de estudio, se diseñó el modelo conceptual ilustrado en la Figura 9. Este esquema gráfico trasciende la linealidad causal para proponer un ciclo de refuerzo positivo, donde la eficiencia operativa supera su concepción de estado final para operar como el motor financiero que genera los excedentes de capital indispensables para sostener la innovación continua.

**Figura 9.** *Modelo de ecosistema de eficiencia operativa e innovación*

*Nota.* El diagrama ilustra el flujo de valor circular hallado en la investigación. La entrada de datos masivos (*Data*) habilita la eficiencia operativa, la cual genera ahorros en OPEX (*Savings*). Estos recursos liberados financian la innovación (*Innovation*), cerrando el ciclo con una mayor resiliencia organizacional (*Resilience*).

Mientras la Figura 9 describe la dinámica de flujo, es necesario clasificar las tecnologías según su potencial de implementación inmediata. La Figura 10 presenta una matriz de priorización que cruza el grado de madurez técnica global de cada herramienta con su viabilidad regulatoria y financiera específica en el mercado colombiano.

**Figura 10.** *Matriz de priorización tecnológica según madurez y viabilidad local*

**Nota.** Clasificación de tecnologías según su relación costo-beneficio y riesgo regulatorio. Las herramientas en la zona verde (cuadrante superior derecho) representan victorias tempranas (*low-hanging fruits*) para la eficiencia operativa inmediata, mientras que la zona roja indica tecnologías que requieren mayor maduración o subsidios. Elaborada a partir de la matriz de evaluación.

#### 4.8. Síntesis del capítulo de resultados

La triangulación de los resultados bibliométricos, la caracterización técnica y el estudio de caso permitió confirmar la hipótesis central de la investigación: la eficiencia operativa y la innovación, lejos de ser objetivos excluyentes, operan como variables interdependientes que

conforman un ciclo de refuerzo positivo. Se demostró que, en el contexto energético actual, la digitalización profunda actúa como el catalizador que transforma los datos operativos en eficiencias financieras (reducción de OPEX), las cuales, a su vez, liberan los recursos de capital necesarios para financiar la exploración de nuevos modelos de negocio y tecnologías emergentes.

La evidencia empírica de Celsia S.A. E.S.P. validó la aplicabilidad de este modelo teórico en un entorno de mercado emergente. Estrategias como la automatización de procesos (ahorro de 165.000 millones COP) y la rotación de activos maduros demostraron que la excelencia en la explotación del negocio *core* es el prerrequisito funcional para la innovación disruptiva. Las barreras identificadas, principalmente regulatorias y culturales, no impidieron la implementación de estas estrategias, pero sí condicionaron su velocidad de despliegue, obligando a las organizaciones a desarrollar capacidades de adaptación y gestión de riesgos regulatorios.

Estos hallazgos configuran una base sólida para la discusión final del estudio. Al establecer que la tecnología es un medio y no un fin, y que la innovación requiere un sustrato de eficiencia financiera para ser sostenible, se abre el camino para interpretar las implicaciones gerenciales y de política pública que se abordarán en el siguiente capítulo. La mejora simultánea deja de ser una aspiración teórica para definirse como un imperativo de supervivencia corporativa ante la transición energética.

## 5. Discusión de resultados

La investigación inició problematizando la tensión teórica existente entre la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético, bajo la premisa de que ambas dimensiones compiten por recursos finitos en un entorno de capital intensivo. Sin embargo, tras la triangulación de los hallazgos bibliométricos con la evidencia empírica del caso Celsia S.A. E.S.P., se identificó que dicha tensión supera la lógica de elección excluyente para resolverse mediante una integración sistémica donde la eficiencia actúa como habilitador financiero.

Al contrastar estos resultados con los postulados de O'Reilly y Tushman (2021) sobre la ambidestreza organizacional, se encontró una validación empírica significativa en la estructura corporativa de la compañía analizada. La división estratégica reportada entre PermaneC, enfocada en la optimización del negocio medular, y EnergizarC, orientada a la exploración de nuevos mercados (Celsia S.A. E.S.P., 2024), refleja la separación estructural que sugiere la literatura para proteger las iniciativas innovadoras de la inercia corporativa.

No obstante, la evidencia discrepa de la teoría clásica en lo referente a la independencia de recursos. Mientras la literatura sugiere flujos de financiación separados, los resultados financieros demostraron una interdependencia crítica donde los excedentes de caja generados por la eficiencia de la operación tradicional fondearon el capital de riesgo de la estrategia innovadora. Este hallazgo se alinea con la visión de las capacidades dinámicas de Teece (2018), quien argumenta que la reconfiguración de activos es más determinante que la simple separación de unidades de negocio.

De esta manera, la estrategia dual observada confirmó la necesidad de la ambidestreza para la supervivencia en la transición energética y, simultáneamente, aportó un matiz operativo relevante para el contexto latinoamericano: la innovación disruptiva en empresas de servicios

públicos requiere una base de eficiencia operativa optimizada que asegure el flujo de caja (Celsia S.A. E.S.P., 2023).

Profundizando en la dimensión tecnológica de esta estrategia, el análisis de los datos operativos reveló que el ahorro acumulado de 165.000 millones de COP, derivado del programa de transformación digital ReimaginarC, superó las expectativas de una simple reducción de costos (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Al contrastar este dato con autores como Borowski (2021) y Ahmad et al. (2021), surge una discusión crítica sobre el rol de la tecnología. Si bien estos investigadores advierten que las empresas energéticas tienden a utilizar la digitalización con un enfoque exclusivamente defensivo en etapas iniciales, el caso estudiado demostró una evolución hacia capacidades ofensivas.

La implementación del Centro de Control NOVA y la automatización de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas trascendieron el ahorro contable para habilitar operaciones remotas antes inviables técnicamente. Esto permite argumentar que la organización superó la paradoja de la digitalización descrita por Parra et al. (2024) para el contexto colombiano, integrando la tecnología en el núcleo de la operación física y transformando activos pasivos en capacidades dinámicas de respuesta en tiempo real.

Esta capacidad de adaptación tecnológica se manifestó igualmente en la innovación de modelos de negocio, un ámbito donde la realidad local contrasta fuertemente con la teoría global. La implementación de la spin-off Atera desafió las barreras estructurales identificadas por Giraldo et al. (2021) y Beltrán-Gallego et al. (2023), tales como la aversión al riesgo financiero y la falta de cultura técnica en los usuarios finales. El análisis indica que el éxito de penetración de este modelo servitizado radicó en la innovación financiera mediante la transferencia de riesgo, más que en la educación del cliente. Al asumir la inversión inicial en activos térmicos y de iluminación, la

empresa aplicó la lógica teorizada por Singh et al. (2022), convirtiendo un gasto de capital incierto para el cliente en un gasto operativo predecible. Así, la evidencia sugiere que la barrera principal para la adopción de eficiencia energética en Colombia es de naturaleza financiera más que tecnológica, restricción que puede ser mitigada por actores con suficiente músculo de capital para diferir el retorno de inversión.

Para terminar, la discusión abordó la gestión de la incertidumbre regulatoria mediante decisiones de inversión estratégica, como se evidenció en el proyecto Palmira 2. Aunque González-Dumar et al. (2024) señalan que la cuantificación de la flexibilidad y las señales de precio para el almacenamiento siguen siendo desafíos críticos en la regulación colombiana, la decisión de Celsia de invertir en esta infraestructura demuestra un comportamiento proactivo.

Lo anterior contrasta con la visión conservadora tradicional y se alinea con lo propuesto por Arango-Manrique et al. (2021), quienes sostienen que la sostenibilidad operativa en la transición energética depende de la adopción temprana de nuevos modelos de negocio, incluso antes de que la normativa esté completamente madura. En síntesis, la evidencia confirma que las grandes organizaciones integradas poseen la capacidad de actuar como creadores de mercado, utilizando su músculo financiero para mitigar los riesgos regulatorios identificados en la literatura.

## 6. Conclusiones

La presente investigación se emprendió con el propósito fundamental de resolver la dicotomía teórica y operativa que históricamente ha tensionado la gestión de las empresas del sector energético: la aparente contradicción entre la maximización de la eficiencia operativa, entendida como la explotación rigurosa de los activos actuales, y la necesidad imperiosa de innovación, concebida como la exploración de nuevos horizontes de negocio. Tras un exhaustivo proceso de triangulación metodológica que integró la revisión sistemática de la literatura académica reciente con la validación empírica en el estudio de caso de Celsia S.A. E.S.P., este estudio ha logrado demostrar de manera concluyente que tal antagonismo es una premisa falsa en el contexto de la transición energética moderna.

Al contrario, la evidencia recabada permite afirmar que la relación entre eficiencia e innovación es de causalidad financiera y simbiosis estratégica. Se ha constatado que la excelencia en la operación de la infraestructura existente, lejos de constituir un freno para la creatividad empresarial, actúa como el sustrato metabólico indispensable que genera los excedentes de capital necesarios para financiar la incertidumbre inherente a los procesos de innovación disruptiva. En este sentido, el cumplimiento del objetivo general de esta tesis trasciende la mera identificación de herramientas para proponer un modelo de gestión integral donde la optimización del presente es la única vía sostenible para asegurar la viabilidad del futuro.

Respecto a la identificación de técnicas, se concluye que la aplicación del protocolo PRISMA y los Criterios de Calidad (QA) permitieron filtrar el ruido informativo de 923 documentos para aislar únicamente tecnologías con validación empírica. Al profundizar en esta caracterización, la investigación permitió develar que la tecnología en el sector energético colombiano ha dejado de ser un componente periférico de soporte para convertirse en la columna

vertebral de la estrategia corporativa. Si bien la literatura inicial presentaba un panorama fragmentado de soluciones aisladas, el análisis integral demostró que la digitalización masiva y la automatización de procesos operan como el gran habilitador transversal que conecta la eficiencia con la innovación. Más que la simple adopción de herramientas de vanguardia por modas corporativas se trata de una reingeniería profunda de la arquitectura organizacional orientada a la liberación de recursos.

En este contexto, el estudio ratifica que tecnologías como la analítica de datos avanzada, la automatización robótica de procesos y los sistemas de gestión remota tipo SCADA, ejemplificados en el Centro de Control NOVA, tienen como función primordial la reducción estructural del costo operativo base. Esta distinción es crítica, pues la tecnología se valida únicamente cuando logra transformar ineficiencias ocultas en recursos líquidos disponibles para la reinversión. Por consiguiente, se concluye que la técnica más efectiva es aquella que demuestra mayor capacidad de conversión de datos operativos en valor financiero tangible, permitiendo a las organizaciones superar las barreras de entrada a nuevos mercados mediante la autofinanciación.

Bajo esta óptica, y al evaluar la aplicabilidad y efectividad de estas prácticas en el contexto específico de Celsia S.A. E.S.P., los hallazgos son contundentes al validar la teoría de la ambidestreza organizacional en un entorno de mercado emergente. La compañía objeto de estudio logró materializar la coexistencia de dos lógicas de negocio complementarias: la lógica de la eficiencia, encarnada en la estrategia PermaneC, y la lógica de la innovación, materializada en la estrategia EnergizarC. La investigación confirmó que el ahorro acumulado de ciento sesenta y cinco mil millones de pesos, producto de una disciplina férrea en la optimización de costos y la digitalización de procesos, funcionó como el combustible estratégico para apalancar apuestas de alto riesgo y larga maduración.

Este hallazgo demuestra que la capacidad de Celsia para lanzar vehículos de inversión disruptivos y desarrollar proyectos de almacenamiento de energía con baterías antes de que existiera una regulación madura, dependió enteramente de la solidez de caja provista por su negocio tradicional. Esto confirma que las empresas incumbentes de gran tamaño poseen una ventaja competitiva única frente a las *startups* nativas: la capacidad de utilizar su infraestructura instalada como una fuente de financiación interna para su propia transformación, refutando así los postulados que sugieren que la innovación radical es dominio exclusivo de los nuevos actores del mercado.

En relación con la pregunta de investigación sobre de qué manera pueden aplicarse en el contexto estratégico de Celsia S.A. E.S.P. las técnicas y herramientas que permiten incrementar simultáneamente la eficiencia operativa y la innovación, este estudio concluye que la aplicación efectiva reside en la evolución del modelo de negocio hacia esquemas de servitización. La respuesta hallada indica que las herramientas de eficiencia habilitan a la organización para asumir el riesgo de capital que sus clientes no pueden tolerar, transformando la venta de kilovatios en la prestación de servicios integrales de gestión energética.

Bajo esta dinámica, la aplicabilidad de las técnicas es total y transversal siempre y cuando se enmarquen en una estrategia donde la empresa energética absorbe la complejidad tecnológica y financiera (el CAPEX) para entregar al usuario final una solución simplificada y operativa (el OPEX). De esta manera, la simultaneidad entre eficiencia e innovación se logra cuando la empresa utiliza su excelencia operativa interna para reducir sus propios costos de servicio, ofreciendo tarifas competitivas en modelos de negocio innovadores que desplazan a la competencia tradicional y capturan nuevo valor en el mercado.

Como resultado tangible de esta integración teórica y práctica, y en estricto cumplimiento del último objetivo específico, se consolidó la producción de un artículo científico, el cual se encuentra disponible en la sección de Anexos (ver anexo A). Este producto académico integra la función de divulgación con la formalización del aporte investigativo a la discusión global sobre la gestión tecnológica en mercados emergentes, ofreciendo a la comunidad científica una evidencia empírica contrastada sobre la viabilidad operativa de la ambidestreza organizacional en el sector de servicios públicos.

Por último, y mirando hacia el horizonte de la transición energética global, esta investigación cierra afirmando que el modelo de gestión dual validado en este estudio constituye un imperativo de supervivencia para las compañías del sector en economías en desarrollo. La volatilidad macroeconómica, la presión regulatoria y la demanda social por la descarbonización exigen organizaciones capaces de reinventarse sin destruir su patrimonio actual. Se concluye que el camino hacia la sostenibilidad corporativa requiere gestionar los activos convencionales con tal nivel de eficiencia técnica y digital que se conviertan en la palanca de la diversificación.

Finalmente, se establece que el aporte principal de este trabajo residió en demostrar que la eficiencia y la innovación son las dos caras de una misma moneda, indivisibles y codependientes. La experiencia documentada demuestra que la innovación real en el sector energético colombiano es, en esencia, una innovación financiera habilitada por la tecnología; es la capacidad de gestionar el riesgo mediante el conocimiento profundo de los datos operativos.

### **6.1 Limitaciones de la investigación**

Aunque los hallazgos trazan una ruta clara sobre la gestión de la eficiencia y la innovación, es necesario delimitar el alcance real de estas conclusiones. La restricción principal radica en haber utilizado un diseño de caso único. Si bien analizar a Celsia en profundidad permitió entender

detalles operativos que se perderían en un estudio estadístico masivo, esta decisión impide generalizar los resultados automáticamente. La viabilidad de la estrategia analizada dependió de condiciones muy particulares de la empresa (su cultura, su tamaño y su posición en el mercado). Por tanto, la aplicación de este esquema en otras compañías del sector debe evaluarse con prudencia, pues lo que funcionó en el caso de estudio podría no replicarse exactamente en organizaciones con estructuras diferentes.

Adicionalmente, el estudio presenta una limitación financiera o de escala. El modelo validado se basa en la capacidad de la empresa para asumir grandes inversiones iniciales (CAPEX) y recuperar el dinero a largo plazo mediante servicios. Esto sugiere que la estrategia de financiar la innovación con ahorros operativos funciona idealmente en grandes empresas con acceso a crédito favorable. En consecuencia, la aplicabilidad de estos hallazgos podría disminuir en pequeñas y medianas empresas (PYMES) o startups con poca liquidez, donde la prioridad suele ser la supervivencia financiera inmediata antes que la inversión en proyectos de lenta maduración.

Para terminar, existe una limitación derivada de las fuentes de información. Al basar el análisis en reportes corporativos y documentos oficiales, la investigación asume la validez de los datos públicos. A pesar de la revisión crítica realizada, estos documentos tienden a resaltar los logros estratégicos y minimizar los conflictos internos. Por consiguiente, el estudio se centró en los resultados consolidados y las estrategias formales, dejando en un segundo plano las tensiones laborales o la resistencia al cambio que suelen acompañar a estas transformaciones.

## 7. Recomendaciones

A la luz de los hallazgos presentados y la validación del modelo de gestión dual en Celsia S.A. E.S.P., se formulan las siguientes recomendaciones estratégicas, operativas y académicas. Estas sugerencias buscan trascender el caso de estudio para proponer rutas de acción concretas que aseguren la sostenibilidad del ciclo virtuoso entre eficiencia e innovación identificado en la investigación.

### 7.1. Recomendaciones para la estrategia corporativa de Celsia S.A. E.S.P.

Considerando que la estrategia de servitización a través de la *spin-off* Atera demostró ser el mecanismo más efectivo para monetizar la eficiencia, se recomienda a la organización profundizar la diversificación de este portafolio hacia el segmento industrial térmico. Si bien el modelo actual ha sido exitoso en iluminación y sistemas fotovoltaicos, la data operativa sugiere que existe un nicho de alto valor en la sustitución de calderas y motores ineficientes bajo el mismo esquema de *Energy as a Service* (EaaS). La compañía debería aprovechar su capacidad de apalancamiento financiero para absorber el CAPEX de modernización industrial en el Valle del Cauca, replicando la lógica de transferencia de riesgo que funcionó en el sector comercial.

Asimismo, en relación con la infraestructura de digitalización, se sugiere evolucionar el uso del Centro de Control NOVA. Hasta el momento, esta herramienta ha funcionado principalmente como un instrumento de monitoreo y reacción remota. El siguiente paso lógico consiste en la implementación de gemelos digitales (*Digital Twins*) para los activos críticos de generación y transmisión. Esta evolución permitiría transitar de un mantenimiento basado en condición a un mantenimiento prescriptivo, utilizando la data histórica acumulada para predecir fallas con semanas de antelación. Esta medida optimizaría aún más el OPEX, liberando flujo de caja adicional para reinvertir en los proyectos de innovación de la estrategia EnergizarC.

## 7.2. Recomendaciones para el sector y la regulación energética

La evidencia sobre el proyecto Palmira 2 (BESS) puso de manifiesto que la tecnología avanza a una velocidad superior a la normativa. Por tanto, se recomienda a las empresas del sector participar activamente en la formulación de propuestas para la remuneración de servicios complementarios. Es imperativo que el gremio lidere la creación de mesas técnicas con la CREG para definir señales de precio claras que reconozcan la rapidez de respuesta de las baterías frente a la inercia de los generadores sincrónicos. Más que esperar pasivamente la regulación, las empresas incumbentes deben proponer pilotos regulatorios (*Sandbox*) que demuestren con datos reales el beneficio sistémico de la flexibilidad, acelerando así la creación de un marco normativo que haga viables estas inversiones sin depender exclusivamente de subsidios.

## 7.3. Recomendaciones para futuras investigaciones

Desde la perspectiva académica, esta investigación se centró en una gran empresa incumbente con músculo financiero robusto. Se abre una línea de investigación necesaria para evaluar la aplicabilidad de este modelo de ambidestreza en las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) del sector energético y de servicios conexos. Futuros estudios deberían indagar si la estrategia de financiar la innovación mediante ahorros operativos es replicable en organizaciones con restricciones severas de liquidez o si, por el contrario, este es un mecanismo exclusivo de los grandes capitales.

Por último, se recomienda abordar la dimensión humana de la transformación digital analizada. Si bien este estudio cuantificó los beneficios financieros y técnicos de la automatización (RPA y NOVA), queda pendiente analizar el impacto en la fuerza laboral técnica. Sería pertinente investigar las estrategias de *reskilling* (recualificación) necesarias para transformar a los operarios de campo tradicionales en gestores de activos digitales, asegurando que la eficiencia operativa no

derive en una crisis de capital humano, sino en una evolución de las competencias organizacionales.

**Referencias bibliográficas**

- Ahl, A., Yarime, M., Goto, M., Chopra, S. S., Kumar, N. M., Tanaka, K., y Sagawa, D. (2020). Exploring blockchain for the energy transition: Opportunities and challenges based on a case study in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109488>
- Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., y Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 319, 125834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>
- Antonopoulos, I., Robu, V., Couraud, B., Kirli, D., Norbu, S., Kiprakis, A., Flynn, D., Elizondo-González, S., y Wattam, S. (2020). Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 109899. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109899>
- Arango-Manrique, A., López-García, D., Arango-Lemoine, C., y Carvajal-Quintero, S. (2021). Business Model Proposal for Energy Transition towards Operational and Economic Sustainability for Rural Electrification: Colombian Case. *Sustainability*, 13(8), 4308. <https://doi.org/10.3390/su13084308>
- Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica. (2025). *Informe de sostenibilidad ACOGEN 2024*. [https://acolgen.org.co/wp-content/uploads/2025/05/Informe-Sostenibilidad-Alcogen-2024-2\\_compressed.pdf](https://acolgen.org.co/wp-content/uploads/2025/05/Informe-Sostenibilidad-Alcogen-2024-2_compressed.pdf)
- Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones. (2022). *Informe sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente 2020–2021. Sección energía*.

<https://andesco.org.co/wp-content/uploads/2022/12/Informe-sobre-el-estado-de-los-Recursos-Naturales-y-del-Ambiente-2020-2021.pdf>

Augier, M., y Teece, D. J. (2021). Dynamic capabilities and the role of managers in business strategy and economic performance. *Organization Science*, 20(2), 410-421. <https://doi.org/10.1287/orsc.1090.0424>

Báez Coronado, C. E. (2024). Diseño de un modelo de inteligencia artificial para predecir la energía solar producida [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio UdeA. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/e5ffe507-883a-4bf8-85ea-3278c3261085>

Bassey, K., Opoku-Boateng, J., Antwi, B., y Ntiakoh, A. (2024). Economic impact of digital twins on renewable energy investments. *Engineering Science y Technology Journal*, 5(7), 1318. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i7.1318>

Beltrán-Gallego, J., Carvajal-Quintero, S., y López-García, D. (2023). New business models in the Colombian energy market: Energy arbitration through storage systems. *Revista UIS Ingenierías*, 22(4), 85-98. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n4-2023008>

Birkinshaw, J., y Gupta, K. (2022). Clarifying the distinctive contribution of ambidexterity to the field of organization studies. *Academy of Management Perspectives*, 27(4), 287-298. <https://doi.org/10.5465/amp.2012.0167>

Bonilla Martínez, V. A., y Pérez Ramírez, S. A. (2020). Rutas de acción para el uso de blockchain en las actividades de distribución y comercialización de energía eléctrica en Colombia [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. Repositorio EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/bitstreams/0e392296-a3fb-422d-b606-fcf0b84e4e79/download>

- Borowski, P. (2021). Digitization, Digital Twins, Blockchain, and Industry 4.0 as Elements of Management Process in Enterprises in the Energy Sector. *Energies*, 14(7), 1885. <https://doi.org/10.3390/en14071885>
- Borowski, P. (2021). Innovative Processes in Managing an Enterprise from the Energy and Food Sector in the Era of Industry 4.0. *Processes*, 9(2), 381. <https://doi.org/10.3390/pr9020381>
- Bossink, B. A. G. (2020). Demonstrating sustainable energy: A review based model of sustainable energy demonstration projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1349-1362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.002>
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27-40. <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
- Braun, V., y Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Budes, F., Ochoa, G., Obregon, L., Arango-Manrique, A., y Álvarez, J. (2020). Energy, Economic, and Environmental Evaluation of a Proposed Solar-Wind Power On-grid System Using HOMER Pro®: A Case Study in Colombia. *Energies*, 13(7), 1662. <https://doi.org/10.3390/en13071662>
- Camacho, J., Aguirre, B., Ponce, P., Anthony, B., y Molina, A. (2024). Leveraging Artificial Intelligence to Bolster the Energy Sector in Smart Cities: A Literature Review. *Energies*, 17(2), 353. <https://doi.org/10.3390/en17020353>
- Cannata, M. (2023). The digitalization of the electricity system. Impact assessment of digital technologies on the electricity system and its main stakeholders [Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology]. Upcommons.

<https://upcommons.upc.edu/bitstreams/153cfeee-4223-49b1-936f-69aff65e76f7/download>

Cantarello, S., Martini, A., y Nosella, A. (2017). A multi-level model for organizational ambidexterity in the search phase of the innovation process. *Creativity and Innovation Management*, 21(1), 28-48. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2012.00624.x>

Celsia S.A. E.S.P. (2022). *Reporte Integrado 2021: Transformación en marcha*. Celsia. <https://reporteintegrado2021.celsia.com/wp-content/uploads/2022/03/revista-accionistas-2021.pdf>

Celsia S.A. E.S.P. (2023). *Reporte Integrado 2022: Resultados que inspiran*. Celsia. <https://reporteintegrado2022.celsia.com/descargas/>

Celsia S.A. E.S.P. (2024). *Reporte Integrado 2023: Innovación y eficiencia para un futuro sostenible*. Celsia. <https://reporteintegrado2023.celsia.com/descargas/>

Cerón, J., Gómez-Luna, E., y Vasquez, J. (2025). Driving the Energy Transition in Colombia for Off-Grid Regions: Microgrids and Non-Conventional Renewable Energy Sources. *Energies*, 18(4), 1010. <https://doi.org/10.3390/en18041010>

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2022). *Resolución CREG 101-1 de 2022. Medición avanzada y gestión independiente de datos e información*. [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_101-1\\_2022.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_101-1_2022.htm)

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2024a). *Resolución CREG 101 054 de 2024. Programa transitorio de participación de la demanda. Documento soporte técnico*. [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Resoluci%C3%B3n\\_CREG\\_101\\_054\\_2024/Documento\\_CREG\\_901\\_131\\_2024.pdf](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Resoluci%C3%B3n_CREG_101_054_2024/Documento_CREG_901_131_2024.pdf)

- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2024b). *Proyecto de Resolución CREG 701 054 de 2024. Programa permanente de participación de la demanda.*  
[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Proyecto\\_Resoluci%C3%B3n\\_CREG\\_701\\_054\\_2024/](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Proyecto_Resoluci%C3%B3n_CREG_701_054_2024/)
- Creswell, J. W., y Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). Sage publications.
- Dall-Orsoletta, A., Romero, F., y Ferreira, P. (2022). Open and collaborative innovation for the energy transition: An exploratory study. *Technology in Society*, 69, 101955.  
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101955>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Política de Transición Energética. Documento CONPES* 4075.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf>
- Empresas Públicas de Medellín. (2024). *Informe de sostenibilidad 2024.*  
<https://www.epm.com.co/content/dam/epm/institucional/informes-de-sostenibilidad-historicos-/informe-sostenibilidad-2024.pdf>
- Gallego, J., Ríos, M., García, D., y Quintero, S. (2021). Challenges and recommendations for the massification of energy management systems in Colombian industry. *Scientia et Technica*, 26(3), 329-336. <https://doi.org/10.22517/23447214.24946>
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., y Sorrell, S. (2017). The socio-technical dynamics of low-carbon transitions. *Joule*, 1(3), 463-479.  
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.018>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A., y Amran, A. (2021). Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: A systematic

- review and transformation roadmap. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(6), 1029-1058. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2020-0505>
- Giraldo, S., La Rotta, D., Nieto-Londoño, C., Vásquez, R., y Escudero-Atehortúa, A. (2021). Digital Transformation of Energy Companies: A Colombian Case Study. *Energies*, 14(9), 2523. <https://doi.org/10.3390/en14092523>
- Gitelman, L., y Kozhevnikov, M. (2023). New Business Models in the Energy Sector in the Context of Revolutionary Transformations. *Sustainability*, 15(4), 3604. <https://doi.org/10.3390/su15043604>
- González-Dumar, A., Arango-Aramburo, S., & Correa-Posada, C. (2024). Quantifying power system flexibility for the energy transition in Colombia. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109614. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109614>
- Grupo Energía Bogotá. (2025). *Reporte integrado de sostenibilidad 2024*. [https://www.grupoenergiabogota.com/content/download/50163/file/REPORTE%20INTEGRADO%20%20SOSTENIBILIDAD%202024\\_vf.pdf](https://www.grupoenergiabogota.com/content/download/50163/file/REPORTE%20INTEGRADO%20%20SOSTENIBILIDAD%202024_vf.pdf)
- Hanelt, A., Bohnsack, R., Marz, D., y Antunes Marante, C. (2021). A systematic review of the literature on digital transformation: Insights and implications for strategy and organizational change. *Journal of Management Studies*, 58(5), 1159-1197. <https://doi.org/10.1111/joms.12639>
- Hansen, T., y Nygaard, S. (2021). Sustainable innovation in the energy sector: A configurational approach. *Energy Policy*, 151, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112165>
- Helfat, C. E., y Peteraf, M. A. (2015). Managerial cognitive capabilities and the microfoundations of dynamic capabilities. *Strategic Management Journal*, 36(6), 831-850. <https://doi.org/10.1002/smj.2247>

- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Interconexión Eléctrica S A E S P. (2024). *Reporte Integrado 2023*. [https://www.isa.co/wp-content/uploads/2024/05/ReporteIntegradoISA2023\\_May20.pdf](https://www.isa.co/wp-content/uploads/2024/05/ReporteIntegradoISA2023_May20.pdf)
- Ismail, F., Al-Faiz, H., Hasini, H., Al-Bazi, A., y Kazem, H. (2024). A comprehensive review of the dynamic applications of the digital twin technology across diverse energy sectors. *Energy Strategy Reviews*, 53, 101334. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101334>
- Jansen, J. J. P., Simsek, Z., y Cao, Q. (2016). Ambidexterity and performance in multiunit contexts: Cross-level moderating effects of structural and resource attributes. *Strategic Management Journal*, 33(11), 1286-1303. <https://doi.org/10.1002/smj.1977>
- Kumar, A., Shankar, R., y Aljohani, A. J. (2021). A big data driven framework for demand-driven forecasting with effects of marketing-mix variables. *Industrial Marketing Management*, 90, 493-507. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2019.05.003>
- Kumar, N., Chand, A., Malvoni, M., Prasad, K., Mamun, K., Islam, F., y Chopra, S. (2020). Distributed Energy Resources and the Application of AI, IoT, and Blockchain in Smart Grids. *Energies*, 13(21), 5739. <https://doi.org/10.3390/en13215739>
- Leguizamon-Perilla, A., Rodriguez-Bernal, J., Moralez-Cruz, L., Farfán-Martinez, N., Nieto-Londoño, C., Vásquez, R., y Escudero-Atehortúa, A. (2023). Digitalisation and Modernisation of Hydropower Operating Facilities to Support the Colombian Energy Mix Flexibility. *Energies*, 16(7), 3161. <https://doi.org/10.3390/en16073161>
- Llera-Sastresa, E., Usón, A. A., Bribián, I. Z., y Scarpellini, S. (2017). Local energy communities in Spain: Challenges and opportunities. *Energy Policy*, 105, 613-617. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.010>

- Loock, M. (2020). Unlocking the value of digitalization for the European energy transition: A typology of innovative business models. *Energy research and social science*, 69, 101740. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101740>
- López, A., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F., Oberländer, N., y Oei, P. (2020). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1162-1172. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Méndez-Rodríguez, C., Rengifo-Rodas, C., Corrales-Muñoz, J., y Figueroa-Casas, A. (2020). Systematic review of energy efficiency (E.E.). Basis for an alternative vision of E.E. in Colombia. *Scientia et Technica*, 25(3), 449-460. <https://doi.org/10.22517/23447214.24449>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024a). *Escenarios nacionales de Transición Energética Justa*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/12383/Escenarios-TEJ-2024.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024b). *Costos de la Transición Energética Justa*. <https://minenergia.gov.co/documents/12635/Costos-TEJ-2024.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024c). *Metodología general de la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/13312/Metodologia-General-Estrategia-Nacional-Comunidades-Energeticas-2024.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024d). *Manual de gestión de Comunidades Energéticas*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/13313/Manual-Gestion-Comunidades-Energeticas-2024.pdf>

- Ministerio de Minas y Energía. (2025). *Hoja de Ruta de Transición Energética Justa*.  
[https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja\\_de\\_ruta\\_transicion\\_energetica\\_justa\\_T\\_EJ\\_2025.pdf](https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_T_EJ_2025.pdf)
- Negi, M. (2024). Towards the integration of IT/OT technologies in electricity based digitalized energy systems [Master's thesis, University of Vaasa]. Osuva Repository.  
<https://osuva.uwasa.fi/bitstreams/b3740f3e-a48d-42bc-9330-f2ed8d7756ca/download>
- Newbery, D., Pollitt, M. G., Ritz, R. A., y Strielkowski, W. (2018). Market design for a high-renewables European electricity system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 695-707. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.025>
- Ngar-yin Mah, D., van der Vleuten, J. M., Hills, P., y Tao, J. (2018). Consumer perceptions of smart grid development: Results of a Hong Kong survey and policy implications. *Energy Policy*, 117, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.019>
- O'Reilly, C. A., y Tushman, M. L. (2021). *Lead and disrupt: How to solve the innovator's dilemma*. Stanford University Press.
- Parida, V., Sjödin, D., y Reim, W. (2019). Reviewing literature on digitalization, business model innovation, and sustainable industry: Past achievements and future promises. *Sustainability*, 11(2), 391. <https://doi.org/10.3390/su11020391>
- Parra, N., Giraldo, S., La Rotta, D., Gómez, B., Mejía, Y., Morales, L., Nieto-Londoño, C., y Vásquez, R. (2024). A step towards digital transformation within a utility company through process automation for a sustainable energy transition. *The Journal of Engineering*, 2024(7), e12703. <https://doi.org/10.1049/tje2.70036>

- Perera, A., y Kamalaruban, P. (2021). Applications of reinforcement learning in energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110618. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110618>
- Petticrew, M., y Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Blackwell Publishing.
- Pinedo-López, J., Baena-Navarro, R., Durán-Rojas, N., Díaz-Cogollo, L., y Farak-Flórez, L. (2024). Energy Transition in Colombia: An Implementation Proposal for SMEs. *Sustainability*, 16(17), 7263. <https://doi.org/10.3390/su16177263>
- Plazas-Niño, F., Yeganyan, R., Cannone, C., Howells, M., Borba, B., y Quirós-Tortós, J. (2024). Open energy system modelling for low-emission hydrogen roadmap planning: The case of Colombia. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101401. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101401>
- Pritchard, A. (1969). Statistical bibliography or bibliometrics? *Journal of Documentation*, 25(4), 348-349.
- Pupo-Roncallo, O., Campillo, J., Ingham, D., Velásquez-Hernández, L., y Pourkashanian, M. (2021). The role of energy storage and cross-border interconnections for increasing the flexibility of future power systems: The case of Colombia. *Smart Energy*, 3, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100016>
- Raisch, S., Hargrave, T. J., y Van de Ven, A. H. (2018). The learning spiral: A process perspective on paradox. *Journal of Management Studies*, 55(8), 1507-1526. <https://doi.org/10.1111/joms.12397>

- Richter, M. (2020). Utilities' business models for renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109555.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112000846?via%3Dihub>
- Riveros Gil, C. J., y Salcedo Hernández, S. F. (2020). Automatización de la red de distribución eléctrica en media tensión del Campus Central de la UIS [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS. <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/1a245fe4-e067-4c1d-acd4-0e32e8de0663/download>
- Rocha, C., Boiler, J., Pizarro, S., Higuera, L., y Conde, W. (2022). Evolution, Challenges, and Perspective in the Implementation of Projects with Renewable Energy Sources: Colombia Case. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(6), 332-339.  
<https://doi.org/10.32479/ijeep.13460>
- Rocha-Meneses, L., Luna-delRisco, M., González, C., Moncada, S., Moreno, A., Rio, J., y Castillo-Meza, L. (2023). An Overview of the Socio-Economic, Technological, and Environmental Opportunities and Challenges for Renewable Energy Generation from Residual Biomass: A Case Study of Biogas Production in Colombia. *Energies*, 16(16), 5901. <https://doi.org/10.3390/en16165901>
- Rodríguez-Padilla, A. M., Morales-Acevedo, A., y Lastres, O. (2022). Renewable energy policy in Colombia: A stakeholder analysis. *Renewable Energy*, 192, 572-587.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.145>
- Schwab, K. (2016). *La cuarta revolución industrial*. Debate.
- Sharma, S., Agrawal, S., y Shukla, P. R. (2020). Technology and policy options for decarbonizing the energy sector. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100541.  
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100541>

- Simion, C., Verdeș, C., Mironescu, A., y Anghel, F. (2023). Digitalization in Energy Production, Distribution, and Consumption: A Systematic Literature Review. *Energies*, 16(4), 1960. <https://doi.org/10.3390/en16041960>
- Singh, M., Jiao, J., Klobasa, M., y Frietsch, R. (2022). Servitization of Energy Sector: Emerging Service Business Models and Startup's Participation. *Energies*, 15(7), 2705. <https://doi.org/10.3390/en15072705>
- Singh, R., Akram, S., Gehlot, A., Buddhi, D., Priyadarshi, N., y Twala, B. (2022). Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(17), 6619. <https://doi.org/10.3390/s22176619>
- Solaimani, S., y Van Der Veen, J. (2021). Open supply chain innovation: An extended view on supply chain collaboration. *Supply Chain Management: An International Journal*, 26(5), 558-577. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2020-0433>
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research y Social Science*, 13, 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>
- Stucki, T., y Woerter, M. (2019). Inbound and outbound innovation cooperation and product innovation in Swiss SMEs. *Industry and Innovation*, 26(4), 387-411. <https://doi.org/10.1080/13662716.2018.1522104>
- Sulek, A., y Borowski, P. (2024). Business Models on the Energy Market in the Era of a Low-Emission Economy. *Energies*, 17(13), 3235. <https://doi.org/10.3390/en17133235>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Informe sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica en Zonas No Interconectadas. Vigencia 2023.*

<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-de-la-prestacion-del-servicio-de-energia-electrica-vigencia-2023-ZNI.pdf>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024a). *Boletín tarifario de energía del SIN. II trimestre 2024*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Boletin-Tarifario-Energia-SIN-II-Trimestre-2024.pdf>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024b). *Boletín tarifario de energía ZNI. I trimestre 2024*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Boletin-tarifario-de-energia-ZNI-I-trimestre-2024.pdf>

Szczepaniuk, H., y Szczepaniuk, E. (2022). Applications of Artificial Intelligence Algorithms in the Energy Sector. *Energies*, *16*(1), 347. <https://doi.org/10.3390/en16010347>

Taghizadeh-Hesary, F., y Yoshino, N. (2019). The way to induce private participation in green finance and investment. *Finance Research Letters*, *31*, 98-103. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.04.016>

Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long Range Planning*, *51*(1), 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2017.06.007>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2024a). *Plan Energético Nacional 2024–2054. Tomo I*. [https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2024\\_2054/PDF1\\_PEN\\_2024-2054\\_Tomo\\_I.pdf](https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2024_2054/PDF1_PEN_2024-2054_Tomo_I.pdf)

Unidad de Planeación Minero Energética. (2024b). *Plan estratégico de eficiencia energética vinculado al PEN 2024–2054*. [https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2024\\_2054/PDF2\\_PE\\_Eficiencia\\_Energetica\\_Publicacion\\_Tomo\\_I.pdf](https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2024_2054/PDF2_PE_Eficiencia_Energetica_Publicacion_Tomo_I.pdf)

- Unidad de Planeación Minero Energética. (2024c). *Resolución 016 de 2024. Instrumentos PROURE*. [https://www1.upme.gov.co/Normatividad/016\\_2024.pdf](https://www1.upme.gov.co/Normatividad/016_2024.pdf)
- VOSviewer. (2025). *Visualizing scientific landscapes* (Version 1.6.20) [Software]. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. <https://www.vosviewer.com>
- Warner, K. S. R., y Wäger, M. (2019). Building dynamic capabilities for digital transformation: An ongoing process of strategic renewal. *Long Range Planning*, 52(3), 326-349. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2018.12.001>
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Yu, Y., Ren, F., Ju, Y., Zhang, J., y Liu, X. (2024). Exploring the Role of Digital Transformation and Breakthrough Innovation in Enhanced Performance of Energy Enterprises: Fresh Evidence for Achieving Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 16(2), 650. <https://doi.org/10.3390/su16020650>
- Zeng, B., Zhang, J., Yang, X., Wang, J., Dong, J., y Zhang, Y. (2017). Integrated planning for transition to low-carbon distribution system with renewable energy generation and demand response. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(3), 1153-1165. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2291553>
- Zhao, N., Zhang, H., Yang, X., Yan, J., y You, F. (2023). Emerging Information and Communication Technologies for Smart Energy Systems and Renewable Transition. *Advances in Applied Energy*, 10, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100125>

## Apéndices

### Apéndice A. Artículo de Investigación derivado

Revisión sistemática de técnicas y herramientas para la mejora simultánea de la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético Colombiano: Aplicación en la empresa Celsia.

Autora: Jeily Camila Amorocho Carvajal

Nota de origen del manuscrito: este artículo se deriva del trabajo de grado titulado Revisión sistemática de técnicas y herramientas para la mejora simultánea de la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético Colombiano: Aplicación en la empresa Celsia, presentado en la Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (Bucaramanga, 2024).

Autor: Jeily Camila Amorocho Carvajal

## Resumen

Esta investigación aborda la tensión operativa no resuelta en el sector energético colombiano, definida por una contradicción sistémica: la exigencia de estandarización para la eficiencia de costos choca con la necesidad de flexibilidad para la innovación en la transición energética. Ante la gestión fragmentada de estas variables, el objetivo general fue identificar las técnicas implementadas en el país para resolver esta tensión y evaluar su aplicabilidad en Celsia S.A. E.S.P. La metodología siguió un enfoque mixto, integrando una revisión sistemática de 923 documentos científicos y un estudio de caso validado mediante el análisis de los reportes corporativos del periodo 2020-2024. Los resultados evidenciaron que, aunque la literatura global presenta una fragmentación teórica, la evidencia empírica en Celsia demostró que la digitalización profunda (RPA y Centro NOVA) generó ahorros operativos de 165.000 millones de COP. Estos recursos validaron un mecanismo de financiación cruzada donde la eficiencia operativa (PermaneC) sostiene la inversión en innovación (EnergizarC). Se concluye que la eficiencia opera como el habilitador financiero de la innovación, resolviendo la contradicción inicial mediante modelos de negocio servitizados y de rotación de activos.

**Palabras clave:** Eficiencia operativa, innovación, ambidestreza organizacional, sector energético, transición energética, digitalización.

**Systematic review of techniques and tools for the simultaneous improvement of operational efficiency and innovation in the Colombian energy sector: Application in the company Celsia.**

**Abstract**

This research addresses the unresolved operational tension in the Colombian energy sector, defined by a systemic contradiction: the demand for standardization to achieve cost efficiency clashes with the need for flexibility for innovation in the energy transition. Given the fragmented management of these variables, the general objective was to identify the techniques implemented in the country to resolve this tension and evaluate their applicability in Celsia S.A. E.S.P. The methodology followed a mixed approach, integrating a systematic review of 923 scientific documents and a case study validated through the analysis of corporate reports from the 2020-2024 period. The results evidenced that, although global literature presents theoretical fragmentation, empirical evidence in Celsia demonstrated that deep digitalization (RPA and NOVA Center) generated operational savings of 165,000 million COP. These resources validated a cross-financing mechanism where operational efficiency (PermaneC) sustains investment in innovation (EnergizarC). It is concluded that efficiency operates as the financial enabler of innovation, resolving the initial contradiction through servitized business models and asset rotation.

**Keywords:** Operational efficiency, innovation, organizational ambidexterity, energy sector, energy transition, digitalization.

## Introducción

La transición energética dejó de ser un debate periférico en la política ambiental y pasó a reordenar decisiones industriales, regulatorias y financieras. En el sector energético, esa presión adopta una forma concreta: descarbonizar la oferta, digitalizar la operación y sostener tarifas competitivas mientras se incorporan fuentes con mayor variabilidad. Ahmad et al. (2021) describen un escenario donde la descarbonización convive con expectativas de productividad, lo que obliga a las empresas a optimizar activos existentes mientras abren espacio para tecnologías, servicios y prácticas que no encajan con rutinas tradicionales.

El ritmo del cambio también importa. Sovacool (2016) explica que las transiciones suelen tomar décadas por inercias técnicas, institucionales y sociales, aunque pueden acelerarse cuando existen señales políticas consistentes y caídas de costos tecnológicos. En energía, estas aceleraciones no se traducen únicamente en nueva capacidad de generación. Se expresan en la necesidad de rediseñar procesos de planeación, mantenimiento, despacho, atención al usuario y gestión de datos. Geels et al. (2017) aportan una lectura sociotécnica al entender la transición baja en carbono como una interacción entre un régimen establecido, nichos emergentes y presiones del entorno, interacción que obliga a las organizaciones a combinar continuidad operativa con aprendizaje y adaptación.

Dentro de ese entramado, la digitalización se convierte en un puente operativo entre dos exigencias que compiten por recursos. Borowski (2021) examina cómo la lógica de Industria 4.0 traslada la coordinación desde rutinas basadas en papel y juicio experto aislado hacia sistemas de datos, automatización y analítica avanzada. En la práctica, esto implica capturar información desde múltiples puntos de la cadena de valor, integrarla, volverla utilizable y devolverla en forma de decisiones, alertas y acciones. Cuando esa infraestructura de datos opera con disciplina, la eficiencia deja de depender exclusivamente de controles administrativos y empieza a expresarse como capacidad de respuesta ante variabilidad técnica y regulatoria, tal como anticipa la idea de eficiencia adaptativa.

Colombia se ubica en el cruce entre estas presiones globales y un marco institucional que intenta acelerar la transición sin romper su equilibrio social. El Departamento Nacional de Planeación (2022), por medio del documento CONPES 4075 Política de Transición Energética, fijó lineamientos y un plan de acción para impulsar eficiencia y adopción tecnológica a lo largo de la cadena energética. Esta dirección se articula con la Hoja de Ruta de Transición Energética Justa que presenta el Ministerio de Minas y Energía (2025), donde la digitalización y la innovación aparecen como rutas para materializar objetivos de modernización. En planeación, la Unidad de Planeación Minero Energética (2024a) actualiza el Plan Energético Nacional 2024–2054 y la Unidad de Planeación Minero Energética (2024b) vincula ese horizonte con un plan estratégico de eficiencia energética. La Unidad de Planeación Minero Energética (2024c) complementó este horizonte con la Resolución 016 de 2024 sobre instrumentos PROURE, conectando metas de eficiencia con proyectos e indicadores de seguimiento.

La ambición pública, sin embargo, se encuentra con una realidad operativa marcada por señales de precio, restricciones de inversión y exigencias de trazabilidad que recaen sobre el gasto operativo. Allí se abre la tensión operativa no resuelta que estructura este trabajo. Por un lado, las áreas de operación buscan reducir variabilidad, estandarizar y controlar costos para sostener el

servicio y cumplir métricas. Por otro lado, la transición demanda flexibilidad, experimentación y reconfiguración tecnológica en tiempos que rara vez coinciden con los ciclos regulatorios. En ese choque se materializa la contradicción sistémica: estabilidad para la eficiencia versus variabilidad requerida para la innovación.

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (2022), mediante la Resolución CREG 101-1 de 2022, actualizó el marco de medición avanzada y la gestión independiente de datos e información, estableciendo reglas para interoperabilidad y acceso. Ese movimiento es coherente con una transición gobernada por datos, aunque impone requisitos de infraestructura y coordinación. Más adelante, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2024a) expidió la Resolución CREG 101 054 de 2024, que crea un programa transitorio de participación de la demanda con soporte técnico y lineamientos para medición y verificación. En continuidad con esa dirección, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2024b) planteó el Proyecto de Resolución CREG 701 054 de 2024 para un programa permanente. Estas disposiciones incorporan flexibilidad desde la demanda, pero también exigen capacidad organizacional para medir, coordinar y responder operativamente, lo que amplifica la pregunta sobre cómo financiar y gobernar innovación bajo presión de eficiencia.

Desde la perspectiva empresarial, la pregunta ya no es si conviene mejorar eficiencia o innovar. La cuestión es cómo sostener ambas rutas sin que una cancele a la otra. Dall-Orsoletta et al. (2022) discuten que la transición requiere innovación abierta y colaboración, pero esa colaboración se vuelve difícil si la operación interna no cuenta con procesos y datos confiables. Parida et al. (2019) muestran que la digitalización puede catalizar innovación en modelos de negocio cuando se conecta con rediseño organizacional y creación de valor. Loock (2020) añade que la digitalización habilita tipologías de modelos innovadores en energía, particularmente cuando los servicios se apoyan en datos, monitoreo y nuevas formas de interacción con usuarios. En Colombia, Méndez-Rodríguez et al. (2020) revisan la discusión de eficiencia energética y apuntan a la necesidad de enfoques alternativos que no se limiten a indicadores tradicionales, mientras Gallego et al. (2021) discuten obstáculos para masificar sistemas de gestión de energía en industria colombiana, lo que sugiere un entorno donde la eficiencia requiere instrumentos y aprendizaje organizacional para escalar.

Este artículo responde a esa necesidad articulando tres lentes teóricos y un argumento operativo. El primer lente define eficiencia operativa y su evolución hacia eficiencia adaptativa en sistemas con alta variabilidad. El segundo lente usa ambidestreza organizacional para describir arquitecturas internas que permiten coexistencia de explotación y exploración bajo una misma gobernanza. El tercer lente integra capacidades dinámicas para explicar cómo las empresas detectan oportunidades, las capturan y reconfiguran activos en el tiempo. Sobre estas capas se sitúa la digitalización como infraestructura de decisión que conecta rutinas, datos y asignación de recursos en condiciones de transición.

## **Marco teórico**

### **Eficiencia operativa y eficiencia adaptativa en el sector energético**

La eficiencia operativa suele asociarse a ahorros de corto plazo, pero en empresas energéticas describe una capacidad de gestión que se expresa en desempeño de activos, pérdidas técnicas, pérdidas comerciales, continuidad del servicio y estructura de costos. Sharma et al. (2020) definen este concepto como la capacidad de maximizar rendimiento de activos físicos y minimizar pérdidas y costos operacionales a lo largo de la cadena de valor. Esta definición es útil porque amarra la eficiencia a variables observables en generación, transmisión y distribución, evitando que el debate se reduzca a recortes generales.

La transición energética reconfigura esa definición. Kumar et al. (2021) plantean que presiones regulatorias y compromisos climáticos empujan a incorporar dimensiones ambientales en indicadores de desempeño, lo que amplía la noción de eficiencia hacia una lectura técnica, económica y ambiental. Zeng et al. (2017) vinculan eficiencia a tres pilares: optimización de activos físicos, gestión de recursos operativos y digitalización de procesos para disminuir tiempos de respuesta y mejorar decisiones. Esta conexión es especialmente pertinente para empresas con activos intensivos y obligaciones de continuidad, donde la eficiencia requiere decisiones que combinan ingeniería, operación y analítica.

Newbery et al. (2018) introducen esa idea a través de la eficiencia adaptativa y distinguen eficiencia estática de eficiencia dinámica. La primera se asocia a hacer mejor lo que ya se hace; la segunda se vincula con ajustar configuraciones operativas ante cambios en mercado, regulación, disponibilidad de recursos y variabilidad de generación renovable. Para una empresa del sector, esa eficiencia adaptativa se materializa en rutinas de pronóstico, coordinación de mantenimiento, automatización de actividades repetitivas y gobierno de datos que permita actuar con velocidad, sin sacrificar confiabilidad.

### **Ambidestreza organizacional**

La tensión entre eficiencia e innovación se expresa como tensión por recursos, por métricas y por lenguaje gerencial. O'Reilly y Tushman (2021) describen la ambidestreza organizacional como la capacidad de equilibrar explotación de mercados actuales con exploración de nuevas oportunidades. En energía, la explotación suele expresarse en rutinas de operación, mantenimiento y cumplimiento regulatorio; la exploración toma forma en laboratorios de innovación, nuevos servicios digitales, pilotos con tecnologías habilitadoras y rediseño de modelos de negocio.

Raisch et al. (2018) sintetizan dos arquitecturas para gestionar esa tensión. La separación estructural asigna explotación y exploración a unidades diferentes, cada una con procesos, incentivos y métricas propios; la integración contextual busca que equipos alternen o combinen tareas bajo reglas compartidas. Birkinshaw y Gupta (2022) agregan una precisión conceptual: la ambidestreza no se agota en una estructura, porque requiere mecanismos de coordinación y asignación de recursos que sostengan la tensión sin desplazarla hacia conflicto permanente. En empresas energéticas grandes, la separación estructural suele facilitar autonomía de innovación mientras se preserva estabilidad operativa, aunque su eficacia depende de la alineación estratégica desde la alta dirección.

La literatura también muestra que la ambidestreza no se sostiene por inercia. Jansen et al. (2016) la presentan como proceso que exige ajustes continuos frente a cambios tecnológicos y regulatorios, lo que vuelve central el rol de la alta dirección como integradora de estrategia. Cantarello et al. (2017) proponen un modelo multinivel que ayuda a conectar exploración en etapas tempranas con rutinas de operación y con aprendizaje organizacional. Para empresas energéticas en transición, esta perspectiva permite analizar cómo se decide qué se protege, qué se transforma y qué se experimenta, dentro de límites regulados y bajo presión de eficiencia.

### **Capacidades dinámicas**

La ambidestreza describe la coexistencia de dos lógicas; las capacidades dinámicas explican cómo una empresa construye habilidad para moverse cuando el entorno cambia. Teece (2018) propone un marco que distingue tres conjuntos de actividades: detectar oportunidades, capturarlas movilizandolos recursos, y reconfigurar activos y estructuras para sostener competitividad. En energía, este marco ofrece un lenguaje para conectar señales externas, decisiones de inversión y cambios organizacionales en un proceso con temporalidad clara.

Warner y Wäger (2019) aplican esta lógica a la transformación digital y sostienen que las capacidades dinámicas se construyen como renovación estratégica constante. Desde esta lectura, digitalizar no es un proyecto con fecha de cierre; es un proceso donde la empresa aprende a leer señales tempranas, experimentar con tecnología, ajustar portafolio de activos y gobernar datos para operar y transformar al mismo tiempo. Helfat y Peteraf (2015) aportan un criterio complementario al proponer evaluar calidad de capacidades, lo que obliga a observar si las rutinas creadas son transferibles, escalables y sostenibles bajo cambios de entorno.

Una implicación directa del marco es su dimensión financiera y de asignación de recursos. Capturar oportunidades y reconfigurar activos exige inversión y, en mercados con presiones tarifarias, esa inversión puede competir con la estabilidad del gasto operativo. En consecuencia, el marco permite formular una hipótesis de funcionamiento: una empresa puede financiar exploración mediante eficiencias operativas si logra traducir ahorros en capacidad de inversión, con reglas internas que eviten que el ahorro se disuelva en gasto corriente o se pierda por falta de trazabilidad.

### **Digitalización e Industria 4.0**

La digitalización en energía adopta formas diversas, desde medición avanzada hasta automatización y analítica predictiva. Borowski (2021) vincula Industria 4.0 con procesos de innovación que reconfiguran operaciones y abren oportunidades de servicios basados en datos. Zhao et al. (2023) revisan tecnologías de información y comunicación emergentes que soportan sistemas energéticos inteligentes, y Szczepaniuk y Szczepaniuk (2022) sintetizan aplicaciones de algoritmos de inteligencia artificial en el sector, lo que muestra un campo donde la frontera tecnológica avanza con rapidez.

El punto crítico se ubica en la integración. Hanelt et al. (2021) discuten tensiones asociadas a transformar organizaciones que operan con sistemas heredados y estructuras pensadas para estabilidad, mientras Ghobakhloo et al. (2021) muestran que la adopción depende de capacidades internas para manejar interoperabilidad, competencias digitales y gobernanza. Parida et al. (2019)

conectan digitalización con innovación de modelos de negocio y destacan el papel de la servitización cuando los datos permiten ofrecer valor como servicio, superando la lógica de venta de productos o infraestructura sin acompañamiento digital.

En Colombia, la arquitectura institucional sobre datos y medición condiciona estas rutas. La Comisión de Regulación de Energía y Gas (2022) promueve medición avanzada y gestión independiente de datos, y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2024a, 2024b) define esquemas que exigen medición y verificación para flexibilidad desde la demanda. Este marco crea condiciones para que la digitalización opere como infraestructura compartida, aunque obliga a las empresas a fortalecer sus capacidades internas para capturar datos, convertirlos en decisiones y coordinar actores en la cadena.

### **Objetivo del artículo**

El artículo tiene como objetivo identificar y organizar técnicas y herramientas para mejorar de manera simultánea la eficiencia operativa y la innovación en el sector energético colombiano, y evaluar su aplicabilidad mediante una revisión sistemática de literatura científica y un estudio de caso empresarial basado en evidencia documental.

### **Metodología**

#### **Diseño general y lógica fásica**

La investigación se estructuró como un estudio de enfoque mixto, entendido como la integración sistemática de métodos cuantitativos y cualitativos en un mismo trabajo, con el fin de responder preguntas que exigen medición de patrones y, al mismo tiempo, interpretación del contenido (Creswell y Plano Clark, 2018). Esta arquitectura metodológica permitió operar en dos niveles complementarios. En el primero, se cuantificó la forma del campo científico mediante análisis bibliométrico. En el segundo, se interpretaron y organizaron hallazgos técnicos y organizacionales, y se evaluó su aplicabilidad mediante evidencia documental corporativa.

El procedimiento se ejecutó en dos fases secuenciales. La Fase 1 recopiló y procesó literatura científica en Scopus, aplicando doble análisis sobre el mismo conjunto de datos: bibliometría para redes y tendencias, y análisis temático para sintetizar técnicas, herramientas y patrones reportados en el contexto del sector energético colombiano. La Fase 2 trasladó el aprendizaje de la literatura a un caso empresarial, mediante análisis documental de reportes corporativos, con una matriz de evaluación orientada a contrastar técnicas halladas con necesidades estratégicas y condiciones del entorno local (Bowen, 2009; Braun y Clarke, 2006).

### **Fase 1: revisión sistemática de literatura y análisis bibliométrico**

#### **Búsqueda en Scopus y ecuación de consulta**

La recolección inició con una ecuación de búsqueda amplia ejecutada en Scopus en campos de título, resumen y palabras clave, combinando términos de eficiencia operativa, optimización de procesos, innovación y digitalización, junto con el marco del sector energético y el contexto Colombia. Esta búsqueda inicial arrojó 1.795 documentos y, a partir de ese universo, se aplicó un flujo de identificación, filtrado y elegibilidad para refinar el corpus y asegurar pertinencia temática y temporal (Petticrew y Roberts, 2006).

### **Criterios de inclusión y exclusión**

El protocolo de filtrado se diseñó con cuatro criterios operativos:

1. Periodo temporal: publicaciones desde el 1 de enero de 2020 hasta el año de la búsqueda (2025), excluyendo documentos anteriores a 2020.
2. Tipo de documento: se incluyeron artículos y ponencias, excluyendo revisiones, libros, capítulos de libro, editoriales y cartas.
3. Área temática: se incluyeron documentos clasificados en Energy, Engineering, Business, Management and Accounting y Environmental Science, excluyendo áreas no asociadas al problema de investigación.
4. Contexto geográfico: se incluyeron documentos que incorporan Colombia en título, resumen o palabras clave según la ecuación, excluyendo estudios sin mención del contexto colombiano.

Tras aplicar estos filtros, el conjunto final quedó conformado por 923 artículos, lo cual fijó el tamaño de la muestra bibliométrica y el universo de análisis temático.

### **Técnicas de análisis: bibliometría con VOSviewer y análisis temático**

Sobre los 923 artículos se aplicaron dos técnicas articuladas.

En la bibliometría, se trabajó con los metadatos exportados de Scopus en formato CSV. Con ese insumo se procesaron redes de coautoría, co-ocurrencia de palabras clave y agrupamientos temáticos mediante VOSviewer (2025). Para el mapa de palabras clave se utilizaron Author Keywords, con un umbral mínimo de cinco ocurrencias por término, lo que permitió observar nodos, enlaces y clústeres asociados a la agenda científica reciente.

En paralelo, se aplicó análisis temático como procedimiento de síntesis cualitativa, entendido como la identificación y organización de patrones dentro de datos textuales (Braun y Clarke, 2006). En esta fase se realizó cribado de resúmenes para decidir qué artículos se integrarían a la síntesis final, apoyado en un protocolo de evaluación de calidad para los 923 resúmenes con tres criterios: enfoque del artículo sobre eficiencia operativa, innovación o digitalización; aplicación al sector energético; y aporte concreto en forma de técnicas, herramientas, estrategias o patrones observables, evitando piezas puramente teóricas o descripciones generales sin operacionalización.

### **Fase 2: estudio de caso y evaluación de aplicabilidad en Celsia**

La segunda fase evaluó la aplicabilidad de las técnicas identificadas en el caso de Celsia S.A. E.S.P., con validación por análisis documental. La evidencia empírica se soportó en reportes corporativos del periodo 2020-2024, revisados de forma sistemática para extraer información sobre estrategia, prioridades operativas, capacidades y materialización de digitalización y nuevos modelos de negocio (Bowen, 2009).

Para describir la selección del corpus se adopta estrictamente el siguiente criterio operativo:

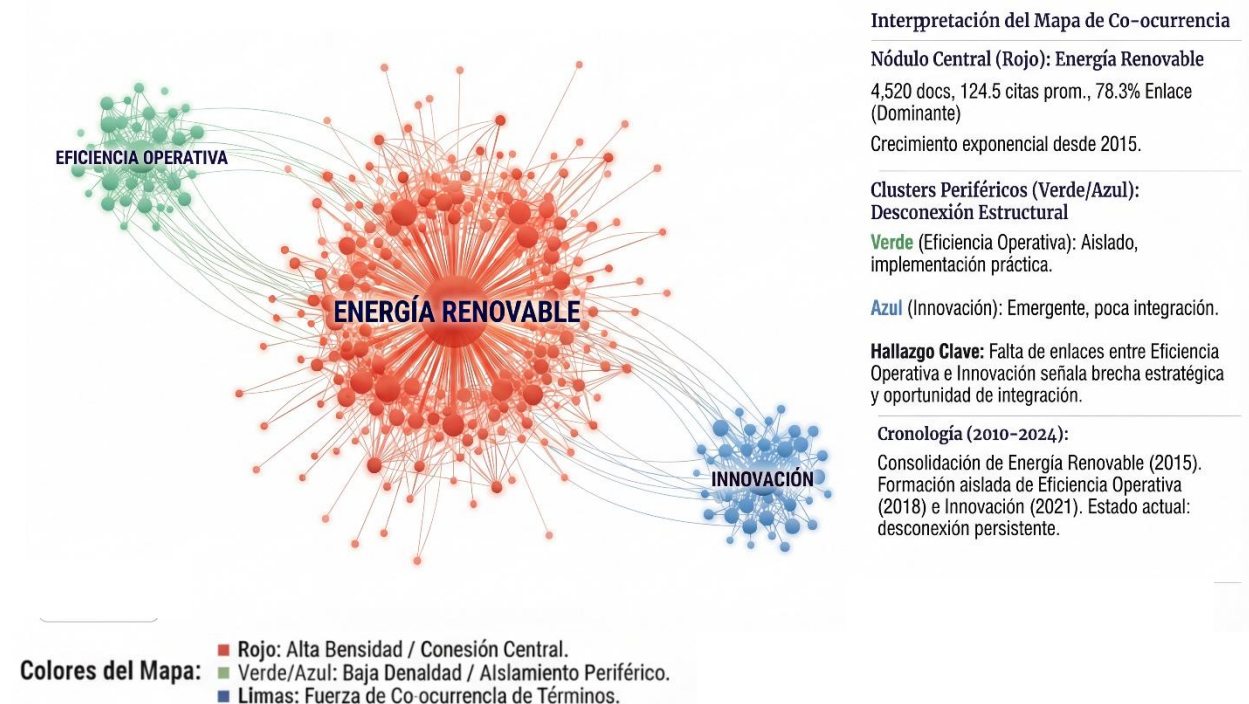
Para garantizar la validez y trazabilidad, se definió un corpus documental acotado compuesto por los Reportes Integrados de Celsia S.A. E.S.P. (2020-2024). La selección obedeció a tres criterios: Oficialidad (documentos auditados), Continuidad (trazabilidad de estrategias PermaneC y EnergizarC) y Pertinencia (foco en gestión de activos e I+D, descartando gestión humana).

El análisis se apoyó en una matriz de evaluación que permitió contrastar, de manera sistemática, las técnicas encontradas en la literatura con dos conjuntos de condiciones: necesidades estratégicas publicadas por la empresa y restricciones del entorno colombiano reportadas por la literatura. En términos de diseño, esta matriz funcionó como puente entre un mapa de herramientas y su viabilidad de implementación en una empresa con operación regulada y presiones de gasto operativo.

## **Resultados**

### **Bibliometría: estructura del campo y fragmentación de redes**

El análisis bibliométrico del corpus de 923 artículos muestra un campo organizado en torno a un núcleo temático de alta densidad, con fuerte concentración en energías renovables y transición energética. La visualización de co-ocurrencia de palabras clave, construida con umbral de cinco ocurrencias y 107 términos visibles, permite observar que renewable energy aparece como el nodo de mayor frecuencia, con 113 ocurrencias, conectado de forma estrecha con energy transition, sustainability y otros términos próximos en la red (VOSviewer, 2025). Esta configuración sugiere que la discusión científica reciente ordena la conversación sobre eficiencia e innovación como piezas subordinadas a la descarbonización y al cambio de matriz.

**Figura 1.** Mapa de calor de co-ocurrencia de palabras clave

**Nota.** Visualización generada con VOSviewer basada en 923 documentos. La imagen ha sido simplificada para mostrar únicamente los nodos principales. Se evidencia la desconexión estructural entre los clústeres periféricos de Eficiencia Operativa e Innovación.

La misma estructura muestra un contraste: energy efficiency registra 23 ocurrencias e innovation 17, ubicándose en una zona periférica respecto del núcleo renovable (VOSviewer, 2025). La periferia no implica ausencia, sino una forma específica de uso conceptual. La eficiencia aparece cercana a clústeres asociados con climate change y energy policy, lo que indica que se discute, con frecuencia, como instrumento de mitigación y política energética, más que como objeto central de gestión operativa y reconfiguración interna de procesos. La innovación, por su parte, tiende a leerse en relación con despliegue renovable y sus impactos económicos y ambientales, con mayor visibilidad de términos vinculados a digitalización y tecnologías como inteligencia artificial e hidrógeno. En suma, la literatura del periodo privilegia la pregunta por qué transformar, mientras la pregunta cómo sostener transformación e indicadores operativos en empresas reguladas aparece menos desarrollada como agenda autónoma.

La fragmentación también se evidencia en la red social de colaboración académica. El análisis de coautoría, construido sobre los 145 investigadores más prolíficos, mostró dispersión en clústeres aislados, con escasez de líneas de interacción entre grupos (VOSviewer, 2025). Esta morfología sugiere producción distribuida y poco integrada: se investiga sobre transición, renovables y política desde comunidades que no necesariamente convergen en un lenguaje común sobre gestión operativa e innovación organizacional. En términos aplicados, este patrón tiende a traducirse en recomendaciones parciales, con baja articulación entre discusión tecnológica, métricas de

operación y restricciones institucionales. Este resultado justifica el valor de articular bibliometría con evidencia de implementación empresarial, con el fin de observar mecanismos concretos que conecten eficiencia operativa con capacidad de innovación.

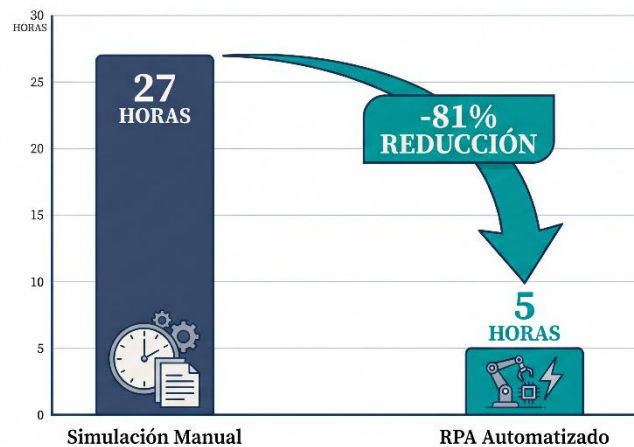
## **Tecnologías habilitadoras**

### **RPA: automatización y liberación de capacidad analítica**

Dentro de las técnicas reportadas en el contexto colombiano, la automatización robótica de procesos destaca por su impacto inmediato sobre tiempos de ejecución y carga administrativa. Parra et al. (2024) documentan el caso de AES Colombia, donde la implementación de RPA transformó la gestión de datos operativos y automatizó simulaciones de precios de energía. El resultado cuantitativo principal fue la reducción del tiempo de ejecución de 27 horas a 5 horas, lo que liberó capacidad analítica para decisiones estratégicas y redujo fricción operativa asociada a tareas repetitivas.

Giraldo et al. (2021) reportan un efecto paralelo en procesos administrativos vinculados a cumplimiento: la automatización disminuyó el trabajo manual dedicado a declaraciones fiscales, pasando de 1.560 horas a 584 horas anuales, con mitigación del riesgo de error humano. Leguizamon-Perilla et al. (2023) complementan este panorama al reportar el desarrollo de plataformas de gestión de información hidrológica en tiempo real, conectando automatización y datos con mayor capacidad de respuesta ante variaciones climáticas. Estas tres evidencias convergen en un mismo mecanismo: la digitalización reduce latencia operativa, y esa reducción se traduce en tiempo disponible para análisis, control y coordinación.

La Figura 2 sintetiza este desplazamiento de esfuerzo humano desde ejecución manual hacia supervisión y análisis. Su lectura se apoya en el comparativo antes y después: horas-hombre asociadas a procesos manuales se reducen y los porcentajes reflejan ganancia neta de eficiencia reportada en los dos frentes, operativo y administrativo, con datos adaptados de Parra et al. (2024) y Giraldo et al. (2021). La figura permite interpretar el efecto como reconfiguración del trabajo, no como simple aceleración. Cuando un proceso deja de consumir ciclos largos de cómputo y validación manual, el sistema de decisión puede incorporar más escenarios, revisar supuestos con mayor frecuencia y reducir acumulación de rezagos. En empresas energéticas con presión por trazabilidad y cumplimiento, esta reasignación de tiempo se convierte en un habilitador directo de innovación incremental: se abren ventanas para probar mejoras, ajustar parámetros y sistematizar aprendizaje sin comprometer continuidad operativa.

**Figura 2.** Impacto de la automatización en tiempos operativos (Caso AES)

*Nota.* Comparativo de tiempos de ejecución para simulaciones de precios de energía. La implementación de RPA redujo el ciclo de 27 horas a 5 horas (-81.5%), liberando capacidad analítica. Adaptado de Parra et al. (2024).

### **BESS: estabilización técnica y calidad de potencia**

El análisis técnico de tecnologías de gestión de activos distribuidos ubica a los sistemas de almacenamiento de energía en baterías como instrumento para gestionar variabilidad y sostener parámetros de calidad. González-Dumar et al. (2024) y Pupo-Roncillo et al. (2021) señalan que una alta penetración de fuentes renovables variables puede introducir fluctuaciones de voltaje en niveles de tensión bajos, en un rango entre 1% y 3,1%, afectando confiabilidad y estabilidad de la red. Bajo este escenario, Pupo-Roncillo et al. (2021) muestran que los BESS actúan como activos de infraestructura capaces de proveer servicios complementarios, en particular regulación de frecuencia y soporte de voltaje, con mejora de la calidad de potencia.

El papel técnico descrito por la literatura del corpus se entiende como una respuesta operacional a dos presiones simultáneas. Primero, las renovables variables alteran la forma en que se mantienen los equilibrios instantáneos de la red, elevando la necesidad de recursos que puedan responder con rapidez a desviaciones de frecuencia. Segundo, la calidad del suministro se ve afectada por oscilaciones de voltaje que se expresan con mayor intensidad en redes de distribución y en condiciones de baja tensión. En ese contexto, el almacenamiento permite amortiguar variaciones, apoyar perfiles de voltaje y contribuir a sostener continuidad del servicio, lo cual se traduce en eficiencia operativa técnica cuando reduce eventos de intervención, reclamos y acciones correctivas.

### **Caso Celsia: evidencia financiera, estrategia dual y modelos servitizados**

#### **Estrategia dual: PermaneC y EnergizarC como arquitectura de gestión**

La evidencia documental del caso muestra una estructura estratégica organizada en dos directrices que operan como mecanismos complementarios. Celsia S.A. E.S.P. (2024) define PermaneC como vehículo para optimización de estructura de capital y excelencia operativa, con una orientación

explícita a control de costos y disciplina financiera. En los informes de gestión, Celsia S.A. E.S.P. (2023) documenta procesos de saneamiento financiero asociados a reducción de endeudamiento y mejora de márgenes, lo que se traduce en liberación de flujo de caja.

Este desempeño habilita EnergizarC como directriz orientada a crecimiento en renovables y nuevos negocios. La relación observada en el caso se expresa como un vínculo operacional: control de OPEX y decisiones financieras conservan espacio para sostener CAPEX en innovación, incluso bajo volatilidad macroeconómica. En términos de lectura organizacional, la dualidad actúa como mecanismo para mantener continuidad del negocio actual y, en paralelo, financiar exploración y expansión.

### **Centro NOVA, ReimaginarC y el hallazgo financiero: 165.000 millones de COP**

El hallazgo cuantitativo más visible del caso es el ahorro acumulado de 165.000 millones de COP atribuido a digitalización, asociado al programa ReimaginarC y a la materialización operativa mediante el Centro de Control NOVA (Celsia S.A. E.S.P., 2024). La evidencia indica que la digitalización se integró en el núcleo de operación física al centralizar operación de plantas de generación y activos de distribución, habilitando operación remota de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, con transición hacia telecontrol predictivo (Celsia S.A. E.S.P., 2024). En términos operativos, esta integración permite entender el ahorro como resultado de reconfiguración de procesos y control, más que como reducción aislada de partidas.

El efecto se reflejó en la estructura de costos: el crecimiento del OPEX se mantuvo por debajo de la inflación acumulada del periodo, lo que indica que la empresa logró absorber presiones inflacionarias sin deterioro proporcional del gasto real (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Esta relación constituye una evidencia financiera directa para el argumento del artículo: la eficiencia operativa, cuando se apoya en digitalización, puede convertirse en mecanismo estable de protección de márgenes y, al mismo tiempo, en fuente de recursos para sostener iniciativas de innovación.

La Figura 3 permite una lectura guiada de esa mecánica. La barra roja representa la presión al alza por inflación, la barra verde representa los ahorros estructurales logrados por digitalización por un valor de 165.000 millones de COP, y la barra azul representa el gasto real controlado tras la compensación. La interpretación financiera es directa: el ahorro opera como cobertura interna frente a indexación de costos, de modo que el gasto real no reproduce, de manera automática, el aumento externo de precios. El resultado inmediato es protección de OPEX real. El resultado de segundo orden es la capacidad de preservar margen EBITDA y sostener decisiones de inversión, dado que el ahorro no queda capturado como evento contable aislado, sino como amortiguador recurrente cuando la digitalización mantiene desempeño operativo.

**Figura 3.** *Mecanismo de compensación de costos mediante eficiencias operativas*



**Nota.** Análisis del impacto financiero de la digitalización frente a la inflación acumulada. Adaptado de los Reportes Integrados de Celsia S.A. E.S.P. (2024).

### **Atera y servitización: captura de valor detrás del medidor**

La evidencia documental valida la adopción de un modelo servitizado mediante la spin-off Atera. Celsia S.A. E.S.P. (2024) describe a Atera como gestor de activos térmicos y eléctricos, superando el rol tradicional de comercialización. El mecanismo operativo se organiza como modelo ESCO: Atera asume inversión inicial en sustitución tecnológica de equipos ineficientes, y el cliente remunera el servicio con cargo a ahorros generados por la mejora de eficiencia (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Esta estructura desplaza el problema desde una decisión de compra hacia una relación de servicio respaldada por desempeño y medición.

La dimensión financiera del modelo se observa en la escala prevista. Celsia S.A. E.S.P. (2024) registra una meta de inversión de 500 millones de USD asociada a este vehículo, lo que muestra su ambición de crecimiento y su pretensión de operar como plataforma de inversión en eficiencia industrial. En términos de innovación de modelo de negocio, el caso muestra una traducción práctica de servitización: la empresa integra monitoreo y optimización de consumo para sostener relación de largo plazo con clientes industriales, capturando valor mediante desempeño y no únicamente mediante venta de energía.

### **Discusión**

La lectura conjunta de la bibliometría y del caso empresarial permite ubicar un contraste que explica buena parte del problema colombiano. El mapa de co-ocurrencia concentra la conversación científica reciente en energías renovables y transición, mientras eficiencia e innovación aparecen con menor peso relativo, situadas hacia los bordes de la red (VOSviewer, 2025). Esa distribución sugiere que, en la práctica, el debate se ordena alrededor de qué tecnologías desplazarán el carbono, y queda menos desarrollado el cómo sostener la transformación dentro de empresas reguladas que deben mantener calidad del servicio, estabilidad financiera y disciplina de gasto.

Ese vacío se amplifica cuando se incorpora evidencia del entorno nacional. Giraldo et al. (2021) y Parra et al. (2024) reportan barreras tecnológicas recurrentes asociadas con sistemas heredados y lentitud en la adopción digital. En términos organizacionales, esto es más que un obstáculo técnico: condiciona la manera en que se gobiernan los datos, se diseñan procesos y se asignan recursos. Hanelt et al. (2021) describen tensiones típicas de transformación digital cuando conviven arquitecturas legadas con nuevas capacidades, y Warner y Wäger (2019) plantean que la renovación digital requiere desarrollar capacidades organizacionales sostenidas, no proyectos aislados. Bajo ese marco, la experiencia del caso permite una inferencia: cuando la digitalización se inserta en el núcleo de operación y gestión de activos, la barrera tecnológica se convierte en un problema de gobernanza y de inversión con retorno verificable, en vez de permanecer como diagnóstico.

El hallazgo de los ahorros por 165.000 millones de COP reorganiza el significado de eficiencia operativa en transición energética. En la evidencia corporativa, la digitalización asociada al Centro NOVA y al programa de transformación reporta ese nivel de ahorro acumulado y se articula con una contención del OPEX por debajo de la inflación del periodo (Celsia S.A. E.S.P., 2024). La figura del mecanismo de compensación sintetiza la lógica: la presión inflacionaria empuja el costo hacia arriba, el ahorro opera como contrapeso interno y el gasto real queda controlado tras esa compensación (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Así, la eficiencia deja de describirse como recorte coyuntural y pasa a operar como cobertura interna contra shocks de costos, con un efecto directo sobre la preservación de capacidad de inversión.

Esa relectura cambia el sentido de la tensión operativa inicial. En una empresa regulada, la tensión se presenta cuando el control de variabilidad y la estandarización compiten con la flexibilidad que exige innovar. O'Reilly y Tushman (2021) proponen que la ambidestreza se expresa en la convivencia de explotación y exploración, y que su eficacia depende de cómo se gobierna la asignación de recursos. El caso ofrece un ejemplo operativo de esa arquitectura: PermaneC aparece ligado a excelencia operativa, disciplina financiera y control de costos, mientras EnergizarC se orienta al crecimiento en renovables y nuevos negocios (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Visto desde Birkinshaw y Gupta (2022), el valor del arreglo no está en la etiqueta estratégica, sino en el mecanismo: la explotación reduce costos base y estabiliza métricas; esa estabilidad habilita la exploración sin asfixiar la operación.

La automatización aporta una pieza concreta a ese mecanismo. Parra et al. (2024) documentan en AES Colombia una reducción de tiempo de simulación de precios de 27 horas a 5 horas mediante automatización robótica de procesos, liberando capacidad analítica para decisiones (Parra et al., 2024). Giraldo et al. (2021) reportan reducciones de carga administrativa anual tras automatización en procesos de reporte, con disminución de horas de trabajo manual (Giraldo et al., 2021). Estos resultados se alinean con Borowski (2021) al entender Industria 4.0 como reorganización del trabajo a través de datos, automatización y analítica. Lo que emerge en conjunto es un patrón: la automatización reduce latencias y fricciones internas, y ese tiempo recuperado se convierte en insumo para explorar escenarios, ajustar parámetros y acelerar aprendizaje sin sacrificar control operativo.

El papel del almacenamiento en baterías completa la lectura desde el plano técnico. La literatura del corpus presenta al BESS como activo capaz de aportar a regulación de frecuencia y soporte de voltaje en escenarios con mayor variabilidad renovable (Pupo-Roncallo et al., 2021). En el caso,

se reporta la configuración del activo para entregar energía en horas pico y prestar servicios complementarios de regulación de frecuencia al Sistema Interconectado Nacional, lo que valida su rol como estabilizador de red (Celsia S.A. E.S.P., 2024). La matriz de aplicabilidad también muestra que, aunque la tecnología está validada técnicamente, su escalamiento se vincula con brechas regulatorias asociadas a remuneración de servicios complementarios, bajo supervisión de la CREG (González-Dumar et al., 2024). En síntesis, el BESS emerge como respuesta a un requerimiento operativo, pero su despliegue a gran escala depende de señales regulatorias consistentes.

La innovación financiera aparece como la tercera pieza del rompecabezas. La evidencia documenta la spin-off Atera como vehículo para gestionar activos y operar bajo un modelo tipo ESCO, donde el proveedor asume inversión inicial y el cliente paga vía gasto operativo apalancado en ahorros (Celsia S.A. E.S.P., 2024). Sułek y Borowski (2024) analizan modelos servitizados de Energy as a Service como mecanismos que superan barreras financieras tradicionales, y Beltrán-Gallego et al. (2023) explican la transferencia de riesgo subyacente: el CAPEX se desplaza hacia el proveedor y el cliente remunera el servicio con OPEX. Singh et al. (2022) complementan al señalar que esta arquitectura mejora eficiencia económica al eliminar inversión inicial. Lo que se observa, entonces, es una solución que traduce la tensión operativa en una tensión financiera manejable: la empresa evita exigir CAPEX al cliente, reduce fricción de adopción y captura valor mediante desempeño, medición y contratos.

Esa reconfiguración se conecta con la disonancia institucional descrita en el documento. La política pública plantea una ruta de transición y modernización, y la planeación sectorial proyecta crecimiento de demanda, lo que presiona optimización de infraestructura y operación (Departamento Nacional de Planeación, 2022; Unidad de Planeación Minero Energética, 2024a). En paralelo, el marco regulatorio introduce requisitos y mecanismos que incrementan demanda de capacidades de medición, verificación y gestión de datos, como se observa en la actualización de medición avanzada y en programas de participación de la demanda (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2022, 2024a, 2024b). La implicación para el sector es clara: si la regulación exige trazabilidad y flexibilidad, las empresas que carezcan de capacidades digitales verán crecer sus costos de cumplimiento. En cambio, si desarrollan esas capacidades, pueden convertir exigencias regulatorias en palancas de eficiencia y en plataformas para nuevos servicios.

Con ese telón de fondo, la validación del marco de capacidades dinámicas se puede describir con un encadenamiento observable. Teece (2018) propone detectar, capturar y transformar como procesos que sostienen ventaja en entornos cambiantes. En el caso, la detección se asocia con la lectura del entorno de transición, con presión por flexibilidad, datos y control de costos. La captura se evidencia en la inversión y despliegue de digitalización aplicada a operación y gestión de activos, con resultados económicos reportados, y en la adopción de automatización y herramientas asociadas al programa corporativo (Celsia S.A. E.S.P., 2024). La transformación se expresa en la reorganización del portafolio y en la creación de vehículos y modelos que reordenan propiedad del activo, rotación y captura de valor, como ocurre con plataformas de inversión y con la servitización vía Atera (Celsia S.A. E.S.P., 2023, 2024). Augier y Teece (2021) resaltan el papel gerencial en la orquestación de recursos, y Helfat y Peteraf (2015) plantean que la calidad de una capacidad se observa cuando es sostenible y escalable. Bajo esa óptica, el caso sugiere que la digitalización, cuando se integra con disciplina operativa y vehículos financieros, puede pasar de iniciativa

tecnológica a capacidad organizacional que sostiene inversión en innovación sin desbordar el gasto.

## Conclusiones

Los resultados permiten sostener que la eficiencia operativa, cuando se traduce en ahorros verificables y persistentes, puede convertirse en un mecanismo de financiamiento interno para la innovación dentro de empresas energéticas que operan bajo marcos regulados y presiones de continuidad del servicio. Este hallazgo desplaza el sentido habitual de la eficiencia, que suele asociarse con ajustes de corto plazo, hacia una función estructural: generar recursos que estabilizan el desempeño económico y mantienen margen de acción para invertir en transformación tecnológica y nuevos negocios.

A partir de la evidencia financiera y operativa revisada, la digitalización aplicada a la operación y a la gestión de activos emerge como condición habilitante de ese mecanismo. La generación de ahorros y la contención del gasto real frente a presiones externas no ocurren por recortes aislados, sino por rediseño de procesos, control remoto, analítica y automatización integrada al núcleo operativo. Por esa vía, la organización logra sostener disciplina de costos sin sacrificar capacidad de adaptación, y abre espacio presupuestal para decisiones de inversión asociadas a la transición.

En paralelo, la tensión entre estandarización para controlar variabilidad y flexibilidad para innovar se gestiona mejor cuando la empresa opera con una arquitectura dual que separa funciones sin romper coherencia estratégica. Un frente estabiliza costos y desempeño mediante disciplina operativa y financiera, mientras otro impulsa expansión en renovables y desarrollo de nuevos negocios. Esta forma de gobernanza evita que la exploración dependa de presupuestos extraordinarios o de ciclos de financiamiento externos, dado que el soporte proviene de mejoras sostenidas en la operación.

El examen de tecnologías habilitadoras también contribuye a precisar la ruta práctica. La automatización robótica de procesos entrega retornos rápidos al reducir tiempos de ejecución y fricciones internas, liberando capacidad para análisis y toma de decisiones con mayor frecuencia y trazabilidad. A su vez, el almacenamiento en baterías se consolida como herramienta técnica para estabilización del sistema mediante servicios complementarios en escenarios de mayor penetración renovable, con una condición: su expansión requiere un entorno regulatorio que remunere de manera consistente dichos servicios.

En términos de modelo de negocio, la servitización mediante un vehículo especializado muestra una vía para acelerar adopción tecnológica en clientes industriales. Al desplazar inversión y riesgo hacia el proveedor y remunerar el servicio con cargo a ahorros generados, se reduce la barrera de entrada asociada al CAPEX del cliente y se crean flujos de ingreso sostenidos por desempeño. En conjunto, estos elementos delinean una estrategia aplicable en mercados emergentes: convertir eficiencias operativas en amortiguador financiero, usar digitalización como infraestructura de decisión y desplegar modelos servitizados y rotación de activos que sostengan inversión continua sin desbordar el gasto operativo.

Los hallazgos delinean una estrategia concreta para mercados emergentes: convertir los ahorros de capital derivados de la eficiencia en un amortiguador financiero real. Al usar la digitalización

como infraestructura de decisión, se facilita el despliegue de modelos servitizados y la rotación de activos, lo que permite sostener la inversión continua en innovación sin desbordar el gasto operativo, tal como se ilustra en la Figura 4.

**Figura 4.** Modelo de ecosistema: La eficiencia como habilitador financiero de la innovación



**Nota.** El diagrama ilustra el flujo de valor circular hallado en la investigación. La entrada de datos operativos habilita la eficiencia, la cual genera ahorros financieros (165.000 M COP). Estos recursos financian la innovación, cerrando el ciclo con la resiliencia organizacional.