

**Escenarios Futuros para el Desarrollo de la Energía fotovoltaica en el Valle del Cauca
hacia el año 2034.**

Sol Johanna Monsalve

Pedro Nel Chávez Andrade

Universidad del Valle.

Facultad de Ciencias de la Administración.

Maestría en Prospectiva e Innovación.

Santiago de Cali.

2025.

**Escenarios Futuros para el Desarrollo de la Energía fotovoltaica en el Valle del Cauca
hacia el año 2034.**

PRESENTADO POR:

Sol Johanna Monsalve.

Pedro Chávez.

Universidad del Valle.

Facultad de Ciencias de la Administración.

Maestría en Prospectiva e Innovación.

Santiago de Cali.

2025

RESUMEN

El presente trabajo de grado explora los escenarios futuros para el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia el año 2034. Se realiza un análisis prospectivo basado en metodologías de construcción de escenarios, considerando variables tecnológicas, económicas, regulatorias y sociales. A través de un enfoque metodológico mixto, se identifican los principales factores que impactan la transición energética en la región y se proponen estrategias para acelerar la adopción de la energía solar fotovoltaica. Se presentan cuatro escenarios futuros: optimista, tendencial, apuesta y pesimista, de los cuales se prioriza el escenario apuesta como la mejor opción para alcanzar una transición energética sostenible. Finalmente, se diseña un plan estratégico basado en la prospectiva estratégica, con el objetivo de fomentar el crecimiento de la energía solar en el Valle del Cauca y su integración en la matriz energética regional.

Palabras Claves: Energía fotovoltaica, transición energética, prospectiva estratégica, construcción de escenarios, energías renovables, sostenibilidad, Valle del Cauca, planificación energética, innovación tecnológica, regulación energética.

ABSTRACT

This thesis explores future scenarios for the development of photovoltaic energy in Valle del Cauca by the year 2034. A prospective analysis is conducted based on scenario-building methodologies, considering technological, economic, regulatory, and social variables. Through a mixed methodological approach, key factors impacting the energy transition in the region are identified, and strategies are proposed to accelerate the adoption of solar photovoltaic energy. Four future scenarios are presented: optimistic, trend-based, target, and pessimistic, with the target scenario being prioritized as the best option to achieve a sustainable energy transition. Finally, a strategic plan is designed based on strategic foresight to foster the growth of solar energy in Valle del Cauca and its integration into the regional energy matrix.

Keywords: Photovoltaic energy, energy transition, strategic foresight, scenario building, renewable energies, sustainability, Valle del Cauca, energy planning, technological innovation, energy regulation.

DEDICATORIA

A mis amados padres, Jhonny de Jesús Monsalve Ceballos y Sol Emirna Ortiz Muñoz, cuyo esfuerzo, dedicación y entrega inquebrantable me han brindado todo el apoyo necesario para alcanzar esta meta. Su amor y sacrificio han sido la luz en mi camino, y este logro también les pertenece.

A mi esposo, Hernando León Silva López, con quien sueño compartir el resto de mis días. Gracias por tu comprensión y amor incondicional, por ser mi refugio y mi fuerza, incluso cuando esta meta requirió sacrificar momentos juntos. Hoy celebro este logro con la certeza de que cada esfuerzo ha valido la pena.

Con todo mi amor y gratitud

Sol Johanna Monsalve Ortiz

Tabla de Contenido.

<i>Introducción.</i>	14
<i>Planteamiento del Problema.</i>	15
Preguntas de Investigación.	16
1. ¿Cuáles son las transformaciones necesarias para el avance de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia 2034?	16
2. ¿Qué variables clave influyen en el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca?	16
3. ¿Cuáles son los escenarios futuros para la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca y cuál es el más adecuado para perseguir como escenario apuesta?	17
4. ¿Cómo puede desarrollarse un plan estratégico que contemple los procesos complejos y las relaciones causales para lograr el escenario apuesta?	17
Problemas Específicos.	17
1. Deficiencias en Infraestructura y Tecnología.	17
2. Barreras Regulatorias y Políticas.	18
3. Falta de Planificación Prospectiva.	18
4. Resistencia y Desconocimiento en la Comunidad.	18
<i>Alcance y Delimitaciones</i>	18
<i>Objetivos.</i>	19
Objetivo general.	19
Objetivos específicos.	20
<i>Justificación.</i>	20
<i>Marco Teórico.</i>	23
Teoría de la Transición Sociotécnica	23
Fundamentos de la Teoría de la Transición Sociotécnica	23
Aplicación de la Teoría de la Transición Sociotécnica en la Energía Solar Fotovoltaica.	24
Teoría de la Prospectiva Estratégica	26
Fundamentos de la Prospectiva Estratégica	26
Aplicación de la Prospectiva Estratégica en la Energía Solar Fotovoltaica	27
Clave de Identificación de Variables	27
Construcción de Escenarios de Futuro	28
Planificación Estratégica y Backcasting	29
Impacto de la Prospectiva Estratégica en la Toma de Decisiones Energéticas	30
Teoría de la Innovación Disruptiva	30
Fundamentos de la Teoría de la Innovación Disruptiva	30
Aplicación de la Innovación Disruptiva en la Energía Solar Fotovoltaica	31
Impacto de la Innovación Disruptiva en la Transición Energética del Valle del Cauca	33
Retos y Desafíos de la Innovación Disruptiva en la Energía Solar	34
Teoría de la Economía Circular	35
Fundamentos de la Teoría de la Economía Circular	35

Aplicación de la Economía Circular en la Energía Solar Fotovoltaica	36
Producción Sostenible de Paneles Solares	36
Gestión de Residuos y Reciclaje de Paneles Solares	37
Almacenamiento y Segunda Vida de Baterías	38
Impacto de la Economía Circular en el Desarrollo de la Energía Solar en el Valle del Cauca	38
Retos y Desafíos para la Implementación de la Economía Circular en la Energía Solar	39
Teoría del Desarrollo Sostenible	40
Fundamentos de la Teoría del Desarrollo Sostenible	40
Relación entre el Desarrollo Sostenible y la Energía Solar Fotovoltaica	41
Aplicación del Desarrollo Sostenible en el Valle del Cauca	42
Impacto ambiental	42
Impacto económico	42
Impacto social	43
Barreras y Desafíos para el Desarrollo Sostenible en la Energía Solar	43
Políticas y Estrategias para Impulsar un Desarrollo Sostenible Basado en Energía Solar	45
<i>Marco Conceptual.</i>	46
Transición Energética	46
Matriz Energética	46
Energía fotovoltaica	47
Prospectiva	48
Diseño de Escenarios	48
Prospectiva Estratégica	49
<i>Marco Contextual.</i>	50
Situación en Colombia.	50
Situación en el Valle del Cauca.	50
<i>Marco Regulatorio Energía Fotovoltaica.</i>	52
<i>CAPÍTULO I.</i>	58
<i>Marco Metodológico</i>	58
Enfoque y Diseño Metodológico Implementado	58
Diseño Descriptivo, Prospectivo y de Caso de Estudio.	59
Fase 1: Diagnóstico	60
Fase 2: Identificación de Variables y Correlaciones	61
Fase 3: Construcción del Futuro Deseable	61
Fase 4: Construcción del plan estratégico con base en el escenario apuesta.	63
<i>CAPÍTULO II.</i>	64
<i>Resultados de la Fase 1: Diagnóstico.</i>	64

Tendencias mundiales.	64
1. Mejoras en la Eficiencia de los Paneles Solares.	64
2. Almacenamiento de energía solar.	66
3. Integración en la arquitectura y aplicaciones móviles.	68
4. Tecnología Grid Forming.	70
5. Paneles solares flotantes.	72
6. Autoconsumo Fotovoltaico y Comunidades Solares.	74
Generalidades del Plan Energético Nacional 2022 – 2052.	76
1. Contexto y Justificación para la Energía Solar Fotovoltaica	76
2. Estrategias y Políticas para la Energía Solar Fotovoltaica	77
3. Desafíos y Oportunidades	78
Desafíos.	78
Oportunidades.	78
4. Impacto Esperado y Contribución a los Objetivos del PEN	79
5. Diagnóstico de los factores abordados por el PEN.	80
5.1. Factores Políticos	80
5.2. Factores Económicos	81
5.3. Factores Sociales	82
5.4. Factores Ambientales	83
5.5. Factores Técnicos	83
6. Interpretación del PEN.	84
<i>CAPÍTULO III.</i>	86
<i>Resultados de la Fase 2: Identificación de Variables y Correlaciones.</i>	86
Árbol de Problemas.	86
Construcción del árbol de problema	86
Relaciones entre causas y efectos	89
Definición de efectos y causas	93
Construcción del sistema de variables.	93
Diagrama de afinidad.	119
Logros con el diagrama de afinidad.	122
Categorización.	122
Definición de las categorías o dimensiones.	123
Matriz de variables concertadas por dimensión.	126
<i>CAPÍTULO IV.</i>	130
<i>Resultados de la Fase 3: Construcción del Futuro Deseable.</i>	130
Matriz de impactos cruzados.	130
Categorización de las Variables.	134
Zona de poder (Cuadrante superior izquierdo).	135
Zona de conflicto (Cuadrante superior derecho).	136
Zona de problemas autónomos (Cuadrante inferior izquierdo).	136
Zona de salida (Cuadrante inferior derecho).	137
Zona de Poder (alta influencia, baja dependencia).	137
Razón para ser trascendentes:	138

Zona de Conflicto (alta influencia, alta dependencia).	138
Razón para ser trascendentes:	138
Diseño de los escenarios de futuro.	139
Fase de preparación	140
Fase de desarrollo de los talleres	140
Sesión 1: Discusión y Priorización de Variables	140
Sesión 2: Proyección de Estados Futuros	142
Sesión 3: Construcción de Narrativas	142
Escenario Sol Resiliente: Un Valle Brillante hacia el 2034.	143
Escenario Luz Incierta: Progresos Graduales bajo el Sol.	144
Escenario Horizonte Solar: Energía para Todos.	145
Escenario Sombras del Sol: Oportunidades Perdidas.	146
Validación y refinamiento: Proceso de selección y priorización de escenarios.	147
Identificación de actores	147
Ambiental.	147
Técnica.	148
Política.	149
Sociocultural.	150
Mercado.	151
Clasificación de actores claves.	152
Fase de conclusión o cierre: Priorización y selección del escenario apuesta.	154
Enfoques de Discusión	155
Método de Votación	156
Resultados Obtenidos	157
CAPÍTULO V.	160
<i>Resultados de la Fase 4: Construcción del plan estratégico con base en el escenario apuesta.</i>	160
Misión	160
Visión	160
Valores.	163
Objetivos Estratégicos.	163
Políticas y Acciones Clave	169
Elementos habilitadores.	171
Indicadores de Progreso.	172
Estimado Presupuestal.	174
Infraestructura y Equipamiento.	174
Capacitación, Innovación y Desarrollo Tecnológico	175
Incentivos, Financiamiento y Apoyos a Comunidades	176
Costos de Operación y Mantenimiento.	176
Costos de Sensibilización y Comunicación.	177
Evaluación y Control	178

<i>Conclusiones.</i>	179
<i>Recomendaciones.</i>	181
<i>Referencias</i>	184

Lista de tablas.

Tabla 1. Marco Regulatorio de la Energía Fotovoltaica en Colombia	52
Tabla 2. Revisión del árbol de problemas e identificación de variables.	90
Tabla 3. Lista de variables identificadas.	95
Tabla 4. Matriz de variables concertadas	127
Tabla 5. Variables desestimadas en el proceso de clasificación de variables	128
Tabla 6. Matriz de impactos cruzados - Mic Mac.....	132
Tabla 7. Actores de la dimensión ambiental	147
Tabla 8. Actores de la dimensión técnica	149
Tabla 9. Actores de la dimensión política.....	150
Tabla 10. Actores de la dimensión sociocultural	150
Tabla 11. Actores de la dimensión de mercado	152
Tabla 12. Clasificación de actores participantes - priorización y selección de escenarios	153
Tabla 13. Aplicación de criterios y evaluación de escenarios.	157
Tabla 14. Políticas y acciones clave	169
Tabla 15. Indicadores de progreso o KPIs.....	172
Tabla 16. Infraestructura y equipamiento estimado	174
Tabla 17. Capacitación, Innovación y Desarrollo Tecnológico.....	175
Tabla 18. Incentivos, Financiamiento y Apoyos a Comunidades	176
Tabla 19. Costos de Operación y Mantenimiento.	176
Tabla 20. Costos de Sensibilización y Comunicación.	177

Lista de ilustraciones.

Ilustración 1. Árbol de problemas	87
Ilustración 2. Diagrama de afinidad	121
Ilustración 3. Logros con el diagrama de afinidad.....	122
Ilustración 4. Categorización de las variables.....	123

Lista de gráficos.

Gráfico 1. Categorización de variables	134
--	-----

Introducción.

La energía fotovoltaica ha experimentado un crecimiento sin precedentes en las últimas dos décadas, logrando consolidarse como una de las fuentes de energía renovable más dinámicas y de mayor adopción a nivel mundial. Desde el año 2000, la capacidad instalada global de energía fotovoltaica ha aumentado de menos de 5 GW a más de 1.200 GW en 2023, un crecimiento impulsado por avances tecnológicos, reducciones significativas en los costos de producción y un entorno político y regulatorio cada vez más favorable (IEA, 2020).

El mercado fotovoltaico ha sido liderado por países como China, Estados Unidos, India y Alemania, que han invertido masivamente en la expansión de su capacidad de generación de energía fotovoltaica. En particular, China ha emergido como el mayor productor e instalador de energía fotovoltaica, representando más del 30% de la capacidad mundial instalada. Esto ha sido posible gracias a políticas gubernamentales de subsidios, créditos fiscales y la creación de un entorno favorable para la inversión privada en energías renovables (IRENA, 2022).

Desde una perspectiva tecnológica, los costos de los módulos solares han disminuido drásticamente debido a la producción en masa, los avances y mejoras tecnológicas, la masiva competencia en el mercado, la economía de escala y, los muchos incentivos públicos; en ese sentido, con una reducción de más del 90% desde 2010, pasando de cerca de \$4 por vatio a menos de \$0.20 por vatio en 2023 (Barreto, 2024). Esta caída en los costos ha permitido que la energía fotovoltaica se convierta en la fuente de

generación de electricidad de menor costo en muchas partes del mundo, superando incluso a los combustibles fósiles (BloombergNEF, 2023).

Además de los avances tecnológicos, la urgencia de mitigar el cambio climático ha sido un motor clave para la adopción de la energía fotovoltaica, en este sentido, los países han encontrado en el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, una batería de herramientas viables en términos de aplicación que podrían coadyuvarles en su urgencia por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e incentivar la participación de las energías renovables en sus matrices energéticas. En ese sentido, la energía fotovoltaica destaca como una solución viable debido a su bajo impacto ambiental, flexibilidad de instalación y su capacidad de generar energía limpia de manera descentralizada (IPCC, 2022).

Planteamiento del Problema.

El Valle del Cauca, a pesar de su significativo potencial para la generación de energía fotovoltaica, enfrenta múltiples desafíos que han limitado el desarrollo de esta fuente de energía renovable. El problema central de esta investigación es el bajo impacto de las iniciativas que permitan un aprovechamiento óptimo del potencial solar de la región, lo que resulta en una deficiente utilización de los recursos disponibles y una inadecuada integración de la energía fotovoltaica en la matriz energética regional.

El Valle del Cauca tiene un recurso solar de alta calidad, con una radiación promedio anual de aproximadamente 5 kWh/m²/día, que supera el promedio global y nacional (IDEAM, 2023). Sin embargo, este potencial no se ha traducido en una adopción significativa de tecnología fotovoltaica. Las barreras incluyen la falta de infraestructura

adecuada, los altos costos iniciales, la ausencia de incentivos fiscales robustos, y una regulación que no siempre favorece la inversión en energías renovables (MINENERGÍA, 2023).

Además, la transición hacia una mayor adopción de energía fotovoltaica requiere superar desafíos relacionados con la integración de energía fotovoltaica en redes eléctricas existentes, la gestión de la intermitencia de la generación solar y la creación de un marco normativo que facilite el desarrollo del sector. La falta de planificación prospectiva y una estrategia adaptada a las condiciones locales han impedido el avance en este campo (IEA, 2020).

Preguntas de Investigación.

1. ¿Cuáles son las transformaciones necesarias para el avance de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia 2034?

Esta pregunta busca identificar los cambios estructurales, tecnológicos, económicos y regulatorios necesarios para facilitar la expansión de la energía fotovoltaica en la región. Incluye la evaluación de transformaciones en la infraestructura, políticas públicas y la capacidad de integración de tecnologías renovables en el sistema energético.

2. ¿Qué variables clave influyen en el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca?

Aquí se pretende analizar y categorizar las variables críticas que afectan el desarrollo de la energía fotovoltaica, como los factores ambientales (recursos y condiciones naturales y ecológicas), los factores económicos (costos de instalación, incentivos fiscales), los factores tecnológicos (avances en tecnología solar, almacenamiento de energía), los

factores técnicos (elementos y condiciones de instalación, operación y mantenimiento eficiente) y socioculturales (aceptación de la comunidad, disponibilidad de mano de obra capacitada).

3. ¿Cuáles son los escenarios futuros para la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca y cuál es el más adecuado para perseguir como escenario apuesta?

Esta pregunta tiene como objetivo construir y evaluar varios escenarios futuros para la adopción de la energía fotovoltaica en la región. Se trata de identificar posibles futuros en función de diferentes variables y condiciones, y seleccionar el escenario más factible y deseable que pueda guiar la planificación estratégica y la toma de decisiones.

4. ¿Cómo puede desarrollarse un plan estratégico que contemple los procesos complejos y las relaciones causales para lograr el escenario apuesta?

Esta pregunta explora el diseño de un plan estratégico que tenga en cuenta los diversos procesos y relaciones causales involucrados en la implementación exitosa de la energía fotovoltaica. Incluye la planificación de estrategias, la definición de indicadores y la creación de mecanismos para la evaluación y adaptación continua del plan.

Problemas Específicos.

1. Deficiencias en Infraestructura y Tecnología.

La infraestructura existente en el Valle del Cauca no está completamente preparada para soportar la expansión de energía fotovoltaica a gran escala. Las deficiencias en la red eléctrica, la falta de centros de almacenamiento de energía y la necesidad de modernización de la infraestructura de transmisión son barreras significativas para la integración efectiva de la energía fotovoltaica (IRENA, 2022).

2. Barreras Regulatorias y Políticas.

La regulación actual en Colombia, aunque ha avanzado con la Ley 1715 de 2014, aún presenta lagunas y desafíos. Las políticas públicas deben ser más específicas y adaptadas a las necesidades de regiones como el Valle del Cauca. La ausencia de una normativa clara sobre la conexión a la red, la administración de excedentes y la integración con otras fuentes de energía es un problema que debe ser resuelto (MINENERGÍA, 2023).

3. Falta de Planificación Prospectiva.

La ausencia de estudios prospectivos específicos para el Valle del Cauca impide una planificación estratégica eficaz para el desarrollo de la energía fotovoltaica. Sin una visión prospectiva clara, es difícil anticipar y manejar los desafíos futuros, y se corre el riesgo de implementar soluciones que no sean las más adecuadas para el contexto local (IEA, 2020).

4. Resistencia y Desconocimiento en la Comunidad.

La falta de conocimiento y la resistencia de la comunidad local hacia la energía fotovoltaica también pueden representar un obstáculo. La educación y la sensibilización sobre los beneficios de la energía fotovoltaica, así como la capacitación en tecnologías asociadas, son cruciales para superar estas barreras (UPME, 2023).

Alcance y Delimitaciones

Alcance Temporal: El estudio abarca un horizonte temporal hasta el año 2034, lo cual permite analizar tendencias a medio plazo y proponer estrategias alineadas con las proyecciones del Plan Energético Nacional 2022-2052.

Alcance Geográfico: La investigación se enfoca en el Valle del Cauca, una región con características únicas en términos de su potencial solar, desarrollo industrial y contexto socioeconómico, que requiere un análisis específico para la implementación de energía fotovoltaica.

Delimitaciones Conceptuales: El estudio se centra en la energía fotovoltaica, excluyendo otras formas de energía renovable. Además, se aborda desde un enfoque prospectivo, lo que implica la exploración de futuros posibles y la identificación de un escenario deseable, sin limitarse a proyecciones lineales basadas en el estado actual.

Limitaciones del Estudio: Entre las limitaciones potenciales se incluyen la disponibilidad y calidad de datos actualizados sobre la capacidad instalada y los costos de implementación, así como la incertidumbre inherente a la construcción de escenarios futuros y la dependencia de la participación de expertos en el proceso.

Objetivos.

Objetivo general.

Diseñar y modelar escenarios futuros disruptivos para el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia el año 2034, integrando tendencias emergentes, incertidumbres críticas y dinámicas territoriales, con el propósito de anticipar desafíos, identificar oportunidades estratégicas y formular rutas innovadoras que aceleren la transición energética regional y redefinan el papel de la energía solar en la matriz energética del futuro alineados con el Plan Energético Nacional 2022 – 2052.

Objetivos específicos.

- Realizar un diagnóstico del estado actual de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca.
- Identificar y analizar las variables clave y sus relaciones que influyen en el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca.
- Identificar los escenarios futuros y definir un escenario apuesta de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca con horizonte al 2034.
- Desarrollar un Plan estratégico que contemple los procesos complejos y las relaciones causales que conduzcan al logro del escenario apuesta.

Justificación.

La necesidad de adaptar y diversificar las fuentes de energía en el Departamento del Valle del Cauca, una región con potencial para la energía fotovoltaica se vuelve cada vez más urgente debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la transición hacia fuentes de energía sostenibles. En respuesta a esta necesidad, este trabajo propone la formulación de un Plan Estratégico Prospectivo para la implementación de energía fotovoltaica en la región, en línea con el Plan Energético Nacional 2022 – 2052.

Al identificar las oportunidades y desafíos específicos asociados con la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca, el análisis propone un plan de acción estratégico orientado a maximizar los beneficios económicos y ambientales de la energía fotovoltaica. De este modo, el trabajo contribuirá a incentivar la inversión en energía fotovoltaica y promoverá un desarrollo energético más equitativo y eficiente, contribuyendo al mejoramiento social y económico de la región.

Desde el ámbito académico, este estudio cobra relevancia al integrar teorías de prospectiva estratégica, proporcionando una sólida base metodológica para el análisis de la energía fotovoltaica. Además, sirve como referencia para investigaciones futuras sobre energías limpias, tanto en el contexto regional como nacional. En el plano empresarial, la energía fotovoltaica representa una oportunidad significativa para el sector energético y tecnológico. La identificación de escenarios futuros y la elaboración de un plan estratégico proporcionan una hoja de ruta clara para que las empresas inviertan y operen de manera eficiente en el mercado fotovoltaico. Asimismo, este enfoque permite anticipar y adaptarse a los cambios del entorno energético, fortaleciendo la competitividad y sostenibilidad del sector a largo plazo.

El impacto social del desarrollo de la energía fotovoltaica es igualmente notable, ya que esta tecnología puede mejorar el acceso a la energía en áreas rurales y periféricas del Valle del Cauca, fomentando un desarrollo más equitativo. Además, la adopción de energías limpias contribuye a reducir la contaminación y a mejorar la calidad del aire, beneficiando la salud pública. Este trabajo plantea estrategias que maximicen estos beneficios sociales y garanticen una transición energética inclusiva. En términos económicos, la integración de energía fotovoltaica puede generar empleo, impulsar el desarrollo de nuevas industrias y diversificar la economía local. La identificación de escenarios futuros permite aprovechar oportunidades de crecimiento económico derivadas de la energía fotovoltaica, como la atracción de inversiones y el estímulo a la innovación tecnológica. La reducción de costos energéticos mediante energía fotovoltaica beneficiará tanto a los consumidores como a las empresas locales, fortaleciendo el desarrollo económico sostenible del departamento.

La aplicabilidad de este estudio radica en su capacidad para proporcionar un marco detallado para la implementación de energía fotovoltaica, considerando variables actuales y tendencias futuras. El diseño de un Plan Estratégico Prospectivo no solo facilitará la adopción de tecnologías solares en la región, sino que también servirá como referencia para la formulación de políticas públicas, estrategias empresariales y programas de desarrollo local. El diseño de escenarios de futuro, además, resulta fundamental para anticipar los cambios y desafíos que podrían surgir hacia el 2034. Este enfoque prospectivo permite una planificación a largo plazo que considera posibles desarrollos y sus implicaciones, optimizando la formulación de políticas y estrategias. La construcción de escenarios futuros ofrece una base para diseñar medidas proactivas que faciliten una transición energética fluida, asegurando que el Valle del Cauca aproveche al máximo los beneficios de la energía fotovoltaica en los próximos años.

Marco Teórico.

Teoría de la Transición Sociotécnica

Fundamentos de la Teoría de la Transición Sociotécnica

La teoría de la transición sociotécnica, desarrollada por Geels (2002) y complementada en estudios posteriores (Geels & Schot, 2007), explica cómo los sistemas tecnológicos evolucionan y se transforman dentro de marcos sociotécnicos más amplios, compuestos por estructuras económicas, normativas, culturales y políticas. Esta teoría plantea que la transición hacia nuevas tecnologías, como la energía solar fotovoltaica, no es un cambio aislado o meramente técnico, sino un proceso sistémico influenciado por múltiples niveles de interacción social y tecnológica.

La base de esta teoría radica en la interacción entre tres niveles fundamentales:

1. **Paisaje Sociotécnico:** Representa los factores estructurales de largo plazo que influyen en el sistema, como cambios climáticos, crisis energéticas, acuerdos internacionales sobre emisiones de carbono y tendencias globales en energías renovables. Estos factores pueden generar presiones externas que incentivan la transición hacia tecnologías más sostenibles, como la solar fotovoltaica.
2. **Regímenes Sociotécnicos:** Son las estructuras dominantes dentro de un sistema tecnológico, que incluyen normativas, instituciones, mercados, hábitos de los consumidores y tecnologías prevalentes. En el caso de Colombia, el régimen sociotécnico actual está fuertemente vinculado a la

energía hidroeléctrica y los combustibles fósiles, lo que crea barreras para la integración de fuentes alternativas.

3. **Nichos Tecnológicos:** Son espacios de innovación en los que tecnologías emergentes, como la energía solar, se desarrollan, prueban y mejoran antes de integrarse al régimen dominante. Estos nichos pueden estar impulsados por subsidios, programas piloto, incentivos gubernamentales y proyectos experimentales.

Esta estructura de múltiples niveles permite analizar cómo las innovaciones en energía solar pueden progresar desde nichos experimentales hasta convertirse en la opción dominante en la matriz energética del Valle del Cauca.

Aplicación de la Teoría de la Transición Sociotécnica en la Energía Solar Fotovoltaica.

En el contexto del Valle del Cauca, la transición hacia la energía solar fotovoltaica debe entenderse como un proceso dinámico en el que interactúan múltiples actores y factores regulatorios, económicos y culturales. Aplicando la teoría de la transición sociotécnica, se pueden identificar tres etapas claves en la evolución del sistema energético regional:

1. **Fase de nicho tecnológico (actualidad - corto plazo, 2024 – 2028):**
 - a. La energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca aún se encuentra en una fase de desarrollo inicial, con proyectos piloto, incentivos gubernamentales y pruebas de integración a pequeña escala.

- b. Existen barreras como el alto costo inicial de instalación, la falta de incentivos suficientes y la ausencia de una infraestructura de almacenamiento energético robusta.
- c. Se han implementado algunos programas de apoyo, como subsidios del Plan Energético Nacional 2025-2055 y estrategias de electrificación rural basadas en energía solar.

2. Fase de expansión e integración al régimen (mediano plazo, 2028 – 2034):

- a. En esta fase, se espera que la energía solar aumente su participación en la matriz energética regional a medida que los costos tecnológicos disminuyan y la infraestructura de transmisión y almacenamiento mejore.
- b. La adopción de regulaciones más favorables, como incentivos fiscales y tarifas diferenciadas, puede acelerar la inversión privada en sistemas fotovoltaicos.
- c. Se requiere un cambio en la percepción social y empresarial para que la energía solar sea vista como una alternativa viable y competitiva frente a las fuentes convencionales.

3. Fase de consolidación y transformación del régimen (largo plazo, 2034 en adelante):

- a. Se proyecta que la energía solar fotovoltaica se convertirá en una de las principales fuentes de generación de electricidad en el Valle del Cauca, integrándose plenamente en el sistema eléctrico y desplazando progresivamente a las fuentes tradicionales.

- b. La expansión de redes inteligentes y sistemas de almacenamiento de energía.

Teoría de la Prospectiva Estratégica

Fundamentos de la Prospectiva Estratégica

La prospectiva estratégica es un enfoque metodológico que permite analizar el futuro de manera estructurada, identificando tendencias, incertidumbres y variables clave para la toma de decisiones en entornos complejos y dinámicos. Este marco teórico se basa en el trabajo de autores como Michel Godet (2006) y Bertrand de Jouvenel (1964), quienes plantean que el futuro no debe entenderse como una proyección lineal del presente, sino como un conjunto de posibilidades que pueden ser moldeadas a través de estrategias adecuadas.

En términos generales, la prospectiva estratégica se fundamenta en los siguientes principios:

1. **Pensamiento sistémico:** Considerando que los problemas complejos, como la transición energética, deben abordarse desde un enfoque holístico que identifique interacciones entre factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos y ambientales.
2. **Análisis de incertidumbre:** Reconoce que el futuro es incierto y, por lo tanto, no puede predecirse con certeza. En su lugar, la prospectiva busca modelar diferentes escenarios posibles para mejorar la planificación estratégica.

3. **Construcción de escenarios:** Proponer la elaboración de múltiples escenarios de futuro basados en el análisis de tendencias y la identificación de variables críticas.
4. **Acción estratégica:** No se limita a la observación del futuro, sino que busca diseñar estrategias que permitan construir escenarios favorables y minimizar riesgos.

Estos principios hacen de la prospectiva estratégica una herramienta clave para la planificación energética, ya que permite anticiparse a cambios en la tecnología, la regulación y la demanda, facilitando la transición hacia un modelo energético más sostenible.

Aplicación de la Prospectiva Estratégica en la Energía Solar Fotovoltaica

En el contexto de la investigación sobre el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca, la prospectiva estratégica se convierte en una metodología esencial para evaluar el impacto de distintas variables sobre la transición energética y diseñar estrategias que faciliten su implementación.

Clave de Identificación de Variables

Uno de los primeros pasos en un estudio prospectivo es la identificación de variables estratégicas que influyen en el sistema. En este caso, variables como el costo de generación fotovoltaica, las políticas de incentivos, la disponibilidad de almacenamiento energético, la infraestructura eléctrica, la inversión en I+D y la aceptación social de la tecnología fueron analizadas para determinar su nivel de influencia y dependencia dentro del sistema energético.

Para este propósito, se utilizaron herramientas como el análisis estructural mediante el método MICMAC, el cual permitió clasificar las variables en cuatro categorías:

1. **Variables motrices o estratégicas:** Tienen alta influencia y baja dependencia (Ejemplo: política energética y avances tecnológicos).
2. **Variables dependientes:** Son afectados por otras variables (Ejemplo: costos de inversión y acceso a financiamiento).
3. **Variables de riesgo o conflicto:** Poseen alta influencia y alta dependencia, por lo que cualquier cambio en ellas puede generar escenarios inciertos (Ejemplo: aceptación social y regulación ambiental).
4. **Variables autónomas:** Tienen poca relación con el sistema y su impacto es menor.

Construcción de Escenarios de Futuro

Tras la identificación de variables clave, se procedió a la construcción de escenarios, utilizando el método morfogénico propuesto por Godet (2006) y el enfoque de escenarios contrastados de Schwartz (1996). Estos escenarios permiten explorar distintos futuros posibles para la energía solar en el Valle del Cauca:

1. **Escenario Óptimo:** Se da una adopción masiva de la energía solar, con apoyo gubernamental sólido, acceso a financiamiento, avances tecnológicos en almacenamiento y una regulación favorable que impulsa la descentralización energética.
2. **Escenario Tendencial:** Se mantiene la tasa de crecimiento actual, con adopción gradual, pero sin cambios disruptivos en el mercado ni en la infraestructura.

3. **Escenario Apuesta:** Se diseñan estrategias específicas para superar barreras tecnológicas, económicas y normativas, promoviendo incentivos para la inversión y la capacitación técnica.
4. **Escenario Pesimista:** Se presentan barreras regulatorias, resistencia del sector energético tradicional y falta de inversión, lo que ralentiza la transición energética.

Este análisis no permite solo describir posibles futuros, sino también definir estrategias para fomentar el escenario más favorable y mitigar riesgos en los escenarios adversos.

Planificación Estratégica y Backcasting

Uno de los enfoques más relevantes de la prospectiva estratégica es el backcasting, que consiste en definir un futuro deseado y trazar el camino necesario para alcanzarlo (Robinson, 1982). Aplicado al desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca, este método permite establecer metas a largo plazo, como:

- Alcanzar una participación del 20% de la energía solar en la matriz energética regional para 2034.
- Implementar incentivos económicos y programas de financiamiento verde.
- Desarrollar infraestructura para almacenamiento energético y distribución descentralizada.
- Fomentar la investigación en eficiencia fotovoltaica y economía circular.

Mediante el backcasting, se identifican acciones concretas que deben implementarse en el corto y mediano plazo para que estos objetivos sean alcanzables.

Impacto de la Prospectiva Estratégica en la Toma de Decisiones Energéticas

La prospectiva estratégica permite a los tomadores de decisiones diseñar políticas públicas y estrategias empresariales más efectivas para la transición energética. En el contexto del Valle del Cauca, su aplicación tiene los siguientes beneficios:

1. **Reducción de la incertidumbre:** Permite a los actores del sector energético anticiparse a cambios tecnológicos, regulatorios y económicos.
2. **Optimización de inversiones:** Ayuda a focalizar recursos en áreas estratégicas, como infraestructura y almacenamiento energético.
3. **Mitigación de riesgos:** Facilita la identificación de barreras y la formulación de estrategias para superarlas.
4. **Fortalecimiento de la sostenibilidad:** Contribuye a alinear la transición energética con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), garantizando que la implementación de la energía solar sea equitativa y ambientalmente responsable.

Teoría de la Innovación Disruptiva

Fundamentos de la Teoría de la Innovación Disruptiva

La teoría de la innovación disruptiva, propuesta por Clayton Christensen (1997) en su libro *The Innovator's Dilemma*, plantea que ciertos avances tecnológicos pueden cambiar radicalmente industrias establecidas al introducir productos o servicios más accesibles, económicos o eficientes, desplazando progresivamente a las soluciones tradicionales.

Según Christensen, las innovaciones disruptivas comienzan en segmentos del mercado desatendidos o marginados, donde los consumidores no pueden acceder a la

tecnología dominante debido a su alto costo o barreras de adopción. Con el tiempo, estas innovaciones evolucionan, mejoran su desempeño y terminan transformando el mercado principal, desplazando las soluciones tradicionales.

Los principales elementos de esta teoría incluyen:

1. **Mercado Inicial Marginal:** La innovación comienza en un segmento de mercado con baja competencia y con usuarios desatendidos.
2. **Accesibilidad y Costo Reducido:** La nueva tecnología suele ser más asequible y flexible que las alternativas existentes.
3. **Mejoras Continuas:** Con el tiempo, la innovación evoluciona hasta ofrecer un rendimiento comparable o superior a las tecnologías dominantes.
4. **Transformación del Mercado:** La nueva solución supera a las tecnologías tradicionales, reconfigurando la industria.

Este enfoque es altamente relevante en el sector energético, donde tecnologías renovables como la energía solar fotovoltaica han seguido este patrón de disrupción frente a los sistemas energéticos convencionales basados en combustibles fósiles e hidroeléctricos.

Aplicación de la Innovación Disruptiva en la Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica representa una innovación disruptiva en el sector energético global y específicamente en el contexto colombiano y del Valle del Cauca.

Tradicionalmente, la matriz energética ha estado dominada por la generación hidroeléctrica y térmica, con una infraestructura centralizada que limita la participación de nuevos actores. Sin embargo, la evolución de la energía solar sigue el patrón de disrupción definido por Christensen:

1. Fase Inicial - Segmento Marginal (2000-2015)

- a. La energía solar era costosa y poco accesible, reservada para nichos como comunidades remotas sin acceso a la red eléctrica o proyectos experimentales de investigación.
- b. Existían barreras tecnológicas como la baja eficiencia de los paneles y la falta de almacenamiento energético asequible.
- c. La infraestructura de transmisión y regulación no estaba preparada para la integración de fuentes intermitentes.

2. Fase de Crecimiento - Accesibilidad y Reducción de Costos (2015-2025)

- a. El costo de los paneles solares ha disminuido en más del 80% en la última década, lo que ha facilitado su adopción.
- b. La mejora en la eficiencia fotovoltaica ha permitido una mayor producción energética en menor espacio.
- c. Se han implementado incentivos y regulaciones para fomentar la instalación de sistemas solares descentralizados.

3. Fase de Disrupción - Transformación del Mercado Energético (2025 en adelante)

- a. Se espera que la generación distribuida aumente significativamente, permitiendo a hogares, empresas e industrias generar su propia electricidad y reducir su dependencia de la red.
- b. La integración de baterías y sistemas de almacenamiento facilitará la estabilidad de la energía solar, resolviendo el problema de intermitencia.

- c. Se proyecta que la energía solar se convertirá en una de las principales fuentes de generación en Colombia, desplazando gradualmente a la hidroeléctrica y la térmica.

Impacto de la Innovación Disruptiva en la Transición Energética del Valle del Cauca

En el contexto del Valle del Cauca, la adopción de la energía solar fotovoltaica como una innovación disruptiva tiene múltiples implicaciones estratégicas:

1. Descentralización del Mercado Energético

- a. Actualmente, la generación eléctrica en Colombia está altamente centralizada en grandes plantas hidroeléctricas. La energía solar permite la generación distribuida, donde múltiples usuarios pueden producir electricidad de manera independiente.
- b. Esto reduce la vulnerabilidad ante fenómenos climáticos como El Niño, que afectan la generación hidroeléctrica.

2. Accesibilidad Energética y Justicia Social

- a. En comunidades rurales y zonas con infraestructura limitada, la energía solar ofrece una solución accesible y asequible para el acceso a electricidad.
- b. La descentralización de la energía permite que sectores de bajos ingresos adopten tecnologías renovables sin depender de monopolios energéticos.

3. Transformación del Modelo de Negocio del Sector Eléctrico

- a. Las empresas eléctricas tradicionales deberán adaptarse a un modelo en el que los consumidores pueden convertirse en prosumidores (productores y consumidores de energía).
- b. Se prevé un aumento de empresas que ofrecerán servicios de instalación, mantenimiento y financiamiento de sistemas solares.

4. Innovación en Almacenamiento y Redes Inteligentes

- a. El desarrollo de tecnologías de almacenamiento (baterías de litio, hidrógeno, etc.) permitirá un uso más eficiente de la energía solar, evitando pérdidas y asegurando suministro continuo.
- b. Las redes eléctricas inteligentes facilitarán la integración de múltiples fuentes renovables y mejorarán la gestión del consumo energético.

Retos y Desafíos de la Innovación Disruptiva en la Energía Solar

Si bien la energía solar sigue una trayectoria disruptiva, su consolidación en el Valle del Cauca enfrenta ciertos desafíos que deben ser abordados estratégicamente:

1. Regulación y Marco Normativo.

- a. Es necesario actualizar la legislación para facilitar la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red y establecer incentivos más atractivos para la inversión en energía solar.

2. Inversión en Infraestructura y Tecnología

- a. La expansión de redes de transmisión debe adaptarse a la nueva dinámica de generación distribuida.

- b. Se requiere mayor inversión en I+D para mejorar la eficiencia de los paneles y reducir los costos de almacenamiento.

3. Cambio Cultural y Aceptación Social

- a. La transición energética implica un cambio en la mentalidad de los consumidores y empresas, que tradicionalmente han dependido de fuentes convencionales.
- b. Las campañas de sensibilización y educación sobre los beneficios de la energía solar son clave para facilitar su adopción.

Teoría de la Economía Circular

Fundamentos de la Teoría de la Economía Circular

La economía circular es un modelo teórico y práctico que busca reemplazar el enfoque tradicional de producción y consumo lineal basado en “extraer, producir, usar y desechar” por un sistema más sostenible en el que los recursos se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, minimizando residuos y promoviendo la regeneración de materiales.

Este concepto fue desarrollado en la década de 1970 y consolidado por la Ellen MacArthur Foundation (2013), que define la economía circular como “un sistema de producción y consumo diseñado para restaurar y regenerar, en el que los productos, componentes y materiales se mantienen en su nivel más alto de utilidad en todo momento”.

Los principios fundamentales de la economía circular incluyen:

1. **Preservar y mejorar el capital natural:** Mantener los recursos en su máximo valor mediante estrategias de conservación, reciclaje y reutilización.

2. **Optimizar el uso de recursos:** Maximizar la eficiencia del ciclo de vida de los materiales, asegurando que los productos sean diseñados para su reutilización y que los residuos sean reintroducidos en el sistema como insumos.
3. **Fomentar la regeneración de ecosistemas:** Garantizar que los procesos industriales y de producción sean ambientalmente responsables y contribuyan a la sostenibilidad a largo plazo.

A diferencia del modelo económico tradicional, basado en la obsolescencia programada y el desperdicio de recursos, la economía circular promueve ciclos cerrados de producción y consumo, impulsando la innovación en el diseño de productos y en la gestión de residuos industriales.

Aplicación de la Economía Circular en la Energía Solar Fotovoltaica

La teoría de la economía circular es altamente relevante en el sector energético y, en particular, en la energía solar fotovoltaica, ya que permite abordar desafíos relacionados con el uso de materiales críticos, la gestión de residuos y la eficiencia de los sistemas de producción.

Producción Sostenible de Paneles Solares

Los paneles solares están compuestos principalmente por silicio, vidrio, metales como aluminio y cobre, y componentes plásticos. Actualmente, su producción depende de procesos extractivos intensivos en energía y recursos naturales. Sin embargo, la economía circular plantea estrategias para reducir el impacto ambiental de esta industria:

- **Ecodiseño:** Incorporación de materiales reciclables y procesos de fabricación de bajo impacto ambiental.
- **Sustitución de materiales críticos:** Desarrollo de nuevas tecnologías que reduzcan la dependencia de materiales escasos, como el indio y el telurio, sustituyéndolos por alternativas más accesibles.
- **Uso de energía renovable en la producción:** Aplicación de sistemas solares en las mismas fábricas que producen paneles fotovoltaicos para reducir la huella de carbono.

Gestión de Residuos y Reciclaje de Paneles Solares

Uno de los mayores desafíos de la expansión de la energía solar es la gestión de los residuos generados al final del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos. Se estima que un panel solar tiene una vida útil de aproximadamente 25 a 30 años, lo que implica que para 2050, millones de toneladas de residuos solares necesitarán ser reciclados.

Bajo el enfoque de economía circular, se han desarrollado estrategias como:

- **Reciclaje de módulos fotovoltaicos:** Recuperación de vidrio, aluminio y silicio para su reutilización en nuevos paneles o en otras industrias.
- **Reacondicionamiento de paneles solares:** Reparación y reutilización de módulos con defectos menores para extender su vida útil en mercados secundarios, como zonas rurales o países en desarrollo.
- **Desarrollo de tecnologías de segunda vida:** Implementación de baterías recicladas y materiales avanzados que permiten reutilizar componentes críticos en nuevas aplicaciones.

Almacenamiento y Segunda Vida de Baterías

El almacenamiento de energía es clave para la estabilidad de los sistemas solares fotovoltaicos, y actualmente, las baterías de litio son la opción predominante. Sin embargo, estas baterías presentan desafíos ambientales debido a la extracción de litio, cobalto y níquel. La economía circular plantea soluciones como:

- **Reciclaje de baterías de litio:** Extracción de metales críticos para la fabricación de nuevas celdas de almacenamiento.
- **Reutilización en aplicaciones de menor demanda:** Las baterías usadas de sistemas solares pueden tener una segunda vida en dispositivos de menor capacidad, como alumbrado público o almacenamiento en hogares.
- **Investigación en materiales alternativos:** Desarrollo de tecnologías basadas en sodio, grafeno y otras alternativas más sostenibles.

Impacto de la Economía Circular en el Desarrollo de la Energía Solar en el Valle del Cauca

La implementación de estrategias de economía circular en la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca generaría múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales:

1. Reducción de la Huella Ambiental

- a. Disminución del impacto de la extracción de materiales al fomentar el reciclaje de componentes.
- b. Menor cantidad de residuos electrónicos acumulados en vertederos.

- c. Uso de energía limpia en la producción y mantenimiento de paneles solares.

2. Crecimiento de la Industria del Reciclaje y Nuevas Oportunidades Económicas

- a. Creación de empleos en la gestión de residuos fotovoltaicos.
- b. Desarrollo de empresas especializadas en reacondicionamiento y reciclaje de paneles.
- c. Exportación de materiales reciclados y componentes reacondicionados a otros mercados.

3. Optimización del Uso de Recursos y Costos de Producción

- a. Disminución en la dependencia de importaciones de materiales críticos.
- b. Reducción de costos a largo plazo al reutilizar componentes y materiales.
- c. Mayor resiliencia del sector energético ante fluctuaciones en precios de materias primas.

Retos y Desafíos para la Implementación de la Economía Circular en la Energía Solar

Si bien la economía circular ofrece un modelo viable para la sostenibilidad del sector fotovoltaico, existen barreras que deben ser abordadas para su implementación efectiva:

1. **Ausencia de Regulaciones Específicas sobre Reciclaje de Paneles Solares en Colombia:** Es necesario establecer normativamente que regule el

reciclaje y disposición final de paneles solares, siguiendo modelos como los de la Unión Europea.

2. **Falta de Infraestructura para la Recuperación de Materiales:** Se requieren inversiones en plantas de reciclaje especializadas en módulos fotovoltaicos y baterías de almacenamiento.
3. **Costos asociados al reciclaje:** Actualmente, el reciclaje de paneles solares sigue siendo más costoso que su producción con materiales vírgenes, lo que limita su adopción.
4. **Concienciación y Educación sobre la Circularidad en el Sector Energético:** Es fundamental promover la formación de profesionales especializados en economía circular aplicada a energías renovables.

Teoría del Desarrollo Sostenible

Fundamentos de la Teoría del Desarrollo Sostenible

La teoría del desarrollo sostenible se basa en la premisa de que el crecimiento económico debe equilibrarse con la conservación ambiental y la equidad social para garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Este concepto fue introducido en el Informe Brundtland (1987), titulado *Nuestro Futuro Común*, donde se define el desarrollo sostenible como “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987).

El desarrollo sostenible se fundamenta en tres pilares interdependientes:

1. **Dimensión Ambiental:** Uso responsable de los recursos naturales, reducción de la contaminación y mitigación del cambio climático.
2. **Dimensión Económica:** Crecimiento económico sostenido basado en modelos de producción y consumo responsables.
3. **Dimensión Social:** Inclusión, equidad y justicia social, asegurando acceso a oportunidades y servicios esenciales como la educación, la salud y la energía.

En el contexto energético, el desarrollo sostenible implica la adopción de energías renovables como la solar fotovoltaica, que reduce la dependencia de combustibles fósiles, disminuye la huella de carbono y promueve la equidad en el acceso a la energía.

Relación entre el Desarrollo Sostenible y la Energía Solar Fotovoltaica

El desarrollo sostenible y la energía solar fotovoltaica están estrechamente vinculados, ya que esta tecnología permite generar electricidad de forma limpia, descentralizada y con bajo impacto ambiental. La implementación de sistemas fotovoltaicos en el Valle del Cauca responde directamente a varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2019), entre los cuales destacan:

1. **ODS 7 - Energía asequible y no contaminante:** La energía solar reduce la dependencia de fuentes fósiles y garantiza el acceso a electricidad en comunidades aisladas.
2. **ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:** Promueve modelos energéticos descentralizados y eficientes en zonas urbanas y rurales.

3. **ODS 13 - Acción por el clima:** Disminuye la emisión de gases de efecto invernadero y contribuye a la transición energética global.

Aplicación del Desarrollo Sostenible en el Valle del Cauca

El desarrollo sostenible aplicado a la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca implica la implementación de estrategias integrales que abordan la producción energética, la gestión de residuos y la equidad en el acceso a la electricidad.

Impacto ambiental

- **Reducción de emisiones de CO₂:** La energía solar evita la quema de combustibles fósiles, disminuyendo la contaminación atmosférica.
- **Disminución del impacto sobre ecosistemas:** A diferencia de grandes proyectos hidroeléctricos, los sistemas fotovoltaicos pueden instalarse en techos, terrenos degradados o infraestructuras urbanas sin alterar el equilibrio ecológico.
- **Gestión de residuos solares:** La implementación de una economía circular en el sector fotovoltaico permite el reciclaje de paneles y baterías al final de su vida útil.

Impacto económico

- **Generación de empleo verde:** La instalación, operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos impulsan la creación de empleos en el sector energético sostenible.

- **Diversificación de la matriz energética:** La incorporación de energía solar reduce la dependencia del país de fuentes hidroeléctricas y térmicas, fortaleciendo la seguridad energética.
- **Reducción de costos de electricidad:** La autogeneración de energía fotovoltaica permite a hogares y empresas reducir sus facturas de electricidad y aumentar su independencia energética.

Impacto social

- **Electrificación de comunidades rurales:** La energía solar facilita el acceso a electricidad en zonas apartadas donde la extensión de la red eléctrica es costosa o inviable.
- **Reducción de la pobreza energética:** Al proporcionar una fuente de energía accesible y estable, se mejora la calidad de vida y se fomenta el desarrollo productivo en comunidades marginadas.
- **Empoderamiento de comunidades locales:** La descentralización de la energía permite que las comunidades gestionen su propia producción energética, promoviendo la autonomía y la resiliencia social.

Barreras y Desafíos para el Desarrollo Sostenible en la Energía Solar

Si bien la energía solar fotovoltaica es una solución clave para el desarrollo sostenible, su implementación enfrenta desafíos que deben ser abordados para maximizar su impacto positivo:

1. Barreras Económicas

- Costos iniciales elevados para la instalación de sistemas fotovoltaicos.
- Dificultad de acceso a financiamiento para proyectos solares en comunidades rurales.

2. Barreras Técnicas

- Necesidad de mejorar la capacidad de almacenamiento energético para compensar la intermitencia de la generación solar.
- Falta de infraestructura adecuada para la integración de energías renovables en la red eléctrica.

3. Barreras Regulatorias y Políticas

- Necesidad de incentivos fiscales más sólidos y políticas claras de apoyo a la energía solar.
- Falta de normativas para la gestión de residuos de paneles solares y baterías.

4. Barreras Sociales y Culturales

- Resistencia al cambio por parte de sectores industriales y comunidades acostumbradas a modelos energéticos tradicionales.
- Falta de conocimiento sobre los beneficios y el funcionamiento de la energía solar.

Para superar estos desafíos, es crucial que las políticas públicas y los actores del sector energético trabajen en conjunto para desarrollar marcos normativos adecuados, promover la educación energética y facilitar el acceso a financiamiento sostenible.

Políticas y Estrategias para Impulsar un Desarrollo Sostenible Basado en Energía Solar

Para consolidar la energía solar como un pilar del desarrollo sostenible en el Valle del Cauca, se recomienda la implementación de las siguientes estrategias:

1. **Creación de incentivos económicos y fiscales:** Reducción de impuestos y subsidios para la instalación de sistemas solares en hogares y empresas.
2. **Fortalecimiento de la infraestructura eléctrica:** Modernización de la red para facilitar la integración de energías renovables.
3. **Educación y sensibilización comunitaria:** Programas de formación sobre energía solar y desarrollo sostenible en escuelas y comunidades.
4. **Desarrollo de políticas de reciclaje y economía circular:** Regulaciones para la gestión de residuos solares y fomento del uso de materiales reciclables en la fabricación de paneles.
5. **Fomento de la investigación e innovación:** Apoyo a universidades y centros de investigación para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las tecnologías solares.

Marco Conceptual.

Transición Energética

La transición energética se refiere al proceso de transformación de los sistemas energéticos tradicionales, dependientes principalmente de combustibles fósiles, hacia un modelo basado en fuentes de energía renovables, más limpias y sostenibles. Esta transición responde a la creciente demanda de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), disminuir la dependencia de fuentes no renovables y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos energéticos. El concepto de transición energética abarca no solo el cambio tecnológico, sino también la adaptación de marcos regulatorios, económicos y sociales para facilitar este cambio estructural (Miller, Iles, & Jones, 2013).

En términos de transición energética, esta encuentra sus bases más significativas en acuerdos y compromisos globales tales como: el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los mismos se han establecido en pro de impulsar e incentivar la transición energética, además, la mayoría de las naciones, entre ellas Alemania, Dinamarca, China, India, Suecia; han venido aplicando estos acuerdos y compromisos como apuestas nacionales propias. En Colombia, el proceso está alineado con los esfuerzos por diversificar la matriz energética nacional e incrementar la participación de energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica (MINENERGÍA, 2023).

Matriz Energética

La matriz energética se refiere a la combinación de fuentes de energía que un país o región utiliza para satisfacer su demanda de energía. Estas fuentes incluyen energías no renovables (petróleo, gas natural, carbón) y renovables (energía fotovoltaica, eólica,

hidroeléctrica, geotérmica, entre otras). La transición hacia una matriz energética más limpia es fundamental para mitigar los impactos ambientales y avanzar hacia la sostenibilidad energética.

En Colombia, la matriz energética ha estado históricamente dominada por fuentes hidroeléctricas (considerada dentro de las energías renovables), aunque, en la actualidad existe una creciente participación del gas natural y el carbón. Sin embargo, en los últimos años se ha promovido la inclusión de energías renovables no convencionales, como la energía fotovoltaica, para aumentar la diversificación y resiliencia del sistema energético (UPME, 2023). En el Valle del Cauca, una de las regiones con mayor radiación solar del país, la energía fotovoltaica se ha presentado como una opción clave para reducir la dependencia de fuentes no renovables y diversificar la oferta energética (Cardona, Tamayo, & Eslava-Garzón, 2024).

Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica es una forma de energía renovable que convierte la radiación solar en electricidad a través de celdas o paneles solares. Este tipo de energía ha ganado relevancia en las últimas décadas debido a la disminución de los costos de los paneles solares y a los avances tecnológicos que mejoran su eficiencia. Además, la energía fotovoltaica es una solución atractiva por su capacidad de instalación tanto en grandes plantas solares como en sistemas distribuidos para uso residencial y comercial (IRENA, 2022).

Prospectiva

La prospectiva es una disciplina que busca explorar, analizar y anticipar futuros posibles a través de la identificación de tendencias, oportunidades y desafíos. Esta disciplina se centra en la comprensión de la realidad a través del estudio del pasado y el presente y, además, combina análisis estructurado de variables clave con la construcción de escenarios alternativos para ofrecer una visión estratégica de largo plazo que oriente la toma de decisiones en el presente (Godet & Durance, 2011).

El objetivo central de la prospectiva es ayudar a organizaciones, gobiernos y sociedades a diseñar estrategias que les permitan prepararse para diversos futuros posibles y gestionar la incertidumbre inherente al entorno cambiante. En el caso del sector energético, la prospectiva permite evaluar el impacto de factores como los avances tecnológicos, las políticas gubernamentales y los cambios en el comportamiento del mercado (Chermack, 2011).

Diseño de Escenarios

De acuerdo con Bradfield et. al. (2005), el diseño de escenarios es una técnica clave dentro de la prospectiva que permite la construcción de futuros alternativos basados en el análisis de variables clave y sus interrelaciones. Este proceso implica la identificación de tendencias, incertidumbres y fuerzas motrices que configuran el entorno, con el fin de elaborar narrativas coherentes y plausibles sobre posibles futuros.

En el contexto energético, el diseño de escenarios ayuda a proyectar las implicaciones de diferentes políticas, tecnologías y cambios en el mercado. Por ejemplo, en este estudio se desarrollaron escenarios futuros para el desarrollo de la energía fotovoltaica

en el Valle del Cauca, evaluando cómo diferentes niveles de inversión y apoyo gubernamental podrían afectar la adopción de esta tecnología (Schoemaker, 1995).

De acuerdo con Godet & Durance (2011), los escenarios elaborados no deben interpretarse como predicciones específicas del futuro, sino como herramientas estratégicas utilizadas para analizar los posibles caminos que un sistema, podría tomar bajo diferentes condiciones. Su propósito principal es proporcionar un marco para evaluar cómo podrían evolucionar las variables clave (como la tecnología, las políticas y la demanda energética) en función de distintas circunstancias o decisiones.

Prospectiva Estratégica

La prospectiva estratégica se refiere a la aplicación de los principios de la prospectiva en el diseño de estrategias a largo plazo, con el objetivo de guiar la toma de decisiones en contextos de incertidumbre. Este enfoque es fundamental en el desarrollo de planes estratégicos que buscan no solo adaptarse al futuro, sino también influir activamente en él mediante la implementación de acciones concretas (Godet & Durance, 2011).

En el ámbito de la energía fotovoltaica, la prospectiva estratégica se utiliza para identificar las acciones necesarias para alcanzar los escenarios deseados. Este estudio desarrolló un plan estratégico para la implementación de energía fotovoltaica en el Valle del Cauca, que incluyó recomendaciones sobre políticas, incentivos, capacitación técnica y alianzas público-privadas que podrían acelerar el crecimiento del sector.

Marco Contextual.

Situación en Colombia.

En Colombia, la transición energética ha comenzado a tomar forma en los últimos años, actualmente el país cuenta con 17 parques fotovoltaicos que se encuentran en operación, 11 que están por entrar en su fase de operación, 9 proyectos de autogeneración a gran escala y más de 1.500 proyectos solares de autogeneración a pequeña escala que generan una capacidad neta de 388 MW, sin embargo, la participación de la energía fotovoltaica en la matriz energética nacional sigue siendo limitada (SOLMIC, 2024). En 2022, las energías renovables no convencionales (incluyendo la solar) representaron menos del 2% de la capacidad total instalada, siendo la hidroeléctrica la fuente predominante con más del 60% del total (UPME, 2023). No obstante, el país tiene un enorme potencial solar, con una radiación promedio de 4.5 kWh/m²/día, que es superior a la de muchos países líderes en energía fotovoltaica, como Alemania y Japón.

Situación en el Valle del Cauca.

El Valle del Cauca es una región con características climáticas y geográficas particularmente favorables para la generación de energía fotovoltaica. La región recibe más de 2.000 horas de sol al año, y su radiación solar promedio es de alrededor de 5 kWh/m²/día, lo que la posiciona como una de las áreas más prometedoras para el desarrollo de proyectos solares en Colombia (IDEAM, 2023). Como respuesta a la necesidad de aprovechamiento de este potencial solar, el departamento ha venido inaugurando varios parques fotovoltaicos como parte de los esfuerzos para incrementar la generación de energía renovable en la región, entre los principales proyectos están:

1. **Granja Solar Palmaseca (Palmira):** Con una capacidad instalada de 30 MW y 78,000 paneles solares, este proyecto abastece a más de 30,000 hogares y evita la emisión de aproximadamente 19,000 toneladas de CO₂ al año.
2. **Celsia Solar La Victoria 1 y 2 (La Victoria):** Estas dos granjas tienen una capacidad conjunta de 39.8 MW y generan 98 GWh anuales. Utilizan tecnología de seguimiento solar para optimizar la captación de radiación.
3. **Celsia Solar Palmira 3 (Palmira):** Con una capacidad de 9.9 MW, suministra energía a industrias locales y contribuye a la sostenibilidad energética.
4. **Celsia Solar Buga 1 (Buga):** Este parque genera 9.9 MW, abasteciendo a clientes industriales y promoviendo el uso de energía limpia en el sector empresarial

No obstante, más allá del potencial solar y los muchos proyectos fotovoltaicos desarrollados en el departamento, los avances de la energía fotovoltaica han sido lentos debido a barreras tecnológicas, falta de incentivos fiscales y programas de financiación e inversión además de múltiples desafíos existentes en términos de integración de nuevas tecnologías al sistema energético nacional.

En términos de política energética, en Colombia la Ley 1715 de 2014 ha sido un paso significativo al momento de hablar sobre la promoción y crecimiento de energías renovables debido a que, más allá de facilitar la adopción de tecnologías fotovoltaicas, también ha impulsado el establecimiento de incentivos fiscales para proyectos de energías renovables que fomenten la diversificación de la matriz energética. Más recientemente, el

gobierno colombiano ha lanzado la hoja de ruta de hidrógeno y energía fotovoltaica, como parte de su estrategia para alcanzar la carbono-neutralidad para 2050. Sin embargo, la implementación en regiones específicas como el Valle del Cauca requiere de una planificación más detallada y adaptada a sus características económicas y sociales (MINENERGÍA, 2023).

Marco Regulatorio Energía Fotovoltaica.

Tabla 1. Marco Regulatorio de la Energía Fotovoltaica en Colombia

Norma	Descripción	Relevancia para la Energía Fotovoltaica
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y establece la base para la protección del medio ambiente en Colombia. Introducir el principio de desarrollo sostenible y el uso racional de los recursos naturales.	Aunque no está enfocada específicamente en energías renovables, establece las bases ambientales para la planificación de proyectos fotovoltaicos, incluyendo la necesidad de licencias ambientales y la evaluación de impactos ecológicos en la instalación de sistemas solares.
Ley 29 de 1999	Promueve el desarrollo científico y tecnológico en	Fomenta la inversión en investigación y desarrollo

	el país, estableciendo mecanismos de financiación y apoyo a la investigación en sectores estratégicos.	(I+D) en el sector de energías renovables, incentivando innovaciones en tecnología fotovoltaica y almacenamiento energético. Facilita el acceso a fondos públicos para proyectos de innovación en energía solar.
Ley 143 de 1994	Regula el sector eléctrico, estableciendo las bases para la generación, transmisión, distribución colombiana y comercialización de energía en el país. Introduzca la planeación a largo plazo del sistema energético.	Abra la puerta a la diversificación de la matriz energética y establezca la viabilidad de fuentes alternativas. Defina el marco regulatorio para la autogeneración de energía y la conexión de plantas solares a la red eléctrica.
Ley 1715 de 2014	Marco legal para la promoción de energías renovables en Colombia. Introducir incentivos fiscales, deducciones en impuestos y la posibilidad	Es la norma más relevante para la energía fotovoltaica, ya que establece beneficios como exenciones arancelarias para la importación de equipos

	de vender excedentes energéticos a la red.	solares, deducciones en el impuesto de renta y reducciones en el IVA para proyectos de energía renovable.
Resolución 0549 de 2015	Definir los procedimientos y condiciones para la conexión de sistemas de autogeneración a la red eléctrica nacional.	Facilitar la integración de sistemas solares residenciales e industriales en la red, permitiendo a los usuarios vender excedentes de energía a las empresas comercializadoras.

Elaboración propia de los autores, 2024

Análisis del Marco Regulatorio y su Impacto en la Energía Fotovoltaica en el Valle del Cauca

El marco regulatorio colombiano ha evolucionado de manera significativa en las últimas décadas, sentando las bases para la consolidación de la energía solar fotovoltaica como una alternativa viable y sostenible en la matriz energética del país. En el caso específico del Valle del Cauca, la aplicación de estas normativas ha generado un entorno favorable para la inversión en energías renovables, la modernización del sector eléctrico y la diversificación de la oferta energética. No obstante, aún persisten desafíos en términos de implementación efectiva, acceso a incentivos y optimización de la infraestructura para garantizar una transición energética eficiente.

Uno de los aspectos más relevantes dentro del marco regulatorio es la existencia de incentivos tributarios y facilidades para la inversión en energías renovables, principalmente a través de la Ley 1715 de 2014 y su actualización la Ley 2099 de 2021. Estas normativas han permitido que empresas y consumidores interesados en la adopción de tecnologías solares puedan beneficiarse de exenciones fiscales, deducciones en el impuesto de renta y reducción del IVA en la adquisición de equipos fotovoltaicos. En el Valle del Cauca, estos incentivos han impulsado un crecimiento progresivo en la instalación de sistemas solares en los sectores industrial, comercial y residencial, facilitando la democratización del acceso a la energía limpia y descentralizada. Sin embargo, persisten barreras burocráticas que ralentizan el acceso a estos beneficios, especialmente para pequeños productores y comunidades rurales que requieren financiamiento accesible y simplificación en los trámites administrativos.

Otro aspecto fundamental dentro del marco regulatorio es la integración de la energía solar fotovoltaica a la red eléctrica, regulada por la Resolución 0549 de 2015, que define los procedimientos para la conexión de sistemas de autogeneración. En el contexto del Valle del Cauca, esta normativa ha permitido que usuarios con instalaciones fotovoltaicas vendan sus excedentes de energía a la red, promoviendo un modelo de generación distribuida que reduce la dependencia de fuentes fósiles y optimiza la estabilidad del sistema eléctrico. No obstante, la falta de infraestructura adecuada y la necesidad de una modernización en las redes de distribución han generado obstáculos para la expansión de este modelo, dificultando la integración masiva de la energía solar en la región.

El marco regulatorio también ha fomentado el desarrollo tecnológico y la financiación de proyectos solares, principalmente a través de la Ley 29 de 1999, que promueve la inversión en investigación e innovación en sectores estratégicos. Gracias a esta normativa, universidades e instituciones científicas del Valle del Cauca han podido acceder a recursos para el desarrollo de nuevas tecnologías solares, almacenamiento energético y optimización de la eficiencia fotovoltaica. Sin embargo, los recursos destinados a este tipo de proyectos aún son limitados, y es necesario fortalecer los mecanismos de financiamiento para garantizar que la investigación se traduzca en soluciones aplicadas y en la consolidación de un ecosistema de innovación que impulse la competitividad del sector renovable en la región.

Desde la perspectiva ambiental, la Ley 99 de 1993 establece regulaciones que garantizan la sostenibilidad de los proyectos solares, asegurando que su desarrollo minimice impactos ecológicos y promueva la conservación de los recursos naturales. En el Valle del Cauca, esta normativa ha sido clave para la implementación de estudios de impacto ambiental en grandes parques solares y proyectos de generación distribuida, asegurando que su instalación no comprometa la biodiversidad ni afecte ecosistemas estratégicos. Sin embargo, es fundamental que estas regulaciones se actualicen para incluir lineamientos específicos sobre la gestión de residuos fotovoltaicos, considerando que en los próximos años se generará una cantidad significativa de paneles solares fuera de servicio que requerirán procesos de reciclaje y disposición adecuada.

En términos generales, el marco regulatorio colombiano ha permitido un avance significativo en la adopción de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca, facilitando la inversión, incentivando la autogeneración y promoviendo la investigación en

energías renovables. No obstante, para consolidar un modelo energético eficiente y sostenible, es necesario fortalecer la infraestructura eléctrica, agilizar los procesos administrativos para acceder a incentivos fiscales y mejorar la planificación normativa para abordar los desafíos futuros del sector.

CAPÍTULO I.

Marco Metodológico

El presente estudio utilizó un enfoque metodológico mixto que combinó técnicas cualitativas y cuantitativas para explorar, analizar y proyectar los escenarios futuros del desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca. Esta sección detalla los métodos y técnicas aplicados durante la investigación, describiendo el proceso de recolección y análisis de datos, así como los resultados obtenidos de cada fase.

Enfoque y Diseño Metodológico Implementado

El diseño metodológico implementado se fundamentó en la integración de enfoques descriptivos, prospectivos y de estudio de caso, lo cual permitió conocer el estado actual y las proyecciones futuras del sector fotovoltaico en la región.

Enfoque Mixto: Se empleó un enfoque mixto para combinar análisis cuantitativo y cualitativo, facilitando una visión integral del desarrollo de la energía fotovoltaica. Este enfoque integró la recopilación de datos numéricos sobre la capacidad instalada y costos del mercado con la interpretación cualitativa de percepciones de actores clave del sector energético en la región (Creswell & Plano Clark, 2017).

Aplicación Práctica: La combinación de encuestas y entrevistas permitió triangulación de datos, lo que enriqueció el análisis y mejoró la validez de los resultados. Los datos cuantitativos aportaron un mayor entendimiento sobre el crecimiento del sector, mientras que los cualitativos revelaron barreras percibidas y oportunidades estratégicas identificadas por los stakeholders.

Diseño Descriptivo, Prospectivo y de Caso de Estudio.

Descriptivo: Se desarrolló un diagnóstico del estado actual del sector fotovoltaico en el Valle del Cauca mediante la recolección y análisis de datos estadísticos de fuentes como la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y otros informes sectoriales. Esta fase permitió identificar las capacidades instaladas, costos y políticas vigentes.

Prospectivo: Para la construcción de escenarios futuros, se aplicó un enfoque prospectivo utilizando técnicas de análisis estructurado de variables clave y su impacto en el desarrollo de la energía fotovoltaica. Se identificaron tendencias tecnológicas, regulatorias y económicas, formulando diferentes escenarios de futuro hacia 2034 (Godet & Durance, 2011).

Caso de Estudio: La metodología incluyó un estudio de caso en el Valle del Cauca, la región de mayor adopción de energía fotovoltaica, lo que permitió analizar en profundidad la implementación de tecnologías fotovoltaicas y la identificación de factores críticos de éxito y desafíos específicos (Yin, 2018).

De acuerdo con lo anterior, el marco metodológico que guió esta investigación fue implementado de manera integral, siguiendo una hoja de ruta clara y estructurada que permitió alcanzar los objetivos planteados para el análisis prospectivo del desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia 2034. Las diferentes fases del proceso metodológico fueron ejecutadas de acuerdo con los lineamientos establecidos en la planificación inicial, y los resultados obtenidos proporcionan una batería de herramientas y claridades puntuales para la formulación de políticas y estrategias energéticas.

Fase 1: Diagnóstico

La primera fase de la investigación consistió en una revisión documental centrada en conocer y entender el contexto energético global y regional y su comportamiento. Se prestó especial atención al Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052, que establece las bases para la transición energética en Colombia. Además, se revisaron proyectos relacionados con la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca, tanto en curso como en fases de planificación y desarrollo, lo que permitió identificar avances y áreas de oportunidad.

Este diagnóstico abarcó los siguientes enfoques:

- **Tecnológico:** Se evaluaron las tecnologías emergentes y disruptivas en el ámbito de la energía fotovoltaica, incluyendo innovaciones en paneles fotovoltaicos, inversores y sistemas de almacenamiento de energía (IEA, 2020).
- **Político/Normativo:** Se analizaron las políticas públicas y regulaciones que afectan el desarrollo de la energía renovable en Colombia, con un enfoque en incentivos y barreras normativas (UPME, 2023).
- **Educativo/Formativo:** Se identificaron programas educativos y de capacitación en energías renovables ofrecidos por universidades y centros de investigación en el Valle del Cauca.
- **Impactos ambientales y sociales:** Se realizaron análisis de los beneficios ambientales derivados de la reducción de emisiones de CO₂ y los impactos sociales, como la generación de empleo, etc.

- **Económico/Mercado:** Se exploraron las condiciones de mercado y las inversiones realizadas por el sector privado en el desarrollo de energía fotovoltaica (IRENA, 2022).

Fase 2: Identificación de Variables y Correlaciones

Posteriormente, se procedió a la identificación de las variables clave que afectan el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca. Este proceso se llevó a cabo mediante la construcción de un árbol de problemas, que permitió visualizar las relaciones de causa y efecto en el sistema energético regional además de los principales obstáculos y oportunidades para el crecimiento de la energía fotovoltaica atribuida a barreras tecnológicas, económicas, y normativas. También, se trabajó en identificar y definir una batería de variables claves necesarias para entender *¿cómo las barreras tecnológicas, económicas, y normativas afectan el crecimiento del sector fotovoltaico?* Además, se aplicaron también criterios de prioridad y selectividad para analizar los problemas principales y las variables relacionadas.

Un diagrama de afinidad permitió organizar, categorizar, analizar y priorizar las variables clave y sus interrelaciones. Este análisis contribuyó a la diferenciación entre variables exógenas y endógenas, este proceso aportó claridad y estableció elementos diferenciales a considerar para la construcción de los escenarios futuros en la siguiente fase.

Fase 3: Construcción del Futuro Deseable

En la tercera fase, se validaron las variables clave mediante un proceso de consulta a actores relevantes en el sector energético, tanto en el ámbito público como privado. Este

proceso fue fundamental para asegurar que las variables seleccionadas tuvieran una relevancia práctica en el contexto del Valle del Cauca.

Se empleó la metodología MicMac para realizar un análisis estructural que permitió identificar las variables más influyentes y dependientes dentro del sistema a futuro (Godet & Durance, 2011).

A partir del análisis estructural, se construyeron diferentes alternativas de futuro utilizando una matriz de impactos cruzados donde se definieron las principales incertidumbres que afectan el desarrollo de la energía fotovoltaica en la región. Estos escenarios se diseñaron en función de las tendencias tecnológicas, políticas, económicas y sociales previamente identificadas.

1. **Escenario pesimista:** Bajo el cual la adopción de la energía fotovoltaica se estanca debido a la falta de apoyo gubernamental y obstáculos financieros.
2. **Escenario tendencial:** Donde la adopción crece a un ritmo moderado, impulsada por esfuerzos locales pero limitada por la infraestructura existente.
3. **Escenario apuesta:** Donde la región lidera la adopción de energía fotovoltaica en Colombia, con un marco regulatorio favorable, inversión pública-privada y el desarrollo de capacidades locales.
4. **Escenario optimista:** Donde la región adelanta diferentes mejoras, pero, no existe una adopción de base que permite la implementación y aprovechamiento debido de la energía fotovoltaica.

Una vez generados los escenarios, se seleccionó el escenario apuesta, el cual representaba la visión más deseable para el desarrollo energético de la región hacia 2034. Esta selección y priorización se basó en los criterios establecidos por Montes (2020), los cuales permiten a los actores contrastar sus visiones y criterios de selección con elementos viables para la consecución del escenario apostado.

Fase 4: Construcción del plan estratégico con base en el escenario apuesta.

Finalmente, se identificaron los retos estratégicos y los objetivos clave necesarios para avanzar hacia el escenario apuesta. A través del método MACTOR, se analizó el posicionamiento y las relaciones entre los actores clave facilitando así el entendimiento de las dinámicas de poder, influencia y colaboración entre ellos (Godet & Durance, 2011).

- Se desarrolló un mapa de resultados a corto, mediano y largo plazo, donde se identificaron los proyectos estratégicos necesarios para alcanzar los objetivos establecidos. Estos proyectos incluyeron iniciativas de inversión en infraestructura fotovoltaica, mejoras en la formación técnica y ajustes en las políticas regulatorias.
- Asimismo, se definieron las relaciones de causalidad y las hipótesis de cambio estableciendo un marco claro para el monitoreo y evaluación de los resultados. Para ello, se formularon indicadores que ayudarán a medir el éxito de la implementación de estas estrategias.
- El proceso concluyó con la validación de los resultados mediante la participación de los stakeholders. Esta fase fue crucial para garantizar que las propuestas fueran viables y contaran con el apoyo de los principales actores involucrados en la transición energética del Valle del Cauca.

CAPÍTULO II.

Resultados de la Fase 1: Diagnóstico.

Tendencias mundiales.

De acuerdo con IRENA (2022), la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las principales fuentes de energía renovable a nivel global, desempeñando un papel crucial en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles. Las tendencias actuales en este sector reflejan avances tecnológicos significativos y una adopción creciente en diversas partes del mundo, entre las más destacadas se han logrado identificar las siguientes:

1. Mejoras en la Eficiencia de los Paneles Solares.

La eficiencia de los paneles solares ha mejorado considerablemente en los últimos años gracias a avances tecnológicos y nuevas técnicas de fabricación. Estas innovaciones no solo optimizan la cantidad de energía que los paneles pueden generar, sino que también los hacen más accesibles y reducen los costos, favoreciendo la expansión de la energía fotovoltaica en todo el mundo. Dentro de estos desarrollos, destacan varias tecnologías clave.

Los paneles bifaciales representan una de las innovaciones más importantes. A diferencia de los paneles tradicionales que capturan la radiación solar solo en un lado, los bifaciales están diseñados para captar luz en ambos lados, aprovechando tanto la radiación directa como la luz reflejada desde el suelo. Este diseño aumenta la eficiencia hasta en un 30% en comparación con los paneles convencionales, dependiendo de las condiciones del entorno.

Otro avance significativo son las celdas solares de perovskita, un material que ha demostrado un gran potencial para mejorar la eficiencia de los paneles solares. Estas celdas pueden absorber una gama más amplia de longitudes de onda de luz, lo que las hace más efectivas que las celdas de silicio tradicionales. Además, la fabricación de celdas de perovskita es más económica y se realiza a temperaturas más bajas, lo que reduce los costos de producción. Actualmente, estas celdas han alcanzado una eficiencia de conversión energética superior al 25%, acercándose al rendimiento de las celdas de silicio, que rondan el 27%.

Dentro del dominio del silicio, las celdas PERC y TOPCon están incrementando aún más la eficiencia. Las celdas PERC aumentan la capacidad del panel para absorber luz y reducen las pérdidas energéticas, mientras que las TOPCon mejoran la captación de electrones y minimizan la recombinación de cargas, maximizando así el rendimiento global de los paneles.

La tecnología de seguimiento solar es otra innovación crucial. Este sistema ajusta la orientación de los paneles para seguir al sol durante el día, aumentando significativamente la producción de energía. Los sistemas de seguimiento pueden ser unidireccionales o bidireccionales y mejoran la eficiencia de los paneles entre un 25% y un 35%, dependiendo de la ubicación y las condiciones climáticas locales.

En condiciones de alta temperatura, que suelen disminuir la eficiencia de los paneles solares tradicionales, se han desarrollado soluciones innovadoras. Estas incluyen materiales de enfriamiento pasivo y revestimientos reflectantes que desvían parte de la luz solar, permitiendo que los paneles mantengan su rendimiento incluso en climas cálidos.

Por último, los paneles solares transparentes están captando la atención en el sector. Estos paneles, diseñados para integrarse en ventanas y fachadas de edificios, capturan energía solar sin bloquear la luz visible, lo que los convierte en una solución ideal para aplicaciones arquitectónicas. Aunque su eficiencia actual es menor que la de los paneles tradicionales, su capacidad para integrarse de manera estética y funcional en entornos urbanos abre nuevas posibilidades para la adopción masiva de la energía solar.

Estos avances reflejan cómo la innovación tecnológica está permitiendo superar barreras históricas, expandiendo el potencial de la energía solar y contribuyendo de manera significativa a la transición energética global.

2. Almacenamiento de energía solar.

El almacenamiento de energía solar es un elemento fundamental para garantizar que la electricidad generada por los paneles fotovoltaicos pueda ser utilizada de manera eficiente, incluso cuando las condiciones de radiación solar son insuficientes, como durante la noche o en días nublados. Este componente ha evolucionado significativamente en los últimos años gracias a avances tecnológicos que han mejorado su eficiencia, accesibilidad y durabilidad. Las innovaciones abarcan múltiples aspectos técnicos y prácticos.

En primer lugar, las baterías de iones de litio (Li-ion) se han consolidado como la tecnología más común para almacenar energía solar debido a su alta densidad energética, eficiencia y larga vida útil. Estas baterías pueden almacenar grandes cantidades de energía en un espacio reducido y ofrecen descargas rápidas y constantes. Las investigaciones actuales se centran en prolongar su vida útil y reducir los costos de fabricación, haciendo que sean más accesibles para una variedad de usuarios. Además, las baterías de litio están

siendo integradas con sistemas de gestión de energía inteligente, lo que optimiza su rendimiento y facilita su uso en combinación con paneles solares.

Otro avance importante son las baterías de flujo, las cuales ofrecen una solución efectiva para el almacenamiento de energía de larga duración con un impacto ambiental reducido. A diferencia de las baterías de litio, que almacenan energía en electrodos sólidos, las baterías de flujo utilizan líquidos que circulan a través de una celda electroquímica. Estas baterías son escalables, ideales para aplicaciones comerciales e industriales, y tienen una vida útil más prolongada debido a su menor degradación. No obstante, todavía enfrentan desafíos en términos de costos y eficiencia, aunque las investigaciones avanzan rápidamente en este campo.

El almacenamiento térmico es otra alternativa interesante, especialmente en proyectos solares a gran escala. Este tipo de almacenamiento utiliza materiales como sales fundidas y materiales de cambio de fase para retener el calor y convertirlo posteriormente en electricidad. Aunque menos eficiente que las baterías eléctricas, el almacenamiento térmico es más económico y adecuado para aplicaciones industriales, y los esfuerzos de investigación se centran en mejorar su eficiencia y reducir costos.

Por su parte, los sistemas de almacenamiento híbridos combinan tecnologías como las baterías de litio y el almacenamiento térmico para maximizar la flexibilidad y la capacidad de respuesta del sistema energético. Este enfoque permite aprovechar las ventajas de cada tipo de almacenamiento según las necesidades específicas, equilibrando la oferta y la demanda de energía en redes eléctricas modernas.

La reducción de costos ha sido un factor crucial en la expansión del almacenamiento solar. En la última década, el precio de las baterías y otros sistemas de almacenamiento ha disminuido significativamente, lo que ha hecho que esta tecnología sea más accesible para consumidores y empresas. Se espera que esta tendencia continúe con la mejora en los procesos de fabricación y la economía de escala derivada de su producción masiva.

Finalmente, la integración con redes inteligentes (smart grids) están transformando la gestión de sistemas de energía. Estas redes permiten una gestión eficiente del flujo de energía, equilibrando la oferta y la demanda de manera más estable. Los sistemas de almacenamiento solar son fundamentales en este contexto, ya que permiten almacenar excedentes de energía renovable y distribuirlos cuando sea necesario. Los avances en tecnologías de gestión energética están optimizando aún más el uso de la energía almacenada, minimizando desperdicios y mejorando la sostenibilidad general del sistema.

3. Integración en la arquitectura y aplicaciones móviles.

La integración de la energía solar fotovoltaica en la arquitectura y las aplicaciones móviles representa un importantísimo avance en términos de la ampliación de las posibilidades de uso de esta tecnología más allá de los sistemas tradicionales. Este enfoque ha generado soluciones innovadoras que optimizan el uso del espacio y adaptan la generación de energía a diversos contextos y necesidades.

En primer lugar, la Arquitectura Solar Integrada (Building Integrated Photovoltaics, BIPV) permite que los paneles solares formen parte de las estructuras de los edificios, reemplazando materiales tradicionales en fachadas, techos y ventanas. Esta integración ofrece múltiples ventajas, como el ahorro de espacio al utilizar estructuras existentes, una

estética mejorada al armonizar con el diseño arquitectónico y la reducción de costos al sustituir materiales convencionales. Ejemplos recientes incluyen edificios corporativos y rascacielos que incorporan fachadas solares, lo que no solo optimiza la generación de energía, sino que también reduce la huella de carbono de estas construcciones.

Entre las innovaciones destacadas están los paneles solares transparentes, diseñados para captar radiación ultravioleta e infrarroja mientras permiten el paso de la luz visible. Esto los convierte en una solución ideal para ventanas y fachadas de edificios modernos, así como para pantallas de dispositivos electrónicos y vidrios de vehículos eléctricos. Esta tecnología permite aprovechar la energía solar sin comprometer la funcionalidad ni la estética del espacio construido, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la dependencia de la red eléctrica.

Otro avance clave son las tejas solares, que combinan apariencia tradicional con capacidad fotovoltaica. Estas tejas eliminan la necesidad de instalar paneles convencionales al integrarse completamente en los techos, ofreciendo un diseño armonioso y eficiente. Empresas como Tesla han liderado este mercado con productos que destacan por su durabilidad y atractivo estético, ganando popularidad en proyectos residenciales y comerciales.

El uso de energía solar también se está expandiendo en las aplicaciones móviles, con cargadores solares portátiles que permiten a los usuarios cargar dispositivos electrónicos como teléfonos móviles y tablets mientras están en movimiento o en áreas sin acceso a electricidad. Asimismo, los paneles solares ligeros y plegables se están utilizando en actividades al aire libre como camping y senderismo, proporcionando una fuente confiable de energía. Además, la integración de paneles solares en drones y vehículos

eléctricos está en auge, mejorando su autonomía y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

En el ámbito de la construcción sostenible, los sistemas fotovoltaicos están fomentando la creación de Edificios de Energía Cero (Zero Energy Buildings), diseñados para generar tanta energía como consumen. Muchas ciudades están adoptando normativas que exigen la inclusión de tecnologías solares en nuevos desarrollos urbanos, promoviendo la transición hacia edificios más sostenibles y alineados con los objetivos climáticos globales.

4. Tecnología Grid Forming.

La tecnología Grid Forming está transformando el sector de las energías renovables al permitir que los sistemas solares fotovoltaicos participen activamente en la estabilidad de las redes eléctricas. Esta innovación aborda uno de los principales desafíos de las energías renovables variables, como la solar y la eólica: su intermitencia y la falta de capacidad para estabilizar parámetros clave de la red, como la frecuencia y el voltaje. Su implementación aporta soluciones tecnológicas avanzadas que están redefiniendo la manera en que operan las redes eléctricas modernas.

Uno de los desarrollos más destacados es la capacidad de los inversores con tecnología Grid Forming para generar inercia virtual, una función tradicionalmente proporcionada por grandes generadores síncronos de plantas térmicas o hidroeléctricas. Este avance, logrado mediante software avanzado y control dinámico, ayuda a mantener la frecuencia y el voltaje dentro de los parámetros operativos, incluso ante fluctuaciones en la generación o el consumo energético. Es especialmente útil en redes con alta penetración de

renovables, donde los generadores tradicionales están siendo reemplazados progresivamente.

Además de emular inercia, estos sistemas regulan de manera activa la frecuencia y el voltaje de la red, ajustándose dinámicamente a sus necesidades. Operan tanto en modo autónomo como conectados a la red principal, lo que los hace versátiles para su uso en sistemas aislados y redes interconectadas. Su capacidad para detectar variaciones en tiempo real y estabilizar la red es crucial en escenarios donde la generación renovable representa una porción significativa del suministro energético.

En aplicaciones como microrredes y sistemas eléctricos aislados, los inversores Grid Forming ofrecen una solución efectiva para proporcionar estabilidad y confiabilidad sin necesidad de generadores diésel. En comunidades remotas e islas, estos sistemas no solo aseguran un suministro eléctrico continuo, sino que también reducen la necesidad de almacenamiento adicional, optimizando los costos del sistema.

La interoperabilidad es otro punto fuerte de esta tecnología. Permite la integración eficiente de diversas fuentes de generación, como eólica, hidráulica y almacenamiento en baterías, dentro de un sistema híbrido. Esto mejora la flexibilidad de las redes eléctricas y reduce la necesidad de infraestructura costosa para manejar fluctuaciones, facilitando una transición energética hacia un mayor uso de fuentes renovables.

La tecnología Grid Forming también se complementa con las redes inteligentes (smart grids), que gestionan de manera eficiente la generación y el consumo de energía en tiempo real. Los dispositivos Grid Forming interactúan con sistemas basados en IoT y Big

Data para optimizar la distribución de energía, aumentando la eficiencia operativa y minimizando interrupciones.

Sin embargo, su adopción masiva enfrenta desafíos. Los costos iniciales elevados representan una barrera en muchos mercados emergentes, mientras que la operación y mantenimiento requieren personal capacitado. También es necesario que los estándares regulatorios evolucionen para garantizar su interoperabilidad y seguridad en redes tradicionales y renovables.

5. Paneles solares flotantes.

Los paneles solares flotantes, también conocidos como sistemas fotovoltaicos flotantes (FPV, por sus siglas en inglés), son una innovación en la generación de energía solar que utiliza superficies acuáticas como lagos, embalses y cuerpos de agua artificiales. Esta tecnología no solo aprovecha espacios subutilizados, sino que también ofrece beneficios únicos desde el punto de vista ambiental, técnico y económico, posicionándose como una solución prometedora en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles.

El primer gran beneficio de los paneles solares flotantes es su capacidad para aprovechar espacios subutilizados, como embalses de agua potable, lagos industriales y depósitos de riego. Esto resulta especialmente relevante en regiones densamente pobladas o con limitaciones de terreno disponible, ya que permite generar energía sin competir con otros usos del suelo, como la agricultura o la urbanización.

En términos de rendimiento, los paneles solares flotantes ofrecen una mayor eficiencia energética en comparación con los sistemas terrestres. Esto se debe al efecto de enfriamiento natural proporcionado por el agua, que reduce las temperaturas de los paneles

y optimiza su desempeño. Estudios han demostrado que esta tecnología puede generar hasta un 15% más de energía que los sistemas tradicionales en condiciones similares.

Además de su eficiencia, estos sistemas contribuyen a la conservación hídrica al cubrir parcialmente los cuerpos de agua y reducir la evaporación provocada por el sol y el viento. Esto es particularmente beneficioso en regiones áridas o con estrés hídrico, donde el agua almacenada es un recurso crítico. Paralelamente, al limitar la cantidad de luz solar que penetra en el agua, los paneles solares flotantes también pueden mitigar el crecimiento excesivo de algas, lo que mejora la calidad del agua y favorece los ecosistemas acuáticos.

Desde un punto de vista técnico, los sistemas fotovoltaicos flotantes destacan por su modularidad y escalabilidad, lo que facilita su instalación y expansión según las necesidades energéticas. Estos sistemas están diseñados para adaptarse a diferentes tamaños y configuraciones de cuerpos de agua, y su instalación no requiere infraestructura compleja, lo que reduce costos iniciales.

Aunque los impactos ambientales de los paneles solares flotantes son reducidos en comparación con otras tecnologías, se implementan medidas para minimizar cualquier efecto negativo. Las plataformas están diseñadas para evitar la liberación de materiales tóxicos y garantizar la estabilidad de los ecosistemas locales. Además, muchos proyectos incluyen el monitoreo continuo de la calidad del agua y el impacto ambiental para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

En cuanto a los costos operativos, los sistemas flotantes presentan ventajas como la menor necesidad de preparación del terreno y la posibilidad de conectarse a infraestructura existente, como embalses con líneas eléctricas cercanas. Sin embargo, su adopción enfrenta

retos, entre ellos los costos iniciales más altos debido a la tecnología especializada y la necesidad de diseños resistentes para soportar condiciones climáticas extremas, como fuertes vientos o tormentas.

6. Autoconsumo Fotovoltaico y Comunidades Solares.

El autoconsumo fotovoltaico y las comunidades solares son dos de las tendencias más significativas en la adopción de energía solar en todo el mundo. Estas innovaciones permiten que los consumidores y las comunidades aprovechen la energía solar no solo para reducir su dependencia de la red eléctrica, sino también para mejorar la sostenibilidad energética y reducir los costos. A continuación, se detallan los avances en ambos campos.

El autoconsumo fotovoltaico se refiere a la utilización de la energía solar generada localmente para satisfacer las necesidades energéticas de consumidores individuales, como hogares, empresas e industrias. Este sistema permite a los usuarios generar y consumir su propia electricidad, reduciendo la necesidad de comprar energía de las compañías eléctricas y, en algunos casos, eliminando completamente los costos asociados con el consumo energético.

Entre las mejoras clave en el autoconsumo fotovoltaico se incluyen las baterías de almacenamiento y los sistemas inteligentes de gestión energética. Las baterías de iones de litio, por ejemplo, permiten almacenar el exceso de electricidad generada durante el día para su uso en la noche o en días nublados. Además, la integración de sistemas de gestión energética inteligente optimiza el consumo de la energía almacenada, reduciendo aún más la dependencia de la red. Además, los costos de los sistemas fotovoltaicos han disminuido considerablemente en la última década, lo que ha hecho que el autoconsumo solar sea más accesible. La reducción de los costos de paneles solares y baterías de almacenamiento ha

sido un factor clave para esta tendencia, facilitando la adopción de esta tecnología en más hogares y empresas. A su vez, muchos gobiernos están implementando incentivos fiscales y subsidios para fomentar el autoconsumo, como créditos fiscales y subvenciones directas para la instalación de sistemas solares.

Las comunidades solares, también conocidas como cooperativas solares, son una extensión del autoconsumo fotovoltaico, pero en lugar de depender de un solo hogar o empresa, permiten que un grupo de usuarios comparta los beneficios de un sistema solar colectivo. Este modelo es especialmente útil para personas que no tienen suficiente espacio para instalar paneles solares, como los residentes de edificios de apartamentos o áreas con limitación de terrenos.

Las mejoras en las comunidades solares incluyen modelos cooperativos y de propiedad compartida, donde los miembros invierten en un sistema fotovoltaico común y reciben una parte de la electricidad generada. Este modelo ha ganado popularidad, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas, al reducir los costos asociados con la instalación y el mantenimiento de los sistemas solares. Además, las comunidades solares democratizan el acceso a la energía solar, permitiendo que quienes no pueden instalar sistemas privados también se beneficien de la energía renovable. La adopción de plataformas de gestión digital y tecnología inteligente ha mejorado la administración de estas comunidades. Estas herramientas permiten a los usuarios monitorear su participación en el sistema, distribuir eficientemente la electricidad generada y optimizar el uso de la energía. También facilitan la integración de almacenamiento de energía y redes inteligentes, mejorando la eficiencia general de las comunidades solares.

Mirando hacia el futuro, el autoconsumo fotovoltaico y las comunidades solares están avanzando hacia una mayor integración con redes inteligentes (smart grids) y el uso de blockchain para la gestión eficiente de la energía. Las redes inteligentes permitirán gestionar y distribuir la electricidad de manera más eficiente, equilibrando la oferta y la demanda de energía de forma autónoma. Además, la tecnología blockchain podría facilitar transacciones transparentes y seguras entre los miembros de las comunidades solares, promoviendo la compensación por el exceso de energía generada y apoyando la economía circular energética.

Generalidades del Plan Energético Nacional 2022 – 2052.

El Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052 de Colombia establece un marco estratégico para el desarrollo del sector energético, con un enfoque particular en la sostenibilidad y la diversificación de fuentes de energía. A continuación, se presenta un diagnóstico detallado sobre cómo el PEN aborda la implementación y aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

1. Contexto y Justificación para la Energía Solar Fotovoltaica

Potencial Solar en Colombia: Colombia se encuentra en una ubicación geográfica privilegiada que le otorga un alto potencial para la generación de energía solar. Las regiones del Valle del Cauca, la Costa Caribe y los Llanos Orientales presentan niveles de radiación solar que superan los 5 kWh/m²/día, lo que las convierte en áreas ideales para la instalación de sistemas fotovoltaicos. Este potencial no solo puede satisfacer la demanda interna, sino que también puede posicionar a Colombia como un exportador de energía renovable en la región.

Descarbonización: La energía solar fotovoltaica es fundamental para la estrategia de descarbonización del país. La transición hacia fuentes de energía limpias es crucial para cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones, como los establecidos en el Acuerdo de París. La implementación de proyectos solares puede contribuir a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, que son responsables de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia.

2. Estrategias y Políticas para la Energía Solar Fotovoltaica

Fomento de Energías Renovables: El PEN establece un marco normativo que busca incentivar la inversión en energías renovables, incluyendo la solar fotovoltaica. Esto incluye la creación de incentivos fiscales, como exenciones de impuestos y subsidios para la instalación de sistemas solares. Además, se propone la simplificación de trámites administrativos para la obtención de permisos, lo que facilitaría la implementación de proyectos.

Desarrollo de Capacidades Locales: La capacitación de mano de obra local es esencial para el éxito de la energía solar fotovoltaica. El PEN promueve programas de formación técnica en colaboración con instituciones educativas y empresas del sector. Esto no solo generará empleo, sino que también asegurará que las comunidades locales tengan la capacidad de operar y mantener los sistemas solares, lo que es crucial para la sostenibilidad a largo plazo de estos proyectos.

Integración en la Matriz Energética: La integración de la energía solar en la matriz energética nacional es un objetivo clave del PEN. Esto implica la creación de un marco regulatorio que facilite la conexión de proyectos solares a la red eléctrica. Se deben establecer estándares técnicos y procedimientos claros para la interconexión, así como

mecanismos de compensación para los productores de energía solar que inyecten electricidad a la red. Además, se debe considerar la implementación de sistemas de almacenamiento de energía para gestionar la intermitencia de la generación solar.

3. Desafíos y Oportunidades

Desafíos.

- **Inversión Inicial:** A pesar de que los costos de la tecnología solar han disminuido en los últimos años, la inversión inicial sigue siendo un obstáculo para muchos potenciales usuarios, especialmente en áreas rurales. El PEN debe abordar este desafío mediante la creación de mecanismos de financiamiento accesibles, como créditos blandos o fondos de inversión específicos para energías renovables.
- **Regulación y Normativa:** La falta de un marco regulatorio claro puede generar incertidumbre para los inversores. Es crucial que el PEN establezca directrices claras y estables que promuevan la inversión en energía solar. Esto incluye la definición de tarifas de compra garantizadas y la protección de los derechos de los productores de energía solar.

Oportunidades.

- **Financiamiento Verde:** La creciente disponibilidad de financiamiento verde y fondos internacionales para proyectos de energía renovable puede facilitar la implementación de proyectos solares. El PEN debe promover la creación de alianzas con instituciones financieras y organismos internacionales para acceder a estos recursos, lo que podría reducir la carga financiera sobre los proyectos.

- **Participación Comunitaria:** La promoción de proyectos solares comunitarios puede empoderar a las comunidades locales y fomentar la aceptación social de la energía solar. Esto implica involucrar a las comunidades en la planificación y ejecución de proyectos, asegurando que se beneficien directamente de la energía generada. Además, se pueden establecer modelos de cooperativas energéticas que permitan a los ciudadanos participar en la producción y gestión de energía solar.

4. Impacto Esperado y Contribución a los Objetivos del PEN

Sostenibilidad y Eficiencia Energética: La implementación de energía solar fotovoltaica contribuirá a la sostenibilidad del sistema energético colombiano. Al diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes fósiles, se promoverá un uso más eficiente de los recursos energéticos. Además, la energía solar puede ayudar a mitigar los efectos del cambio climático al reducir la huella de carbono del país.

Diversificación de la Matriz Energética: La energía solar fotovoltaica jugará un papel clave en la diversificación de la matriz energética, disminuyendo la dependencia de fuentes fósiles y aumentando la resiliencia del sistema ante cambios climáticos y fluctuaciones en el mercado energético. Esto es especialmente relevante en un contexto donde la seguridad energética es una preocupación creciente.

Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: La adopción de energía solar fotovoltaica está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo que respecta a la energía asequible y no contaminante, así como la acción por el clima. La promoción de la energía solar puede contribuir a mejorar el acceso a

la energía en comunidades rurales y marginadas, abordando así las brechas de equidad y promoviendo el desarrollo sostenible.

5. Diagnóstico de los factores abordados por el PEN.

Ahora bien, de acuerdo con la UPME (2023), el PEN también aborda un cumulo de factores políticos, económicos, sociales, ambientales y técnicos que influyen en la implementación y aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en el contexto de Colombia, en este caso, los factores son:

5.1. Factores Políticos

Marco Regulatorio: El marco regulatorio es fundamental para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica. Esto incluye la creación de leyes que faciliten la instalación de paneles solares, así como normativas que regulen la conexión a la red eléctrica. Un marco regulatorio claro y estable puede incentivar la inversión privada, ya que los inversores buscan seguridad jurídica. Además, es importante que las regulaciones sean flexibles y se adapten a los cambios tecnológicos y de mercado (UPME, 2023).

Compromiso Gubernamental: El compromiso del gobierno es crucial para la promoción de la energía solar. Esto se traduce en políticas públicas que no solo fomenten la inversión en energías renovables, sino que también establezcan metas claras de generación de energía solar. La creación de incentivos fiscales, como deducciones impositivas o subsidios, puede estimular la adopción de tecnologías solares. Además, el gobierno debe liderar con el ejemplo, implementando proyectos de energía solar en edificios públicos y promoviendo su uso en comunidades (UPME, 2023).

Estabilidad Política: La estabilidad política es un factor determinante para atraer inversiones en el sector energético. La incertidumbre política puede generar desconfianza entre los inversores, lo que puede llevar a la paralización de proyectos. Un entorno político estable, con un marco normativo claro y un compromiso continuo con la transición energética, es esencial para crear un clima favorable para la inversión en energía solar (UPME, 2023).

5.2. Factores Económicos

Inversión Inicial: La energía solar fotovoltaica requiere una inversión inicial considerable, lo que puede ser una barrera para su adopción. Es fundamental que existan mecanismos de financiamiento accesibles, como créditos blandos, fondos de inversión y asociaciones público-privadas. Además, se pueden explorar modelos de financiamiento innovadores, como el "pago por uso", donde los usuarios pagan por la energía generada en lugar de comprar el sistema completo (UPME, 2023).

Costos de Tecnología: La reducción de costos de la tecnología solar ha sido notoria en los últimos años, lo que ha hecho que la energía solar sea más competitiva frente a otras fuentes de energía. Sin embargo, es importante seguir invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia de los paneles solares y reducir aún más los costos. Esto incluye la exploración de nuevas tecnologías, como paneles bifaciales y sistemas de seguimiento solar, que pueden aumentar la producción de energía (UPME, 2023).

Mercado de Energía: La creación de un mercado competitivo para la energía solar es esencial para su desarrollo. Esto implica establecer tarifas justas para la compra de energía generada por sistemas solares, así como mecanismos de compensación que incentiven a los productores. Además, es importante fomentar la competencia en el sector

energético, permitiendo la entrada de nuevos actores y promoviendo la diversificación de la matriz energética (UPME, 2023).

5.3. Factores Sociales

Conciencia y Educación: La promoción de la energía solar fotovoltaica requiere un aumento en la conciencia pública sobre sus beneficios. Esto puede lograrse a través de campañas de sensibilización y programas educativos que informen a la población sobre la importancia de la energía renovable y su impacto positivo en el medio ambiente. La educación debe dirigirse a diferentes grupos, incluyendo estudiantes, comunidades locales y empresarios, para fomentar una cultura de sostenibilidad (UPME, 2023).

Participación Comunitaria: Involucrar a las comunidades locales en proyectos de energía solar es fundamental para generar aceptación y apoyo. Esto puede incluir la creación de cooperativas de energía solar, donde las comunidades se asocien para desarrollar proyectos y beneficiarse directamente de la generación de energía. La participación comunitaria también puede ayudar a identificar las necesidades locales y adaptar los proyectos a las realidades específicas de cada región (UPME, 2023).

Equidad Social: Es crucial que la implementación de la energía solar fotovoltaica beneficie a todos los sectores de la población, especialmente a aquellos en situación de vulnerabilidad. Esto puede incluir programas específicos para facilitar el acceso a la energía solar en áreas rurales y comunidades desfavorecidas. La equidad social también implica garantizar que los beneficios económicos de los proyectos de energía solar se distribuyan de manera justa entre todos los actores involucrados (UPME, 2023).

5.4. Factores Ambientales

Impacto Ambiental: Aunque la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía limpia, su implementación debe considerar el impacto ambiental de la instalación de paneles solares. Esto incluye la evaluación de la ocupación del suelo, el uso de recursos naturales y la gestión de residuos. Se deben realizar estudios de impacto ambiental para mitigar cualquier efecto negativo y garantizar que los proyectos sean sostenibles a largo plazo (UPME, 2023).

Cambio Climático: La energía solar contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que es crucial en el contexto del cambio climático. El PEN debe resaltar cómo la adopción de energía solar puede ayudar a Colombia a cumplir con sus compromisos internacionales en materia de cambio climático. Además, es importante que los proyectos de energía solar se alineen con las estrategias nacionales de adaptación y mitigación del cambio climático (UPME, 2023).

Recursos Naturales: La disponibilidad de recursos solares en diferentes regiones del país es un factor determinante para la implementación de proyectos de energía solar. El PEN debe identificar las áreas con mayor potencial solar y promover proyectos en estas zonas. Además, es importante considerar la interacción de la energía solar con otros recursos naturales, como el agua, para garantizar un uso sostenible de los mismos (UPME, 2023).

5.5. Factores Técnicos

Infraestructura de Red: La capacidad de la red eléctrica para integrar la energía solar es un aspecto técnico clave. Se requiere inversión en infraestructura para garantizar que la red pueda manejar la intermitencia de la generación solar y facilitar la conexión de

nuevos proyectos. Esto incluye la modernización de la red eléctrica, la implementación de sistemas de gestión de energía y la creación de microrredes que permitan una mayor flexibilidad en la generación y distribución de energía (UPME, 2023).

Tecnología de Almacenamiento: La implementación de sistemas de almacenamiento de energía es fundamental para maximizar el aprovechamiento de la energía solar. Esto permite almacenar la energía generada durante el día para su uso en momentos de alta demanda o cuando no hay sol. La inversión en tecnologías de almacenamiento, como baterías de litio y sistemas de almacenamiento por bombeo, es esencial para mejorar la estabilidad y confiabilidad del suministro energético (UPME, 2023).

Investigación y Desarrollo: Fomentar la investigación en nuevas tecnologías solares es esencial para mejorar la competitividad de la energía solar fotovoltaica en el mercado energético. Esto incluye la exploración de nuevas tecnologías, como paneles más eficientes y sistemas de seguimiento solar. Además, es importante promover la colaboración entre universidades, centros de investigación y empresas para desarrollar soluciones innovadoras que impulsen el crecimiento del sector (UPME, 2023).

6. Interpretación del PEN.

El primer paso del Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052 consiste en comprender el punto de partida del sector energético en Colombia, lo que incluye un análisis de los recursos e infraestructuras existentes, así como de la producción y consumo de energía en el país. Este análisis también aborda las oportunidades y riesgos asociados al contexto colombiano. Se presenta una matriz de entorno que examina factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos y ambientales, que son determinantes en la formulación

del plan energético. Además, se describe la situación actual desde la perspectiva de la oferta y la demanda energética, y se evalúa la competitividad de los diferentes tipos de energía en los distintos sectores mediante un análisis de precios relativos. Finalmente, se plantea una visión a largo plazo que busca habilitar el desarrollo sostenible a través de la transformación del sector energético, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo que respecta a la energía asequible y no contaminante, así como a la industria, innovación e infraestructura.

La visión del PEN se basa en el compromiso de Colombia con el progreso a largo plazo y tiene como objetivo erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y la prosperidad para todos. Se considera que el sector energético puede contribuir significativamente a esta visión, ofreciendo alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. La transición energética es vista como un proceso clave para el desarrollo sostenible del país, y se requiere una coordinación interinstitucional para abordar los desafíos económicos y sociales que surgen en este contexto.

Además, se destaca la importancia de avanzar en la digitalización y en la medición del consumo energético, así como de empoderar a los usuarios con información y herramientas que fomenten un consumo más consciente. También se subraya la necesidad de implementar tecnologías de captura y uso de CO₂, creando condiciones de mercado que incentiven su incorporación en las cadenas de valor. La transición y modernización del sector energético deben considerar los costos y beneficios tanto privados como sociales, y es fundamental construir consensos sociales para lograr una transición efectiva y justa, teniendo en cuenta las perspectivas de desarrollo local.

CAPÍTULO III.

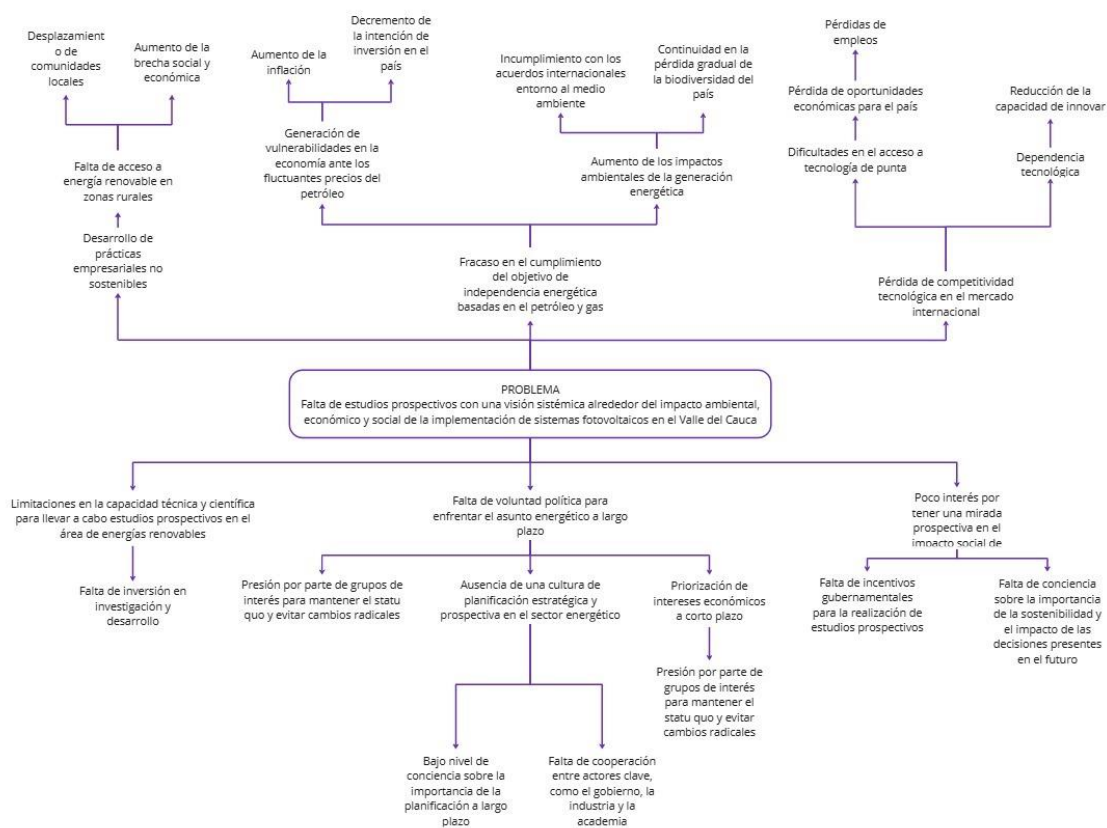
Resultados de la Fase 2: Identificación de Variables y Correlaciones.

Árbol de Problemas.

Construcción del árbol de problema

El ejercicio de desarrollar el árbol de problema facilitó la identificación y clasificación de los problemas principales y sus causas y efectos correspondientes. El árbol de problemas fue construido a través de un proceso colaborativo que involucró a diversos actores clave relacionados con el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca. Entre los participantes se incluyeron representantes gubernamentales, como funcionarios del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), quienes aportaron perspectiva regulatoria y ambiental; académicos de universidades y centros de investigación, que brindaron fundamentos técnicos y metodológicos; empresas del sector energético, que ofrecieron información práctica sobre la implementación de tecnologías fotovoltaicas; líderes comunitarios y ONGs ambientales, que representaron los intereses y preocupaciones sociales y ambientales de las comunidades locales; y entidades financieras, que evaluaron los aspectos económicos relacionados con los proyectos.

Ilustración 1. Árbol de problemas



Elaboración propia de los autores, 2024.

A través de una lluvia de ideas guiada, los participantes señalaron problemas percibidos, que luego se clasificaron como causas directas, causas indirectas y efectos, estableciendo conexiones causales entre ellos. Este análisis permitió determinar el problema central como "falta de estudios prospectivos con una visión sistémica alrededor del impacto ambiental, económico y social de la implementación de sistemas fotovoltaicos en el Valle del Cauca". Con base en esta primera versión, se organizó una segunda sesión en la que los actores revisaron y refinaron el árbol inicial, identificando nuevas variables y validando la coherencia del análisis.

Posteriormente, el árbol de problemas fue validado mediante un proceso de revisión integral en el que participaron los mismos actores iniciales, complementados por expertos en prospectiva, quienes garantizaron la coherencia metodológica, y representantes de la sociedad civil, que confirmaron la pertinencia de las problemáticas, causas y efectos identificados. Este enfoque permitió consolidar un diagnóstico robusto y representativo de las dinámicas territoriales, integrando tanto aspectos técnicos como ambientales, sociales y económicos.

En el proceso de construcción del árbol de problemas, se evidencia entonces como problemática central *falta de estudios prospectivos con una visión sistémica alrededor del impacto ambiental, económico y social de la implementación de sistemas fotovoltaicos en el Valle del Cauca*, la falta de estudios prospectivos vista de manera holística desde la puesta en marcha de estos enfoques y tecnologías en la región. Ahora bien, La conclusión de que "*falta de estudios prospectivos con una visión sistémica alrededor del impacto ambiental, económico y social de la implementación de sistemas fotovoltaicos en el Valle del Cauca*" constituía el problema central fue resultado de un análisis estructurado y participativo desarrollado durante la construcción del árbol de problemas. Este proceso comenzó con una revisión de las barreras identificadas en el diagnóstico inicial, que incluyó aspectos técnicos, sociales, económicos, políticos y ambientales. Luego, a través de una lluvia de ideas facilitada por expertos en prospectiva y análisis sistémico, se plantearon múltiples problemas percibidos por los actores clave.

Por otra parte, la falta de un enfoque integral en la implementación de sistemas fotovoltaicos emergió como un elemento recurrente, manifestándose en la ausencia de políticas claras, la limitada capacidad técnica de los actores locales, las deficiencias en la

infraestructura, la falta de financiamiento accesible y la insuficiente sensibilización de las comunidades sobre los beneficios de esta tecnología. Asimismo, se destacó que la falta de gestión adecuada dificultaba el alineamiento de estos sistemas con los principios de sostenibilidad, agravando los impactos ambientales y sociales potenciales.

El análisis posterior se centró en identificar un hilo conductor que interrelacionara estas barreras, y el desconocimiento y gestión de las condiciones idóneas para la implementación de los sistemas fotovoltaicos surgió como el factor más representativo y transversal. Esta conclusión fue validada mediante discusiones iterativas con los actores participantes, quienes coincidieron en que el desconocimiento y la gestión inadecuada limitaban significativamente el avance del sector fotovoltaico en la región, afectando tanto el diseño como la ejecución de proyectos. Esta falta de conocimiento holístico, tanto técnico como estratégico, fue reconocida como el principal obstáculo para alcanzar un desarrollo sostenible en la generación de energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca.

A través de la lluvia de ideas, se procede a determinar las variables causales y al mismo tiempo, mediante el análisis de los efectos se identificaron las variables resultantes. Así, en la medida en que se analizaba el problema, sus causas y sus efectos, se formularon algunas cuestiones que ampliaron el abanico de posibles variables, abriendo paso al siguiente punto: identificación de variables, tal como lo muestra la tabla 2.

Relaciones entre causas y efectos

Las causas identificadas interactúan entre sí y amplifican los efectos negativos. Por ejemplo, la falta de políticas claras y la infraestructura insuficiente se combinan para desincentivar la inversión, lo que perpetúa la dependencia de fuentes fósiles y frena la transición energética. Del mismo modo, la baja capacidad técnica y la escasa

sensibilización social alimentan un ciclo en el que la resistencia al cambio obstaculiza la implementación de proyectos solares, exacerbando desigualdades y retrasando el desarrollo económico sostenible.

El árbol de problemas ilustra cómo las causas indirectas fortalecen las causas directas y, a su vez, generan efectos inmediatos y secundarios que afectan no solo la implementación de sistemas fotovoltaicos, sino también el progreso socioeconómico y ambiental del Valle del Cauca. Este análisis resalta la necesidad de abordar estas interrelaciones de manera integral para romper el ciclo y facilitar el desarrollo del sector solar en la región.

Tabla 2. Revisión del árbol de problemas e identificación de variables.

Impacto ambiental	Impacto económico	Impacto social
¿Cuáles son los principales impactos ambientales de la producción y disposición de paneles solares fotovoltaicos en el Valle del Cauca?	¿Cuál es el costo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca y cómo se compara con otras fuentes de energía?	¿Cómo afecta la energía fotovoltaica a la creación de empleo y la economía local?
¿Cuál es el impacto ambiental de la producción masiva de paneles solares en el Valle del Cauca?	¿Existen incentivos reales para la adopción de métodos alternativos que permitan la generación de energía fotovoltaica en el Valle del Cauca?	¿Cómo se puede garantizar que las comunidades locales tengan acceso y se beneficien de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca?

Impacto ambiental	Impacto económico	Impacto social
¿Cuál es el impacto ambiental de la instalación de paneles solares fotovoltaicos en diferentes tipos de terreno en el Valle del Cauca, por ejemplo, en zonas urbanas, rurales o boscosas?	¿Se pueden financiar proyectos de energía fotovoltaica en el Valle del Cauca? ¿Existen modelos económicos más sostenibles a largo plazo?	¿Cómo afecta la energía fotovoltaica a la calidad de vida de las personas y las comunidades en el Valle del Cauca?
¿Cuál es el impacto ambiental del uso de los componentes necesarios para la generación y almacenamiento de energía fotovoltaica en el Valle del Cauca, como los inversores, baterías y otros equipos?	¿Cuál es el impacto económico de la exportación de tecnología y equipos solares desde el Valle del Cauca a otros países?	¿Cómo puede la energía fotovoltaica ayudar a reducir la pobreza energética en el Valle del Cauca y garantizar el acceso a la energía para todos?
¿Cómo se pueden minimizar los impactos ambientales de la generación y almacenamiento de energía fotovoltaica en el Valle del	¿Cuál es el impacto económico de la energía fotovoltaica en el sector energético y en la economía	¿Cómo afecta la energía fotovoltaica a la seguridad energética y la independencia del Valle del

Impacto ambiental	Impacto económico	Impacto social
Cauca, por ejemplo, mediante el uso de tecnologías más eficientes y la gestión adecuada de los residuos?	en general en el Valle del Cauca?	Cauca en términos de suministro energético?
¿Cuál es el impacto ambiental de la instalación de grandes parques solares en el Valle del Cauca, en términos de su impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas locales?	¿Cómo pueden los proyectos de energía fotovoltaica generar empleo y estimular la economía local en el Valle del Cauca?	¿Cómo puede la energía fotovoltaica fomentar la inclusión social y la equidad en el Valle del Cauca?
¿Cómo pueden los proyectos de energía fotovoltaica ser diseñados para minimizar su impacto ambiental en el Valle del Cauca, por ejemplo, mediante la selección de sitios adecuados y la adopción de medidas de mitigación?	¿Cuál es el impacto económico de la energía fotovoltaica en los sectores económicos inmersos en el territorio donde se implementan los sistemas?	¿Cómo puede la energía fotovoltaica fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico en el Valle del Cauca?

Elaboración propia de los autores, 2024.

Definición de efectos y causas

Construcción del sistema de variables.

Para la identificación de las variables relacionadas con el problema se hace una primera aproximación a través de una revisión bibliográfica de artículos científicos SCOPUS (Esta base de datos incluye únicamente publicaciones revisadas por pares (reconocido rigor científico y cobertura multidisciplinaria), garantizando la calidad y fiabilidad de los artículos utilizados. Además, sus herramientas avanzadas de búsqueda e indexación permiten filtrar los estudios más actuales y de mayor impacto, lo que asegura una investigación basada en evidencia sólida y actualizada constantemente) con el fin de determinar factores documentados y ampliamente relacionados con el problema; esta revisión bibliográfica permitió examinar un total de 85 artículos científicos publicados entre 2015 y 2023, los cuales abordan temas clave relacionados con el desarrollo de la energía solar fotovoltaica. Los artículos revisados exploraron aspectos como los avances tecnológicos en paneles solares bifaciales, inversores inteligentes y sistemas de almacenamiento; el impacto ambiental y la sostenibilidad, con énfasis en la reducción de emisiones de CO₂ y la mitigación de impactos en ecosistemas locales; modelos de financiamiento e incentivos fiscales; la aceptación social de los proyectos de energía solar, y los retos de integrar energías renovables en las redes eléctricas mediante tecnologías como los inversores "Grid Forming". A partir de esta revisión, se identificaron variables críticas, incluyendo factores tecnológicos (eficiencia de los paneles y capacidad de almacenamiento), económicos (costo de inversión y viabilidad financiera), sociales (percepción comunitaria y acceso equitativo), políticas (regulaciones y normatividades) y

ambientales (reducción de emisiones y estrategias de economía circular). Los resultados obtenidos proporcionan una visión integral de los factores que afectan la implementación de sistemas fotovoltaicos en el Valle del Cauca, lo que será fundamental para orientar el diseño de escenarios futuros y estrategias efectivas en el marco de la transición energética.

Sin embargo, como se ha expuesto anteriormente, la identificación de las variables es respuesta principalmente del ejercicio de lluvia de ideas estructurado a partir de la revisión del árbol de problema y de la formulación de una serie de preguntas que surgen de su revisión; el proceso ejecutado para la identificación de variables y la final priorización de estas se fundamentó en un proceso metodológico que incluyó varias etapas claves para garantizar un análisis técnico y coherente con los objetivos de la investigación. En primer lugar, se realizó un ejercicio de lluvia de ideas en el que participaron expertos y actores clave del sector, quienes aportaron perspectivas desde áreas técnicas, económicas, sociales, políticas, tecnológicas y ambientales. Este proceso fue enriquecido mediante la revisión del árbol de problemas, lo cual permitió identificar las relaciones causales y efectos derivados de los desafíos asociados con el desarrollo de la energía solar fotovoltaica.

Durante la revisión del árbol de problemas, se formularon una serie de preguntas orientadoras que guiaron la discusión, tales como: "¿Qué factores técnicos limitan la adopción de la energía solar?", "¿Cómo influyen las políticas locales y nacionales en la implementación de proyectos fotovoltaicos?" y "¿Qué impacto tienen las percepciones sociales en la aceptación de estas tecnologías?". Estas preguntas facilitaron la identificación de variables estratégicas, ya que conectaron de manera lógica los problemas centrales con sus causas y consecuencias.

Finalmente, el resultado de este análisis se complementó con técnicas de priorización, como el uso de matrices de influencia y dependencia derivadas de la herramienta MicMac. Esto permitió clasificar las variables en categorías estratégicas (alta influencia y baja dependencia), conflictivas (alta influencia y alta dependencia), autónomas (baja influencia y baja dependencia) y de resultado (baja influencia y alta dependencia). De este modo, el proceso garantizó que las variables prioritarias seleccionadas fueran las más relevantes y críticas para la construcción de escenarios futuros y el diseño del plan estratégico. Este enfoque técnico y estructurado aseguró una priorización clara, alineada con los objetivos de la investigación y las dinámicas del sistema energético estudiado.

A partir de la intención de la investigación, se identificaron alrededor de 7 dimensiones naturales (económica, geográfica, sociocultural, ambiental, técnico-operativa, tecnológica y política-regulatoria) las cuales desde sus diferentes variables influyen o condicionan la investigación y el impacto socioeconómico y lo ambiental del tema abordado.

Como resultado del ejercicio de identificación de variables, surgen 49 variables listadas en la tabla 3.

Tabla 3. Lista de variables identificadas.

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
1	Ambiental	Recursos Naturales	RN	En el marco de las energías renovables, los recursos naturales son a aquellos elementos de la naturaleza que se pueden

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				utilizar para producir energía sin agotarlos. Los recursos naturales son una variable crítica en la generación de energía renovable, ya que su disponibilidad y calidad pueden afectar la eficiencia y la cantidad de energía producida.
2	Ambiental	Eficiencia Energética	EE	La eficiencia energética se refiere a la relación entre la cantidad de energía utilizada para realizar una determinada tarea o actividad y la cantidad de energía realmente necesaria para llevar a cabo esa tarea o actividad de manera óptima
3	Ambiental	Cambio Climático	CC	El cambio climático es un fenómeno global que se refiere al aumento de la temperatura promedio de la Tierra, causado principalmente por la actividad humana. Este aumento de temperatura puede tener graves consecuencias para el medio ambiente y la vida humana, incluyendo el aumento del nivel del mar,

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				la intensificación de eventos climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad. La energía fotovoltaica es una fuente de energía renovable y limpia que puede ayudar a mitigar los impactos del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Al proporcionar acceso a energía limpia y asequible, la energía fotovoltaica puede mejorar la calidad de vida de las comunidades y reducir su dependencia de fuentes de energía más contaminantes. La ubicación geográfica también es un factor clave en la relación entre el cambio climático y la energía fotovoltaica. Las áreas con mayor cantidad de radiación solar son más adecuadas para la generación de energía fotovoltaica y, por lo tanto, pueden contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al aumentar la cantidad de energía

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				renovable disponible. La inversión y la innovación en tecnologías de energía fotovoltaica también pueden ayudar a reducir los costos de la energía renovable y aumentar su accesibilidad, lo que puede fomentar la adopción de fuentes de energía más limpias y ayudar a mitigar los impactos del cambio climático.
4	Ambiental	Impacto Ambiental	IA	Es el resultado de una actividad humana que genera un efecto sobre el medio ambiente que supone una ruptura del equilibrio ambiental En el marco de la energía fotovoltaica, el impacto ambiental se refiere a los efectos positivos y negativos que la producción, instalación y uso de energía fotovoltaica pueden tener en el medio ambiente, incluyendo la reducción de emisiones de

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				gases de efecto invernadero y la generación de residuos tóxicos
5	Ambiental	Ciudades y Comunidades Sostenibles	CCS	Es uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en su Agenda 2030. Este objetivo (ODS 11) tiene como objetivo garantizar que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, busca garantizar un desarrollo urbano inclusivo y sostenible que promueva la calidad de vida de todos los habitantes de una ciudad o comunidad.
6	Tecnológica	Tecnología para la generación de energía fotovoltaica	TGEF	Conjunto de técnicas, procesos y equipos utilizados para producir energía fotovoltaica a partir de la fuente solar. Esta tecnología tiene como objetivo reducir la dependencia de combustibles fósiles y contribuir a la mitigación del

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				cambio climático. La tecnología utilizada para la generación de energía renovable es importante, ya que afecta la eficiencia, el costo y la disponibilidad de la energía.
7	Tecnológica	Tecnología fotovoltaica	TF	La tecnología utilizada para la generación de energía fotovoltaica es importante, ya que afecta la eficiencia, el costo y la disponibilidad de la energía.
8	Tecnológica	Reguladores de carga	RC	Los reguladores de carga son dispositivos que controlan la cantidad de energía que fluye entre los paneles solares y las baterías para evitar daños a las baterías y optimizar el rendimiento del sistema.
9	Tecnológica	Monitorización del sistema solar fotovoltaico	MSSF	La monitorización del sistema solar fotovoltaico permite medir la generación de energía y el consumo de energía en tiempo real, lo que ayuda a identificar cualquier problema y a optimizar el rendimiento del sistema.

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
10	Tecnológica	Paneles solares	PS	Los paneles solares fotovoltaicos son el elemento clave de la generación de energía fotovoltaica. Están compuestos de células solares que convierten la energía de la luz solar en electricidad.
11	Tecnológica	Sistema de seguimiento solar	SSS	Un sistema de seguimiento solar puede ayudar a maximizar la eficiencia de los paneles solares al seguir el movimiento del sol a lo largo del día. Los sistemas de seguimiento pueden ser costosos, pero pueden ser especialmente efectivos en áreas con altas tasas de irradiación solar.
12	Tecnológica	Escalabilidad	E	La escalabilidad energética se refiere a la capacidad de un sistema energético para adaptarse y crecer de manera eficiente y sostenible en función de las necesidades y demandas cambiantes.
13	Tecnológica	Viabilidad técnica	VT	La viabilidad técnica se refiere a la posibilidad y factibilidad de llevar a cabo un proyecto o actividad con los recursos

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				y tecnologías disponibles, y en función de las exigencias y requerimientos técnicos necesarios para su ejecución.
14	Tecnológica	Investigación y desarrollo	IV	La investigación y desarrollo de energías renovables se refiere a la búsqueda y aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos para el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos que permitan aprovechar de manera más eficiente y sostenible las fuentes de energía renovable, tales como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa, entre otras.
15	Tecnológica	Incremento en la flexibilidad del sistema	IFS	Se refiere a la capacidad de un sistema energético para adaptarse y responder de manera rápida y efectiva a los cambios en la oferta y la demanda de energía, así como a los cambios en las condiciones del mercado energético. Esto incluye la capacidad de aumentar o disminuir la

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				producción de energía en respuesta a las fluctuaciones de la demanda, así como la capacidad de integrar fuentes de energía renovable intermitentes y otras tecnologías de energía distribuida.
16	Sociocultural	Conciencia pública	CP	La conciencia pública en el marco de las energías renovables es el nivel de conocimiento, comprensión y apoyo que la sociedad tiene sobre el uso de las fuentes de energía renovable y puede influir en la implementación de políticas y programas relacionados con las energías renovables.
17	Sociocultural	Resistencia al cambio	RC	Se denomina resistencia al cambio a todas aquellas situaciones en las cuales las personas deben modificar ciertas rutinas o hábitos de vida o profesionales, pero se niegan por miedo o dificultad a realizar algo nuevo o diferente

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
18	Sociocultural	Aceptación social	AS	Se refiere a la disposición y aceptación por parte de la población y las comunidades locales para utilizar fuentes de energía renovable en lugar de combustibles fósiles.
19	Sociocultural	Participación de grupos de interés	PGI	La participación de grupos de interés en proyectos de energías renovables se refiere a la inclusión activa y significativa de individuos y organizaciones que están afectados por, o tienen un interés en, el desarrollo de proyectos de energía renovable.
20	Sociocultural	Comunidades energéticas verdes	CEV	Las comunidades energéticas verdes son grupos de personas que se unen para producir, consumir y compartir energía renovable de forma colectiva y sostenible en una comunidad determinada. Estas comunidades están impulsadas por la idea de democratizar la energía y reducir su

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				dependencia de fuentes de energía convencionales y contaminantes.
21	Sociocultural	Impacto en la comunidad	IC	La medición del impacto en la comunidad de proyectos de energías renovables puede ser un proceso complejo y multifacético que puede implicar la evaluación de variables socioeconómicas, ambientales y técnicas a lo largo del ciclo de vida del proyecto.
22	Sociocultural	Empleo y desempleo	ED	Empleo se refiere a la situación en la que una persona tiene un trabajo remunerado, ya sea como empleado o como trabajador autónomo, y realiza actividades productivas para una empresa, organización o para sí mismo. El desempleo se refiere a la situación en la que una persona en edad laboral no tiene trabajo y está buscando empleo activamente.

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
23	Sociocultural	Energía asequible y no contaminante	EAC	Es uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en su Agenda 2030. Este objetivo (ODS 7) tiene como objetivo garantizar el acceso a una energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos, al mismo tiempo que se reduce el impacto ambiental de la producción y el consumo de energía. La energía asequible y no contaminante implica el acceso a fuentes de energía que sean económicamente accesibles, ambientalmente sostenibles y socialmente justas.
24	Sociocultural	Participación en proyectos de investigación	PPI	Se refiere a la colaboración activa de un individuo o un grupo en la realización de una investigación. Esto puede incluir la contribución en cualquier etapa del proceso de investigación, desde la

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				planificación hasta la publicación de los resultados.
25	Económica	Costo de generación de energía fotovoltaica	CGEF	Se refiere al costo total de producción de energía fotovoltaica, incluyendo los costos de inversión, operación y mantenimiento. El costo varía según el tipo de tecnología utilizada y su ubicación geográfica. El costo de la generación de energía renovable puede afectar la viabilidad y la adopción de esta fuente de energía.
26	Económica	Producción de nueva energía	PNER	Se refiere al proceso de generar energía a partir de fuentes renovables y limpias, que no emiten dióxido de carbono ni otros gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Se refiere al proceso de generar energía a partir de fuentes renovables y limpias, que no emiten dióxido de carbono ni

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				otros gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático.
27	Mercado	Disponibilidad de financiamiento	DF	La disponibilidad de financiamiento se refiere a la cantidad y la accesibilidad de recursos financieros que están disponibles para ser utilizados en un proyecto o una actividad específica. Esto puede incluir el dinero disponible a través de préstamos, subvenciones, inversiones, crowdfunding, entre otros. La disponibilidad de financiamiento para la generación de energía renovable puede afectar la capacidad de las empresas y los individuos para invertir en esta fuente de energía.
28	Mercado	Costos de inversión	CI	El costo de inversión en proyectos de energía renovable se refiere al gasto inicial necesario para diseñar, construir e implementar una instalación de energía renovable.

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				El costo de inversión incluye los gastos en los equipos y materiales necesarios para la instalación, los costos de la mano de obra, los costos de transporte y los costos asociados con los permisos y la documentación necesarios para la construcción.
29	Mercado	Demanda de Energía Renovable	DER	La demanda de energía renovable se refiere a la cantidad de energía renovable que se necesita para satisfacer las necesidades energéticas de una determinada región, país o sector económico.
30	Mercado	Competencia	C	Desde el punto de vista del mercado de las energías renovables, la competencia se refiere a la rivalidad entre los diferentes proveedores de energías renovables para captar una mayor participación en el mercado y atraer a los consumidores. La competencia en el

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				mercado de las energías renovables puede ser influenciada por varios factores, como los precios de los combustibles fósiles, las políticas gubernamentales, la tecnología y la disponibilidad de recursos.
31	Política y Regulatoria	Impuestos Legales	IL	Tributo, carga fiscal o prestaciones en dinero y/o especie que fija la ley con carácter general y obligatorio a cargo de personas físicas y morales para cubrir los gastos públicos.
32	Política y Regulatoria	Política energética	PE	Se comprende a la política energética como el conjunto de medidas, decisiones y estrategias que un país, gobierno o entidad adopta para administrar y regular el suministro, producción, distribución, consumo y uso de energía en su territorio. Por tanto, esta establece los objetivos y estrategias para el sector energético.

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				Mediante la normatividad, establece las reglas y requisitos para garantizar que se alcancen estos objetivos de manera efectiva y responsable. La política energética del gobierno puede afectar la inversión y el apoyo a la generación de energía renovable, y puede tener un impacto en la adopción y el uso de estas fuentes de energía.
33	Política y Regulatoria	Regulación ambiental	R	La regulación ambiental se refiere al conjunto de leyes, políticas y normativas que buscan proteger el medio ambiente y la salud humana al establecer estándares y límites para la emisión de contaminantes y la gestión de residuos. La regulación ambiental puede promover la adopción de energía fotovoltaica al establecer incentivos y políticas que fomenten la generación de energía

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				renovable y reduzcan la dependencia de combustibles fósiles.
34	Política y Regulatoria	Apoyo institucional	AI	Se refiere al respaldo que proporcionan las instituciones, como gobiernos, organismos públicos, organizaciones no gubernamentales, instituciones financieras, entre otros, para promover una determinada iniciativa, política o programa. En el contexto de la energía y el medio ambiente, el apoyo institucional puede ser fundamental para fomentar la inversión y la adopción de tecnologías y prácticas sostenibles, así como para establecer marcos regulatorios y de políticas que promuevan la transición hacia un modelo de desarrollo más sostenible.
35	Política y Regulatoria	Incentivos	I	Son estímulos, recompensas o beneficios que se otorgan a una persona, empresa u

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				organización con el fin de motivar o impulsar la realización de una determinada acción o comportamiento deseado. En el contexto de la energía y el medio ambiente, los incentivos pueden ser herramientas efectivas para promover la adopción de tecnologías y prácticas más sostenibles.
36	Geográfica	Ubicación geográfica	UG	La ubicación geográfica en el marco de la energía fotovoltaica se refiere a la localización física de los sistemas de energía solar fotovoltaica, es decir, la ubicación geográfica en la que se instalan los paneles solares para generar electricidad a partir de la radiación solar. La ubicación geográfica es un factor clave a considerar en la planificación e implementación de proyectos de energía fotovoltaica, ya que la cantidad de radiación solar que llega a la superficie

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				terrestre varía según la ubicación geográfica y las condiciones climáticas locales.
37	Geográfica	Radiación solar	RS	La radiación solar es una variable crítica en la generación de energía fotovoltaica, ya que su intensidad y duración afectan la cantidad de energía producida.
38	Geográfica	Infraestructura	I	Conjunto de medios técnicos, servicios e instalaciones necesarios para el desarrollo de una actividad o para que un lugar pueda ser utilizado.
39	Técnico-Operativa	Acceso a la red eléctrica	ARE	El acceso a la red eléctrica se refiere a la posibilidad de conectar un sistema de generación de energía a la red de distribución de electricidad existente, lo que permite la transferencia de energía entre el generador y los consumidores. El acceso a la red eléctrica es crucial para la energía fotovoltaica, ya que permite

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				que la energía generada por los paneles solares sea inyectada a la red y distribuida a los consumidores. Sin acceso a la red eléctrica, la energía solar sólo podría ser utilizada en sistemas aislados y no podría ser compartida con otros usuarios. Por tanto, el acceso a la red eléctrica puede afectar la escalabilidad, la capacidad de la energía renovable para integrarse y suministrar energía a la red
40	Técnico-Operativa	Temperatura ambiente	TA	La temperatura ambiente puede afectar la eficiencia de los paneles solares y, por lo tanto, la cantidad de energía producida.
41	Técnico-Operativa	Mantenimiento de paneles solares	MPS	El mantenimiento adecuado de los paneles solares es importante para asegurar su eficiencia y vida útil.
42	Técnico-Operativa	Nueva transmisión	NT	Se refiere a una red eléctrica moderna y avanzada que utiliza tecnologías de transmisión y distribución de energía más

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				eficientes, confiables y flexibles. En esencia, se trata de un sistema eléctrico que se ha actualizado y mejorado para satisfacer las necesidades actuales y futuras de la generación y el consumo de energía.
43	Técnico-Operativa	Planificación para un futuro con altos niveles de energía renovable	PFANER	Es un proceso de diseño y planificación que busca lograr un sistema energético sostenible, con una alta proporción de fuentes de energía renovable. Esto implica desarrollar estrategias y políticas que permitan la integración de energías renovables en la red eléctrica, a través de medidas como la inversión en infraestructuras de energía renovable, la implementación de incentivos y regulaciones, y la promoción de la innovación tecnológica.

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
44	Técnico-Operativa	Disponibilidad de recursos renovables	DRR	La disponibilidad de recursos naturales se refiere a la cantidad y calidad de los recursos naturales que están disponibles para su uso por parte de los seres humanos en un momento dado. Los recursos naturales son aquellos que se encuentran en la naturaleza y que son utilizados por los seres humanos para satisfacer sus necesidades y deseos
45	Técnico-Operativa	Potencial energético	POE	El potencial energético se refiere a la cantidad de energía que se puede generar o producir a partir de un determinado recurso energético. Este potencial puede ser evaluado a través de diversas técnicas de medición y análisis, y es utilizado para determinar la viabilidad y rentabilidad de diferentes proyectos energéticos.
46	Técnico-Operativa	Energía fotovoltaica	EF	Se refiere a la energía que se genera a partir de la luz solar. Se puede obtener a través de paneles solares fotovoltaicos

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				que convierten la energía del sol en electricidad, o mediante la tecnología de concentración solar que utiliza espejos para concentrar la luz solar en un punto y producir calor.
47	Técnico-Operativa	Seguridad energética	SE	Se refiere a la capacidad de un país o región para garantizar un suministro confiable y sostenible de energía para satisfacer sus necesidades económicas y sociales. La seguridad energética implica asegurar que la energía esté disponible de manera constante y a precios asequibles, y que la producción, distribución y consumo de la energía sean seguros y sostenibles a largo plazo.
48	Técnico-Operativa	Demanda eléctrica	DE	Es la cantidad de energía eléctrica que los consumidores necesitan en un momento determinado. Se mide en kilovatios (kW) o megavatios (MW) y representa la carga eléctrica que se requiere en un sistema de

No.	Dimensión	Nombre	Nombre corto	Descripción
				suministro de energía eléctrica en un momento dado.
49	Técnico-Operativa	Información sobre generación de energía solar	IGES	Acceso a base de datos es una colección de información que está organizada de manera que se pueda acceder, administrar y actualizar fácilmente. Las bases de datos informáticas suelen contener conjuntos de registros o archivos de datos, que contienen información sobre transacciones de ventas o interacciones con clientes específicos

Elaboración propia de los autores, 2024.

Diagrama de afinidad.

El diagrama de afinidad es una herramienta de resolución de problemas que se utiliza para organizar y clasificar grandes cantidades de ideas o datos. Esta técnica fue desarrollada por Jiro Kawakita en la década de 1960 en Japón, y se basa en la idea de que las personas pueden trabajar mejor en equipo para agrupar y organizar sus pensamientos.

Para la aplicación del diagrama de la herramienta, se utiliza la plataforma miro (miro.com) en donde cada idea se escribe en una nota adhesiva y se ubica en el plano de manera aleatoria.

Este diagrama de afinidad se construyó a través de un proceso colaborativo que involucró a diversos actores clave vinculados al desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca. Entre los participantes se incluyeron representantes gubernamentales, como funcionarios del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), quienes aportaron perspectivas normativas y ambientales; académicos de universidades y centros de investigación, que proporcionaron fundamentos técnicos y metodológicos; empresas del sector energético, que contribuyeron con su experiencia práctica en la implementación de tecnologías solares; líderes comunitarios y ONGs ambientales, que representaron las inquietudes y prioridades sociales y ambientales de las comunidades locales; y entidades financieras, que evaluaron los aspectos económicos relacionados con la viabilidad de los proyectos.

El proceso consistió en la agrupación de ideas generadas durante talleres participativos, organizando conceptos similares en categorías que reflejaran las dinámicas principales del sistema. Posteriormente, el diagrama fue validado mediante una revisión integral, donde los mismos actores iniciales, complementados por expertos en prospectiva, evaluaron la coherencia y relevancia de las categorías identificadas. Representantes de la sociedad civil participaron en la validación final, asegurando que el diagrama reflejara fielmente las perspectivas locales y los desafíos específicos de la región. Este enfoque permitió consolidar un diagnóstico claro y estructurado, integrando aspectos técnicos, sociales y económicos para orientar las fases posteriores del análisis prospectivo.

Ilustración 2. Diagrama de afinidad



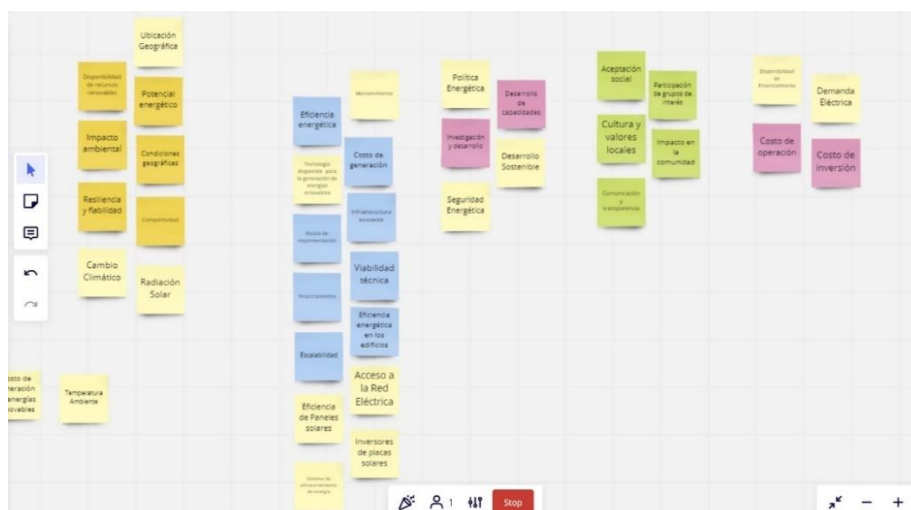
Elaboración propia de los autores, 2024.

A continuación, las tarjetas se agrupan en categorías o grupos de afinidad en función de su relación, similitud o influencia: las variables de igual significado se simplifican a una sola, las variables contenidas en otras se integran dejando la de mayor jerarquía siempre y cuando la integración no signifique eliminar una variable causal y la eliminación de variables de influencia nula que consistió en borrar del tablero aquellas que definitivamente no tenían relación con el problema. Este proceso se repitió varias veces hasta que todas las tarjetas quedaron agrupadas en categorías lógicas o dimensiones.

Logros con el diagrama de afinidad.

El diseño del diagrama de afinidad permitió la clasificación de las variables a través de la simplificación (variables de igual significación, variables contenidas en otras, variables con influencia nula), y la definición de cinco dimensiones: ambiental, técnica, política, cultural y de mercado.

Ilustración 3. Logros con el diagrama de afinidad



Elaboración propia de los autores, 2024.

Categorización.

Una vez identificadas las variables, se han categorizado con el fin de facilitar el proceso de simplificación y su posterior análisis. De este ejercicio surgen por tanto las dimensiones ambientales, técnicas, políticas, culturales y de mercado.

Ilustración 4. Categorización de las variables



Elaboración propia de los autores, 2024

Definición de las categorías o dimensiones.

Dada la extensión de las variables, para proceder con el trabajo se realizó una reducción de las variables de acuerdo con su interacción, impacto y efecto dentro del entorno presente y contemplando el entorno futuro, en este caso, se hace una selección de 19 de las 49 variables disponibles y se agrupan en cinco de las 7 dimensiones previamente abordadas, este ejercicio se realizó con la participación de actores como: representantes gubernamentales, como funcionarios del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), quienes aportaron perspectivas normativas y ambientales; académicos de universidades y centros de

investigación, que proporcionaron fundamentos técnicos y metodológicos; empresas del sector energético, que contribuyeron con su experiencia práctica en la implementación de tecnologías solares; líderes comunitarios y ONGs ambientales, que representaron las inquietudes y prioridades sociales y ambientales de las comunidades locales; y entidades financieras, que evaluaron los aspectos económicos relacionados con la viabilidad de los proyectos. Para lograrlo se realizó:

A. La selección de las variables más relevantes. El criterio utilizado en orden jerárquico fue:

1. Su impacto en el problema.
2. La capacidad para influir en otras variables.
3. Relevancia para los objetivos del análisis

B. Definición de relación entre variables. La definición de la relación parte del principio de similitud de factores y de la contención de variables en otras.

Para el proceso de simplificación de variables, también se aplicó una simplificación de dimensiones, en este sentido, primero se seleccionaron las variables a trabajar y posteriormente se agruparon a las dimensiones correspondientes dada su cercanía, familiaridad o margen de acción, así, la agrupación de variables se da en cinco dimensiones determinadas: ambiental, técnica – tecnológica, política – regulatoria, sociocultural y de mercado, entendiendo que, estas dimensiones abordan de manera integral los diferentes aspectos que determinan la viabilidad, sostenibilidad e impacto de la implementación de esta tecnología.

A. Dimensión ambiental: Se considera importante considerar la dimensión ambiental en el marco de la energía fotovoltaica para identificar y mitigar los impactos

ambientales negativos asociados con su producción y uso. Esto puede incluir la implementación de prácticas de producción más sostenibles, la selección de sitios de instalación adecuados, la gestión adecuada de los residuos generados durante la producción y desmantelamiento, y la implementación de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

B. Dimensión técnica – tecnológica: La dimensión técnica en el marco de la energía fotovoltaica se refiere a los aspectos técnicos relacionados con la producción, instalación y mantenimiento de energía fotovoltaica, incluyendo la tecnología y los materiales utilizados, la eficiencia energética y la capacidad de almacenamiento de energía.

C. Dimensión política – regulatoria: En el marco de la energía fotovoltaica, se refiere a las políticas, regulaciones y marcos legales que influyen en la producción, distribución y uso de la energía fotovoltaica.

La política energética y ambiental es un factor clave en el desarrollo y la adopción de tecnologías de energía renovable como la energía fotovoltaica, ya que puede influir en la inversión, la innovación y la aceptación de estas tecnologías.

D. Dimensión sociocultural: En el marco de la energía fotovoltaica, se refiere a los valores, creencias, actitudes y comportamientos de las personas y las comunidades en relación con la producción y uso de la energía fotovoltaica. La cultura es un factor importante para considerar en el desarrollo y adopción de tecnologías de energía renovable como la energía fotovoltaica, ya que puede influir en la aceptación y el uso de estas tecnologías.

E. Dimensión de mercado: Se refiere a los aspectos económicos y de mercado relacionados con la producción, comercialización y distribución de energía fotovoltaica y la energía fotovoltaica generada.

Esto incluye factores como los costos de producción, los precios de venta, la demanda del mercado, la competencia y las estrategias de marketing y promoción de las empresas.

La dimensión mercado es fundamental para el desarrollo y la adopción de la energía fotovoltaica, ya que influye en la accesibilidad y la viabilidad económica de esta tecnología.

Matriz de variables concertadas por dimensión.

Luego del proceso bibliométrico (revisión de distintos documentos, revistas, planes de gestión y bases de datos) y distintas discusiones con diferentes actores respecto a una concertación de los factores incidentes en el actual estado de la Energía fotovoltaica en el Valle del Cauca y que deben ser impactados si se busca transformar el territorio a futuro, la tabla 4 presenta las variables concertadas para el desarrollo de la investigación.

Tabla 4. Matriz de variables concertadas

SISTEMAS	ABREVIATURA	VARIABLES CLAVES
AMBIENTAL	RN	Recursos Renovables
	CC	Cambio Climático
	IA	Impacto Ambiental
	POE	Potencial Energético
TÉCNICA – TECNOLÓGICA	EE	Eficiencia Energética
	E	Escalabilidad
	VT	Viabilidad Técnica
	TDGE	Tecnología disponible para la generación de energías renovables
POLÍTICA – REGULATORIAS	PE	Política Energética
	IV	Investigación y Desarrollo
	SE	Seguridad Energética
	AS	Aceptación Social
	CEV	Comunidades Energéticas Verdes
SOCIOCULTURAL	PGI	Participación de Grupos de Interés
	IC	Impacto en la Comunidad
	DER	Demanda de Energía Renovable
	DF	Disponibilidad de Financiamiento
MERCADO	CI	Costo de Inversión
	C	Competencia

Elaboración propia de los autores, 2024.

Ahora bien, la tabla 5 presenta todas las variables desestimadas a lo largo de la clasificación.

Tabla 5. Variables desestimadas en el proceso de clasificación de variables

Número	Variable	Abreviación
1	Ciudades y Comunidades Sostenibles	CCS
2	Tecnología fotovoltaica	TF
3	Reguladores de carga	RC
4	Monitorización del sistema solar fotovoltaico	MSS
5	Paneles solares	PS
6	Sistema de seguimiento solar	SSS
7	Incremento en la flexibilidad del sistema	IFS
8	Conciencia pública	CP
9	Resistencia al cambio	RC
10	Empleo y desempleo	ED
11	Energía asequible y no contaminante	EAC
12	Participación en proyectos de investigación	PPI
13	Costo de generación de energía fotovoltaica	CGEF
14	Producción de nueva energía	PNE
15	Impuestos Legales	EL
16	Regulación ambiental	RA
17	Apoyo institucional	AI
18	Incentivos	I

19	Ubicación geográfica	UG
20	Radiación solar	RS
21	Infraestructura	I
22	Acceso a la red eléctrica	ARE
23	Temperatura ambiente	TA
24	Mantenimiento de paneles solares	MPS
25	Nueva transmisión	NT
26	Planificación para un futuro con altos niveles de energía renovable	PFANER
27	Información sobre generación de energía solar	IGE
28	Disponibilidad de recursos renovables	DRR
29	Tecnología para la generación de energía fotovoltaica	TGER
30	Energía fotovoltaica	EF

Elaboración propia de los autores, 2024.

CAPÍTULO IV.

Resultados de la Fase 3: Construcción del Futuro Deseable.

Matriz de impactos cruzados.

Definidas las variables, se aplicó una consulta a los expertos (*representantes gubernamentales, como funcionarios del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), quienes aportaron perspectivas normativas y ambientales; académicos de universidades y centros de investigación, que proporcionaron fundamentos técnicos y metodológicos; empresas del sector energético, que contribuyeron con su experiencia práctica en la implementación de tecnologías solares; líderes comunitarios y ONGs ambientales, que representaron las inquietudes y prioridades sociales y ambientales de las comunidades locales; y entidades financieras, que evaluaron los aspectos económicos relacionados con la viabilidad de los proyectos*) con el objetivo de evaluar las variables utilizando un esquema de calificación basado en la siguiente escala; es importante mencionar que, el uso de esta escala se consensuó mediante revisión, evaluación, votación y observación de la totalidad de los participantes dada la facilidad de interacción, uso y versatilidad de los mecanismos para indicar y enmarcar de forma simple la información relevante.

- 0: No influye: significa que no hay influencia directa de una variable sobre otra.
- 1: Influencia Débil: cambios poco importantes, su influencia es mínima.

- 2: Influencia Media: la influencia es considerable, pero no fuerte; señala algunos aspectos que pueden ser tenidos en cuenta al momento de realizar el análisis del comportamiento.
- 3: Influencia Fuerte: son variables que deben ser tenidas en cuenta particularmente al momento del análisis, ya que muestran cuáles son aquellas que pueden incidir en el futuro del sistema.
- P: Influencia Potencial: desafíos hacia futuro que no se tienen en cuenta en el estudio que se realiza y que en el presente no se dominan.

Con base en los valores establecidos, cada uno de los expertos asignó una calificación a las variables entendiendo que, son estos quienes determinan la motricidad que cada factor ejerce sobre los demás; y que, la dependencia surge de manera automática una vez se ha determinado la motricidad según lo que se puede ver en los resultados arrojados por el software Mic Mac respecto del cruce de variables ubicados en la tabla 6.

Al respecto del software Mic Mac es necesario destacar que, este es una herramienta de análisis prospectivo creada para identificar factores clave en sistemas complejos. Utiliza matrices de impactos cruzados para evaluar la influencia y dependencia de variables, clasificándolas en determinantes, dependientes, autónomas o reguladoras. Su uso es ampliamente aplicado en planificación estratégica y estudios de futuro en sectores como energía, salud y tecnología, permitiendo tomar decisiones informadas y diseñar estrategias más efectivas (Godet, 2007).

Tabla 6. Matriz de impactos cruzados - Mic Mac

		1: D	2: C	3: IA	4: P	5: E	6: E	7: V	8: T	9: P	10: I	11:	12:	13:	14:	15: I	16:	17:	18:	19:
►	1: DRR	0	3	3	3	3	3	3	2	2	3	1	3	2	2	2	P	P	P	P
	2: CC	3	0	3	3	P	3	P	3	P	P	P	2	2	2	3	3	3	2	2
	3: IA	3	1	0	1	1	1	2	1	1	3	P	P	3	3	P	2	1	1	1
	4: POE	2	0	2	0	P	3	P	3	3	P	2	2	3	2	3	3	P	P	P
	5: EE	2	0	3	0	0	3	P	P	3	3	3	3	2	2	3	P	P	P	3
	6: E	0	0	3	0	1	0	1	1	3	3	3	2	3	3	3	1	3	3	3
	7: VT	0	1	2	1	3	3	0	P	3	P	3	2	2	3	3	2	3	P	P
	8: TDGE	0	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	2	3	3	3	1	3	3	3
	9: PE	1	P	P	1	2	3	2	3	0	3	P	3	2	3	3	1	3	1	1
	10: IV	2	3	3	3	3	3	3	P	1	0	3	2	2	2	3	2	2	2	2
	11: SE	3	3	3	2	3	2	3	3	P	3	0	3	3	3	3	1	2	2	3
	12: AS	3	2	2	0	0	2	0	1	3	3	3	0	P	P	P	3	1	3	1
	13: CEV	2	3	3	1	1	2	1	3	3	3	3	3	0	3	3	1	2	1	1
	14: PGI	3	3	3	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	0	3	1	1	1	0
	15: IC	1	2	3	0	0	3	1	0	P	3	P	3	3	3	0	1	3	3	3
	16: DER	1	3	3	P	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	2	3
	17: DF	0	1	1	1	1	3	3	P	0	3	P	3	3	3	3	3	0	3	3
	18: CI	1	0	2	3	3	3	3	P	2	3	1	3	3	3	3	1	P	0	3
	19: C	0	3	3	3	P	P	0	3	P	3	3	1	2	3	2	0	P	P	0

Elaboración propia de los autores - Fuente MICMAC, 2024.

El consenso requerido para la calificación de la Matriz de Impactos Cruzados (MICMAC) fue alcanzado mediante un enfoque metodológico que incorporó la participación de actores clave y expertos técnicos en el ámbito energético del Valle del Cauca. Este proceso se estructuró en fases progresivas que garantizaron la validez técnica y el carácter multidimensional del análisis.

En primer lugar, se realizó una identificación estratégica de los participantes, seleccionando expertos provenientes de diversos sectores, incluidos investigadores académicos especializados en energías renovables, formuladores de políticas públicas, representantes del sector privado energético, líderes comunitarios, y consultores con experiencia en modelos de análisis prospectivo. Este enfoque garantizó que el proceso incorporara conocimientos técnicos, consideraciones sociales y perspectivas políticas.

La primera etapa consistió en una contextualización exhaustiva de las variables del sistema, en la que los facilitadores proporcionaron una definición técnica y su relación con el sistema energético analizado. Este marco teórico inicial permitió alinear los conceptos clave y asegurar que los participantes comprendieran plenamente las interdependencias entre las variables.

Posteriormente, se desarrollaron talleres participativos guiados por un enfoque dialógico y deliberativo. Durante estas sesiones, los participantes analizaron y calificaron las interrelaciones de impacto entre las variables, diferenciando entre impactos directos e indirectos y ponderando su magnitud. Los moderadores emplearon técnicas de facilitación avanzada para fomentar una discusión técnica orientada al consenso y para abordar las discrepancias mediante argumentación fundamentada.

En los casos donde las divergencias en las calificaciones persistieron, se implementaron herramientas como el método Delphi, permitiendo la refinación iterativa de las puntuaciones y una convergencia gradual hacia acuerdos robustos. Adicionalmente, se realizaron diferentes simulaciones y validaciones preliminares con los resultados obtenidos asegurando la coherencia técnica de la matriz.

Finalmente, la matriz preliminar fue presentada para una validación final en una sesión plenaria, donde se integraron ajustes derivados de retroalimentación técnica. Este proceso culminó con la consolidación de una matriz concertada que reflejaba tanto la robustez metodológica como el compromiso intersectorial, contribuyendo al rigor y la legitimidad del análisis prospectivo desarrollado.

El gráfico 1 presenta la identificación y posicionamiento de las variables de acuerdo con el comportamiento de motricidad y dependencia correspondiente a cada una.

[illegible]

Los resultados de la categorización de variables fueron validados mediante un proceso de consulta con actores clave y expertos del sector energético. Esta validación incluyó la participación de autoridades gubernamentales, expertos en energía renovable, representantes del sector privado, y miembros de comunidades locales, quienes aportaron su conocimiento tanto técnico como contextual sobre el sector energético del Valle del Cauca.

134

calificaciones y se corroboró la consistencia de las relaciones entre las variables, asegurando que el posicionamiento de cada una reflejara adecuadamente las dinámicas locales y las perspectivas regionales.

En este sentido, no se requirieron ajustes en las calificaciones iniciales, dado que los expertos coinciden en que las relaciones y dependencias de las variables son representaciones precisas de las condiciones actuales del sector energético. La validación del gráfico no solo confirma la veracidad de los resultados obtenidos, sino que también posiciona este análisis como una herramienta valiosa para la planificación estratégica en la transición hacia la energía fotovoltaica en la región.

Por otra parte, en concordancia con el análisis gráfico presentado, se evidencia una organización de variables en diferentes zonas, esta distribución fue validada mediante consulta abierta con los diferentes expertos participantes, frente a ello, no se realizaron apreciaciones negativas ni se tuvo que modificar ninguna calificación; así, los resultados obtenidos muestran que cada variables se encuentra caracterizada por un grado de influencia y dependencia dentro del sistema energético:

Zona de poder (Cuadrante superior izquierdo).

En esta zona, se encuentran las variables con alta influencia y baja dependencia. Estas son las variables estratégicas, ya que tienen un impacto fuerte en el sistema, pero dependen poco de otras. Estas variables son claves para el sistema, ya que tienen el poder de cambiar el escenario, sobre estas variables se requiere establecer mecanismos de gobernanza para evitar que la baja gobernabilidad (dependencia) de las mismas no afecte el sistema en general y, por tanto, deben ser monitoreadas y gestionadas con atención.

- DER: Demanda de Energías Renovables.
- TDGE: Tecnología disponible para la generación de energías renovables.
- SE: Seguridad Energética.
- CI: Costo de Inversión.

Zona de conflicto (Cuadrante superior derecho).

Aquí se encuentran variables con alta influencia y alta dependencia. Estas variables son conflictivas o de riesgo, ya que afectan y son afectadas por otras variables, lo que las convierte en elementos inestables o con posibilidad de generar cambios impredecibles, en otras palabras, un cambio a favor permite que la variable mejore su dinámica y contribución al sistema, pero, un cambio negativo hará que la variable genere efectos adversos y el escenario se vea drásticamente afectado por su alto grado de influencia o impacto en otras variables. Estas variables tienen un comportamiento dinámico y crítico, ya que su evolución depende de cómo evolucionen otras variables. Estas deben ser objeto de atención especial en el análisis prospectivo.

- IV: Investigación y Desarrollo.
- PGI: Participación de Grupos de Interés.
- CEV: Comunidades Energéticas Verdes.

Zona de problemas autónomos (Cuadrante inferior izquierdo).

Las variables en esta zona tienen baja influencia y baja dependencia. Son variables autónomas o marginales, ya que su impacto en el sistema es limitado y su relación con otras variables es débil. Estas variables no son críticas para el sistema y su evolución no tendrá un impacto significativo en los escenarios futuros.

- DRR: Disponibilidad de Recursos Renovables.
- VT: Viabilidad Técnica.
- DF: Disponibilidad de Financiamiento.
- CC: Cambio Climático.
- EE: Eficiencia Energética.
- POE: Potencial Energético.
- PE: Política Energética.
- C: Competencia.

Zona de salida (Cuadrante inferior derecho).

Esta zona incluye variables con alta dependencia, pero baja influencia. Estas son variables de salida o resultantes, ya que su comportamiento depende en gran medida de otras variables. Estas variables son el resultado de las dinámicas de otras variables más influyentes, por lo que son importantes para monitorear cómo evolucionan en respuesta a los cambios del sistema.

- E: Escalabilidad.
- IC: Impacto en la Comunidad.
- AS: Aceptación Social.
- IA: Impacto Ambiental.

Ahora bien, de esta exploración se logra concluir que:

Zona de Poder (alta influencia, baja dependencia).

Las variables en esta zona son las más estratégicas porque tienen un fuerte impacto en el sistema, pero son poco afectadas por otras. En el contexto de la energía fotovoltaica,

estas variables son clave para impulsar el cambio en el sistema energético, y su correcta gestión puede determinar el éxito de los escenarios planteados.

Razón para ser trascendentes:

- **Control del sistema:** Estas variables tienen la capacidad de definir el curso del desarrollo energético. Si se gestionan adecuadamente, pueden catalizar el crecimiento de la energía fotovoltaica.
- **Generación de oportunidades:** El dominio de estas variables abre oportunidades para nuevas tecnologías, modelos de negocio o formas de integración de la energía fotovoltaica en la matriz energética.
- **Estabilidad estratégica:** Debido a su baja dependencia, estas variables permiten una planificación más estable, ya que no están tan sujetas a cambios imprevistos provocados por otras variables.

Zona de Conflicto (alta influencia, alta dependencia).

Las variables en esta zona son críticas porque influyen en el sistema, pero también están fuertemente condicionadas por otras variables. Esto genera un alto grado de incertidumbre, ya que cualquier cambio en las dinámicas del sistema puede generar efectos impredecibles. En un estudio sobre el desarrollo de la energía fotovoltaica, estas variables suelen ser más complejas de gestionar, pero son fundamentales para determinar el futuro escenario energético.

Razón para ser trascendentes:

- **Incertidumbre y riesgo:** Las variables en conflicto pueden generar tanto grandes oportunidades como grandes desafíos. Por ejemplo, la fluctuación

de precios del mercado energético, la aceptación social de la energía fotovoltaica o los cambios en la demanda de energía.

- **Interdependencia crítica:** Estas variables dependen de otras (por ejemplo, el **desarrollo tecnológico** depende de la inversión en investigación y del marco regulatorio), por lo que cualquier cambio en ellas puede alterar significativamente el desarrollo del sistema fotovoltaico.
- **Necesidad de monitoreo:** Debido a su influencia y dependencia, estas variables requieren constante monitoreo para adaptar las estrategias conforme cambien las condiciones externas, como regulaciones, precios de los paneles solares o avances en almacenamiento de energía.

Con base en lo anterior, se pudo concluir que tanto la zona de poder como la zona de conflicto son fundamentales para pensar el futuro de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca. Por ende, la construcción de escenarios de futuro debería comprender y abordar de forma prioritaria las variables alojadas en estas zonas (sin desmeritar las demás variables ubicadas en las otras zonas), ya que representan aspectos críticos del sistema energético y ofrecen oportunidades clave para intervenir y mejorar su desarrollo. Abordar estratégicamente estas variables permitirá diseñar políticas y estrategias efectivas para promover un crecimiento energético sostenible, inclusivo y resiliente hacia el horizonte 2034, contribuyendo de manera significativa a la transformación de la matriz energética de la región y al cumplimiento de los compromisos ambientales a nivel nacional.

Diseño de los escenarios de futuro.

El diseño de escenarios de futuro para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca se llevó a cabo utilizando el método de Talleres de Formulación de

Escenarios, un enfoque participativo y estructurado que permitió la integración de múltiples perspectivas y la construcción de diferentes narrativas de futuro. Este método se implementó en cuatro fases clave: preparación, desarrollo de talleres, validación y refinamiento y conclusión.

Fase de preparación

En esta etapa inicial, se definieron los objetivos de los talleres y se establecieron las bases metodológicas. Se identificaron y convocaron actores clave, como expertos en energía renovable, investigadores, representantes gubernamentales y líderes comunitarios, con el propósito de asegurar una diversidad de perspectivas en el análisis. Además, se clasificaron las variables previamente identificadas en las zonas de poder, conflicto, problemas autónomos y salida, empleando criterios de influencia y dependencia. Este marco inicial permitió focalizar los talleres en las variables más estratégicas (zona de poder) y críticas (zona de conflicto), que son fundamentales para la construcción de los escenarios.

Fase de desarrollo de los talleres

El desarrollo de los talleres se estructuró en tres sesiones consecutivas, cada una con objetivos específicos y dinámicas participativas diseñadas para garantizar un análisis detallado de las variables clave y la creación de narrativas de escenarios.

Sesión 1: Discusión y Priorización de Variables

Los participantes se organizaron en grupos interdisciplinarios para analizar las variables clasificadas en las zonas de poder y conflicto. Mediante dinámicas como mapas conceptuales y matrices de priorización, se identificaron las relaciones clave entre las

variables, enfatizando cómo las variables estratégicas interactúan con las críticas y conflictivas. A partir de estas interacciones, se definieron los ejes críticos de incertidumbre que influirían significativamente en el desarrollo futuro del sistema energético.

A continuación, se presentan los cuatro ejes críticos de incertidumbre, seleccionados por su capacidad para influir en los escenarios futuros y su sensibilidad a las dinámicas del sistema energético:

1. **Disponibilidad y Adopción de Tecnología (DAT):** Este eje refleja la incertidumbre sobre el ritmo al que las tecnologías fotovoltaicas avanzadas, como paneles de alta eficiencia y almacenamiento energético, serán accesibles y adoptadas en la región. La variabilidad en su adopción impacta directamente la capacidad de generar energía limpia y accesible.
2. **Inversión y Financiamiento (IF):** La incertidumbre sobre la disponibilidad de recursos financieros para proyectos de energía solar y la estabilidad de incentivos gubernamentales afecta la viabilidad económica de los proyectos. Este eje considera la dependencia de financiamiento externo y la competencia por recursos en un mercado global.
3. **Aceptación Social y Participación Comunitaria (ASP):** Este eje aborda la aceptación de las comunidades locales y su disposición a integrarse en modelos de comunidades energéticas verdes. Factores como la percepción de beneficios económicos y sociales, junto con los niveles de participación en la toma de decisiones, determinan el éxito de las iniciativas.
4. **Impacto de la Regulación y las Políticas Públicas (RPP):** La incertidumbre sobre la implementación de regulaciones favorables, como

incentivos fiscales o marcos normativos que promuevan la energía renovable, influye directamente en el ritmo de transición energética. La estabilidad política y el compromiso del gobierno nacional son elementos clave.

Sesión 2: Proyección de Estados Futuros

Con los ejes de incertidumbre identificados, los grupos desarrollaron combinaciones de posibles estados futuros de las variables estratégicas y críticas. Por ejemplo, se evaluaron escenarios en los que la tecnología disponible para la generación de energías renovables alcanzaba alta eficiencia frente a escenarios de estancamiento tecnológico. Estas combinaciones se analizaron utilizando tableros colaborativos, y se seleccionaron aquellas que ofrecían trayectorias coherentes y realistas. Cada combinación fue convertida en una narrativa preliminar de escenario, con descripciones detalladas de los resultados esperados en términos de impacto ambiental, social y económico.

Sesión 3: Construcción de Narrativas

Durante esta sesión, las narrativas preliminares se refinaron colectivamente para generar los cuatro escenarios finales: óptimo, tendencial, apuesta y pesimista. Cada escenario incluyó una descripción detallada de los resultados esperados y las estrategias clave para abordar desafíos y maximizar oportunidades. Con base en lo anterior, a continuación, se presentan las cuatro narrativas o escenarios de futuros generados, cada uno de los cuales presenta una perspectiva única sobre los resultados potenciales, los mismos destacan la importancia de abordar los desafíos actuales y aprovechar las oportunidades para construir un desarrollo más inclusivo, sostenible y próspero en la región.

Escenario Sol Resiliente: Un Valle Brillante hacia el 2034.

El Valle del Cauca se consolida como un **referente nacional e internacional en la adopción de energías renovables**, gracias a la implementación de políticas públicas innovadoras y una inversión estratégica en **investigación y desarrollo**. La **demandas de energías renovables** se cubre en gran parte mediante la integración de sistemas fotovoltaicos, que aportan de manera significativa a la diversificación y sostenibilidad de la matriz energética regional.

El uso de **tecnología avanzada para la generación de energía** permite alcanzar altos niveles de eficiencia mientras se reducen los **costos de inversión**, facilitando la accesibilidad a esta tecnología tanto para grandes proyectos como para aplicaciones comunitarias. Además, la **seguridad energética** está plenamente garantizada, promoviendo un entorno empresarial confiable y estimulando inversiones a largo plazo.

Las **Comunidades Energéticas Verdes** desempeñan un papel central en este escenario, ya que fomentan la **aceptación social** y generan un **impacto positivo en la comunidad**, permitiendo que los beneficios de la transición energética se distribuyan equitativamente entre los habitantes del Valle. La infraestructura modernizada, junto con una planificación estratégica integral, facilita la **escalabilidad** de los sistemas solares, integrando soluciones fotovoltaicas tanto en entornos urbanos como rurales, optimizando así el aprovechamiento del recurso solar en toda la región.

En este contexto, el Valle del Cauca emerge como un **modelo ejemplar de desarrollo energético sostenible**, alineando sus acciones con los compromisos ambientales y económicos establecidos a nivel nacional e internacional. Además, refuerza su

posicionamiento estratégico como líder en la transición energética hacia fuentes limpias y renovables, marcando un camino para otras regiones del país.

Escenario Luz Incierta: Progresos Graduales bajo el Sol.

El Valle del Cauca experimenta avances moderados hacia la adopción de la energía fotovoltaica, pero con limitaciones significativas. Aunque se observa un crecimiento paulatino en la implementación de esta tecnología, factores como el **costo de inversión** y la **disponibilidad de financiamiento** ralentizan su expansión, haciendo que los proyectos se desarrollen de forma desigual. La **tecnología disponible para la generación de energías renovables** presenta mejoras graduales, pero estas no son suficientes para escalar significativamente el uso de sistemas fotovoltaicos en toda la región.

En cuanto a la **seguridad energética**, esta se mantiene en niveles estables, pero sin un avance significativo que permita a la región consolidar una infraestructura resiliente y autosuficiente. La **resistencia al cambio** y la falta de una visión integral dificultan la implementación de iniciativas más disruptivas y ambiciosas. Las **comunidades energéticas verdes** comienzan a consolidarse, aunque su participación es limitada, con proyectos de pequeña escala que todavía no logran un impacto significativo.

Por otra parte, la **investigación y el desarrollo** avanzan de manera aislada, con esfuerzos fragmentados y poca coordinación entre actores clave, como instituciones gubernamentales, empresas privadas y comunidades locales. Esto limita el potencial de innovación y la capacidad de superar barreras técnicas y económicas.

Escenario Horizonte Solar: Energía para Todos.

El Valle del Cauca aprovecha plenamente sus **ventajas estratégicas** y realiza un avance significativo hacia la adopción masiva de la energía fotovoltaica. Las **políticas públicas integrales**, combinadas con **incentivos económicos**, fomentan una colaboración efectiva entre los sectores público y privado, lo que resulta en un aumento considerable de las inversiones en **tecnología para la generación de energías renovables** y en la **escalabilidad** de los proyectos fotovoltaicos.

Por otra parte, la activa **participación de grupos de interés** se establece como eje central y contribuye a la formación de una red de **comunidades energéticas verdes** altamente interconectadas y autosuficientes. La región prioriza la inversión en **investigación y desarrollo**, alcanzando avances tecnológicos significativos que no solo reducen los **costos de inversión**, sino que también mejoran la **eficiencia energética** de los sistemas implementados.

Paralelamente, se desarrollan iniciativas de **capacitación y formación de talento humano**, las cuales resultan esenciales para fortalecer las capacidades locales y garantizar la sostenibilidad del sistema energético en el largo plazo. Este enfoque integral permite al Valle del Cauca experimentar un crecimiento económico robusto, una mejora considerable en la **seguridad energética** y una drástica reducción en su dependencia de los combustibles fósiles.

Como resultado, la región se consolida como un líder indiscutible en energías renovables dentro de Colombia, estableciendo un modelo replicable para otras áreas del país y contribuyendo de manera significativa al cumplimiento de los objetivos nacionales de sostenibilidad energética.

Escenario Sombras del Sol: Oportunidades Perdidas.

En este escenario, los **problemas estructurales** permanecen sin resolverse, limitando significativamente la implementación efectiva de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca. La **falta de inversión en investigación y desarrollo**, junto con la **ausencia de políticas públicas coherentes**, obstaculiza el progreso en la **tecnología disponible para la generación de energías renovables**, lo que dificulta la modernización del sector energético. Además, los **altos costos de inversión** y la **disponibilidad limitada de financiamiento** restringen la adopción de tecnologías fotovoltaicas, resultando en una **baja escalabilidad** del sector y la imposibilidad de expandir proyectos más allá de iniciativas aisladas.

La **seguridad energética** se deteriora debido a la creciente dependencia de fuentes de energía no renovables, mientras que las comunidades locales, excluidas del proceso, muestran una **baja aceptación social** y mínima participación en modelos como las **comunidades energéticas verdes**. Este desinterés comunitario reduce las posibilidades de consolidar una transición energética inclusiva y participativa.

Paralelamente, la dependencia de combustibles fósiles se intensifica, lo que provoca un aumento en los costos de la energía y genera un **impacto ambiental** negativo, agravando los problemas ecológicos de la región. Como consecuencia, el Valle del Cauca enfrenta un estancamiento económico marcado por una **creciente exclusión social** y un **deterioro en la competitividad tecnológica**, posicionándose en desventaja respecto a otras regiones más avanzadas en la transición energética. Este escenario refleja un sistema inmerso en barreras estructurales que dificultan el progreso hacia un modelo energético sostenible y resiliente.

Validación y refinamiento: Proceso de selección y priorización de escenarios.

Identificación de actores

Para el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia el año 2034, se llevó a cabo la identificación de diversos actores en las categorías ambiental, técnica, política, sociocultural y de mercado. Esto se realizará considerando las variables inherentes a cada una de estas dimensiones establecidas.

Ambiental.

Con el objetivo de promover la sostenibilidad ambiental en la región, se identificaron actores involucrados en la preservación ecológica, la regulación y la mitigación de impactos ambientales adversos. Estos actores incluyeron agencias gubernamentales ambientales, organizaciones no gubernamentales dedicadas a la conservación, instituciones de investigación en energía renovable y grupos comunitarios interesados en el equilibrio ecológico del Valle del Cauca.

Tabla 7. Actores de la dimensión ambiental

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
Ambiental	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	MAD	Entidad gubernamental responsable de formular y ejecutar políticas ambientales y de desarrollo sostenible.

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
	Empresas de Energía fotovoltaica	EES	Compañías especializadas en la producción y suministro de energía fotovoltaica.
	ONGs Ambientales	ONG	Organizaciones no gubernamentales dedicadas a la conservación del medio ambiente.
	Centros de Investigación Climática	CIC	Instituciones dedicadas a la investigación del clima y sus variaciones.
	Comunidades Locales	COM	Grupos de personas que residen en áreas cercanas a proyectos energéticos.

Elaboración propia de los autores, 2024.

Técnica.

La dimensión técnica se enfocó en la aplicación, desarrollo y optimización de la infraestructura solar. Se identificaron actores como expertos en energía fotovoltaica, ingenieros especializados en instalaciones fotovoltaicas, proveedores de tecnología solar, y entidades dedicadas a la investigación y desarrollo en el área.

Tabla 8. Actores de la dimensión técnica

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
Técnica	Empresas de Tecnología Solar	ETS	Compañías que desarrollan y comercializan tecnologías para la energía fotovoltaica.
	Universidades / Instituciones Técnicas	UNI	Centros educativos que ofrecen investigación y formación en tecnologías renovables.
	Consultores en Energía	CON	Expertos que brindan asesoría en proyectos de energía.
	Fabricantes de Equipos Fotovoltaicos	FAB	Empresas que producen componentes y energía fotovoltaica.
	Startups de Energía Renovable	STA	Nuevas empresas enfocadas en soluciones innovadoras de energía renovable.

Elaboración propia de los autores, 2024.

Política.

En esta categoría se involucraron entidades con influencia en la formulación y regulación de políticas energéticas y ambientales.

Tabla 9. Actores de la dimensión política

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
Política	Gobierno Nacional	GOB	Autoridades centrales del Estado.
	Organizaciones Internacionales	ORG	Entidades globales que influyen en políticas y prácticas a nivel mundial.
	Empresas de Utilidades Públicas	EUP	Proveedores de servicios de energía a la población.
	Asociaciones Industriales	ASI	Agrupaciones que representan los intereses de la industria.

Elaboración propia de los autores, 2024.

Sociocultural.

Se identificaron actores directamente afectados por la instalación de infraestructuras solares, como comunidades locales, trabajadores del sector, grupos vulnerables, entre otros.

Tabla 10. Actores de la dimensión sociocultural

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
Sociocultural	Medios de Comunicación	MED	Canales y plataformas de información.

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
	Líderes Comunitarios	LID	Representantes y voceros de las comunidades.
	ONGs de Desarrollo Comunitario	ODC	Organizaciones enfocadas en el progreso social y económico de las comunidades.
	Grupos Activistas	ACT	Activistas y movimientos que promueven cambios sociales, ambientales o políticos.
	Educadores y Académicos	EDU	Profesionales de la educación y la investigación académica.

Elaboración propia de los autores, 2024.

Mercado.

Esta dimensión se enfocó en los actores económicos y comerciales involucrados en la producción, distribución, venta y consumo de tecnología solar, así como en la estructura financiera asociada como empresas de energía renovable, fabricantes de paneles solares, distribuidores y proveedores de equipos solares, empresas de servicios energéticos, consumidores y usuarios finales, entidades financieras, reguladores y agencias gubernamentales, políticas y regulaciones que impactan el mercado de la energía fotovoltaica, incluyendo incentivos fiscales y tarifas y Asociaciones comerciales.

Tabla 11. Actores de la dimensión de mercado

Dimensión	Actor	Nombre corto	Descripción
Mercado	Empresas de Energía Renovable	EER	Compañías que generan energía a partir de fuentes renovables.
	Instituciones Financieras	INF	Bancos y entidades de crédito que financian proyectos.
	Inversores Privados	INV	Individuos o grupos que invierten en proyectos de energía.
	Empresas Constructoras	EC	Empresas que se especializan en la construcción de infraestructura energética.
	Reguladores del Mercado	REG	Organismos que supervisan y regulan el mercado energético.

Elaboración propia de los autores, 2024.

Clasificación de actores claves.

Para el desarrollo de la selección y priorización de escenarios en el desarrollo de la energía fotovoltaica en el Valle del Cauca, se planteó realizó una clasificación y asignación de los actores clave con relación a sus dimensiones y a su vez, se implementó una evaluación que integró las variables estratégicas y la participación e influencia de los actores clave en el sistema. Este proceso tuvo como objetivo maximizar las oportunidades y

reducir los riesgos además de, permitir el posicionamiento del escenario apuesta como la alternativa más viable y deseada para la región.

Tabla 12. Clasificación de actores participantes - priorización y selección de escenarios

Clasificación de actores	
Temática	Cargo
Ambientales	Asesor del Ministerio de Ambiente
	Profesional Especializado Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC
	Líder proyectos fotovoltaicos
	Ingeniero Civil
Técnicos	Ing. Electricista
	Maestría en el área de energía, enfocada en la optimización de sistemas térmicos, cogeneración, poli generación
	Líder socioambiental generación operación
	Docente secretaria de Educación del Valle
	Ingeniero de energía fotovoltaica
	Ingeniero Senior Sistemas FV CELSIA
	Coordinador técnico CIDARE

Clasificación de actores	
Temática	Cargo
Políticos	Director Ejecutivo Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía - FENOGE
Sociocultural	Ing. Mecánico - Business Developer
	Consultor publico
	Jefe de Dirección de Cultura Ciudadana y Gestión Social
	Ing civil -esp en estructuras
Mercado	Control Programación y Presupuesto
	Gerente
	Gerente negocio
	Gerente

Elaboración propia de los autores, 2024.

Fase de conclusión o cierre: Priorización y selección del escenario apuesta.

El proceso de selección, priorización y calificación se desarrolló mediante talleres interactivos en los que se involucraron a distintos actores clave provenientes de diversos sectores, tales como: *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Empresas de Energía fotovoltaica, ONGs Ambientales, Centros de Investigación Climática, Comunidades Locales, Empresas de Tecnología Solar, Universidades / Instituciones Técnicas,*

Consultores en Energía, Fabricantes de Equipos Fotovoltaicos, Startups de Energía Renovable, Gobierno Nacional, Organizaciones Internacionales, Empresas de Utilidades Públicas, Grupos de Presión Ambiental, Asociaciones Industriales, Medios de Comunicación, Líderes Comunitarios, ONGs de Desarrollo Comunitario, Grupos Activistas, Educadores y Académicos, Empresas de Energía Renovable, Instituciones Financieras, Inversores Privados, Empresas Constructoras y Reguladores del Mercado.

Estos actores trabajaron bajo el método Delphi simple, un enfoque estructurado que permitió la recopilación de opiniones y consenso a través de diferentes rondas de discusión y votación. Por otra parte, los participantes se comprometieron activamente en la evaluación de cada escenario en función de su viabilidad, deseabilidad y pertinencia para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca, considerando la complejidad socioeconómica, ambiental y administrativa de la región.

Enfoques de Discusión

Para evaluar los escenarios, se definieron cinco criterios clave basados en el trabajo de Montes (2020), los cuales se consideraron esenciales para determinar la viabilidad y deseabilidad de cada escenario: **coherencia estructural, realismo, resiliencia, pertinencia contextual y variedad de opciones**. Estos criterios fueron adaptados para evaluar la adecuación y viabilidad de los escenarios dentro del contexto particular del Valle del Cauca, un territorio con dinámicas socioeconómicas, políticas y ambientales complejas y variadas.

La **coherencia estructural** garantizó que las acciones y eventos propuestos en cada escenario fueran consistentes y sin contradicciones, asegurando que los resultados de cada acción fueran lógicos y alcanzables dentro del marco de planificación. El **realismo** permitió que los escenarios estuvieran fundamentados en evidencias y tendencias actuales, evitando

proyecciones extremas. La **resiliencia** evaluó la capacidad de adaptación de los escenarios ante imprevistos, mientras que la **pertinencia contextual** aseguraba que los escenarios respondieran adecuadamente a las necesidades del territorio, ajustándose a los valores y prioridades de los actores involucrados. Finalmente, la **variedad de opciones** permitió que los escenarios contemplaran múltiples alternativas, fomentando una visión amplia del futuro.

Adicionalmente, se definieron cinco criterios adicionales más específicos para la evaluación de los escenarios, que incluyeron la **probabilidad de materialización**, la **repercusión político-económica**, el **impacto social y económico**, la **factibilidad financiera** y la **relevancia ambiental y cultural**. Estos criterios fueron adoptados para reflejar de manera más directa las particularidades del sistema territorial, caracterizado por su complejidad y singularidad. La **probabilidad de materialización** evaluó la viabilidad práctica de implementar cada escenario, mientras que la **repercusión político-económica** analizó los efectos potenciales de los escenarios en términos de gobernanza y desarrollo económico. El **impacto social y económico** midió los beneficios en la calidad de vida y el desarrollo económico local, mientras que la **factibilidad financiera** evaluó la capacidad de movilizar los recursos necesarios para garantizar la implementación y sostenibilidad de los escenarios a largo plazo. Finalmente, la **relevancia ambiental y cultural** consideró el impacto de cada escenario sobre el entorno natural y las tradiciones culturales del territorio.

Método de Votación

Para la selección del escenario más adecuado, se implementó el **método Delphi simple**, un enfoque estructurado y anónimo que permitió a los participantes emitir sus evaluaciones de manera independiente, reduciendo la posibilidad de sesgos derivados de la

dinámica grupal. Este método se llevó a cabo en varias rondas, permitiendo que los participantes ajustaran sus calificaciones basándose en la retroalimentación recibida de los demás. El objetivo de este procedimiento fue alcanzar un consenso entre los actores clave sobre cuál de los escenarios propuestos era el más viable y adecuado para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en la región.

En cada ronda, se solicitó a los participantes que asignaran calificaciones a cada escenario en función de los cinco criterios clave previamente definidos: **probabilidad de materialización, repercusión político-económica, impacto social y económico, factibilidad financiera y relevancia ambiental y cultural**. Las calificaciones se asignaron utilizando una escala de 1 a 5, donde 1 representaba una baja probabilidad o impacto, y 5 indicaba una alta probabilidad o impacto. Este sistema de puntuación facilitó la comparación entre los diferentes escenarios, permitiendo una evaluación más clara y objetiva de sus fortalezas y debilidades.

Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos de la evaluación de los escenarios reflejan la percepción de los participantes sobre la viabilidad y deseabilidad de cada uno, basada en los criterios previamente establecidos. A continuación, la tabla 13 presentan los resultados de la evaluación de los cuatro escenarios propuestos:

Tabla 13. Aplicación de criterios y evaluación de escenarios.

Escenario	Probabilidad de materialización	Repercusión político-económica	Impacto social y económico	Factibilidad financiera	Relevancia ambiental y cultural
-----------	---------------------------------	--------------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------------

Escenario					
Optimo - Sol					
Resiliente: Un	2	3	4	3	4
Valle Brillante					
hacia el 2034					
Escenario					
Tendencial -					
Luz Incierta:					
Progresos	3	4	4	3	5
Graduales					
Bajo el Sol					
Escenario					
Apuesta -					
Horizonte	4	5	5	4	3
Solar: Energía					
para Todos					
Escenario					
Catastrófico -					
Oportunidades	1	1	1	1	1
Perdidas					

Elaboración propia de los autores, 2024.

De acuerdo con las calificaciones obtenidas, el **Escenario Apuesta – Horizonte Solar: Energía para Todos**, destacó en términos de **probabilidad de materialización**, **repercusión político-económica** e **impacto social y económico**, lo que lo posicionó como la opción más adecuada para avanzar en el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en la región.

El **Escenario Apuesta – Horizonte Solar: Energía para Todos**, no solo fue considerado como el más viable, sino también como el más alineado con las necesidades y prioridades del Valle del Cauca, especialmente en lo que respecta a su capacidad para generar empleo, mejorar la calidad de vida de las comunidades locales y fomentar el desarrollo económico.

Cabe resaltar que, a lo largo de todo el proceso de votación y validación, **ninguna calificación se modificó**, lo que indica un alto grado de consenso entre los participantes sobre la pertinencia del **Escenario Apuesta** como la opción más adecuada para avanzar en el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca. Esto resalta la solidez del proceso de deliberación y la concordancia entre los diferentes actores clave involucrados en la toma de decisiones.

CAPÍTULO V.

Resultados de la Fase 4: Construcción del plan estratégico con base en el escenario apuesta.

Luego del proceso de priorización y selección del escenario apuesta, se definió un plan estratégico pensado en la consecución del futuro seleccionado al año 2034, este plan estratégico incluye estrategias y objetivos claros, políticas y acciones claves, indicadores de progreso, responsables asignados, plazos establecidos y los recursos necesarios para su realización.

Misión

La misión de este plan estratégico es aportar a una visión prospectiva y holística a la transición energética en el Valle del Cauca, fomentando la implementación de tecnologías de energía fotovoltaica que no solo reduzcan la dependencia de fuentes fósiles, sino que también impulsen el desarrollo social, económico y ambiental de la región. Este enfoque busca garantizar acceso equitativo a la energía limpia, promoviendo la innovación tecnológica y la justicia energética.

Visión

Para 2034, el Valle del Cauca será un referente en Colombia y América Latina en la generación y uso de energía fotovoltaica. La región se destacará por contar con una matriz energética diversificada y resiliente que prioriza la sostenibilidad ambiental, genera empleo local, fomenta la inclusión social y contribuye al cumplimiento de los compromisos climáticos globales.

El proceso de construcción de la misión y visión fue desarrollado por los autores y el equipo investigador aprovechando la inclusiva participación de los diferentes actores clave y experto en las discusiones y construcciones realizadas en el proceso de construcción, priorización y selección del escenario apuesta.

Proceso de Construcción de la Misión:

1. **Revisión de Contexto y Necesidades:** El primer paso fue realizar un análisis del contexto socioeconómico, ambiental y energético del Valle del Cauca. A través de este análisis, se identificaron los desafíos y oportunidades relacionados con la transición energética y el uso de la energía fotovoltaica.
2. **Definición de Objetivos Estratégicos:** A partir de las discusiones, los participantes definieron objetivos estratégicos para la misión que aborden la necesidad de una transición energética sostenible en la región, enfocándose en el uso de tecnologías fotovoltaicas. Se incluyó la reducción de la dependencia de fuentes fósiles, la promoción de la justicia energética, y el impulso al desarrollo social y económico a través de la energía limpia.
3. **Consolidación de la Misión:** Con base en las discusiones, se redactó una misión que refleja un enfoque integral y prospectivo, asegurando que los beneficios sociales y ambientales fueran tan prioritarios como la innovación tecnológica.

Proceso de Construcción de la Visión:

1. **Proyección a Largo Plazo:** La visión se construyó mirando hacia el horizonte de 2034, con el objetivo de posicionar al Valle del Cauca como un

referente regional y global en el uso de energía fotovoltaica. La diversificación energética y la resiliencia frente a cambios climáticos fueron temas centrales durante las sesiones de planificación.

- 2. Inclusión de los Actores:** Durante las discusiones, se incorporaron las perspectivas de los diferentes actores involucrados basándonos en las posibilidades de desarrollo y las necesidades futuras de la región contempladas en el escenario apuesta priorizado y seleccionado.
- 3. Redacción de la Visión:** Con los insumos obtenidos, los autores de la investigación redactaron la visión, con un enfoque en la sostenibilidad, crecimiento económico local, seguridad energética, y la participación de la comunidad. La visión proyectada buscaba establecer una matriz energética resiliente y una economía local que estuviera alineada con los objetivos globales de transición energética y mitigación del cambio climático.

Referente Conceptual de Planeación Estratégica Aplicado:

El proceso de construcción de la misión y visión se basó en el modelo de planeación estratégica prospectiva, que es particularmente útil para abordar la incertidumbre y las dinámicas cambiantes de largo plazo. Este enfoque no solo permite prever futuros posibles, sino que también fomenta la participación de los actores clave, garantizando que las estrategias desarrolladas sean adaptables y alineadas con las realidades del territorio. Para ello, se utilizaron principios de planeación estratégica participativa, los cuales buscan integrar los intereses de las diversas partes interesadas y construir una visión compartida (Godet & Durance, 2011).

La prospectiva estratégica permitió desarrollar escenarios de futuro que consideraran la viabilidad financiera, las oportunidades de innovación tecnológica, y la dimensión social (Montes, 2020). Así, tanto la misión como la visión reflejan una estrategia de acción inclusiva y sostenible, que promueve la adopción de energías limpias y garantiza la justicia energética.

Valores.

- **Sostenibilidad Ambiental:** Alianza con comunidades locales para proteger los ecosistemas durante la instalación de proyectos solares.
- **Inclusión Social:** Incorporación de comunidades vulnerables en el diseño y ejecución de proyectos, asegurando beneficios tangibles.
- **Innovación y Tecnología:** Apoyo a iniciativas de investigación y desarrollo (I+D) que permitan avances en almacenamiento energético y eficiencia de paneles solares.
- **Colaboración Multisectorial:** Participación de actores públicos, privados, académicos y comunitarios en la toma de decisiones.

Objetivos Estratégicos.

1. **Matriz energética diversificada:** Alcanzar un incremento en el margen de participación de la energía fotovoltaica en la matriz energética regional para 2034.
- **Estrategia:** Fomentar la inversión en infraestructura fotovoltaica tanto a nivel privado como público mediante incentivos fiscales y apoyo a la inversión privada en energías renovables.
 - **Acciones:**

- Implementar programas de subsidios e incentivos a las empresas que instalen sistemas fotovoltaicos en zonas urbanas y rurales.
- Promover asociaciones público-privadas para el financiamiento de grandes parques solares.
- Facilitar la expansión de redes de distribución eléctrica que permitan integrar la energía fotovoltaica a gran escala.
- Invertir en el mejoramiento de la eficiencia tecnológica de los sistemas fotovoltaicos disponibles.

2. Reducción de emisiones de GEI: Disminuir significativamente las emisiones de carbono asociadas al sector energético para 2034, contribuyendo a los objetivos nacionales de neutralidad de carbono.

- **Estrategia:** Implementar políticas de descarbonización y transición energética que favorezcan la generación de energía limpia.
- **Acciones:**
 - Desarrollar e implementar normativas y regulaciones para reducir las emisiones de CO₂ en el sector energético.
 - Fomentar el uso de energía fotovoltaica como sustituto de fuentes fósiles en la generación de electricidad.
 - Incentivar la adopción de tecnologías eficientes y de bajo impacto ambiental, como sistemas de almacenamiento de energía y paneles solares de alta eficiencia.

- 3. Creación de empleo local:** Generar entre 200 y 500 empleos directos e indirectos en el sector de energías renovables durante el periodo de implementación, dado que, según Jiménez O. & Giraldo L. (2021), a 2021 se estimaba que la energía solar fotovoltaica había generado alrededor de 2.772 empleos en el mundo y su mercado se aproximaba a los USD 300 millones anuales.
- **Estrategia:** Implementar políticas de descarbonización y transición energética que favorezcan la generación de energía limpia.
 - **Acciones:**
 - Desarrollar e implementar normativas y regulaciones para reducir las emisiones de CO₂ en el sector energético.
 - Fomentar el uso de energía fotovoltaica como sustituto de fuentes fósiles en la generación de electricidad.
 - Incentivar la adopción de tecnologías eficientes y de bajo impacto ambiental, como sistemas de almacenamiento de energía y paneles solares de alta eficiencia.
- 4. Acceso equitativo a la energía:** Garantizar que las comunidades rurales encuentren en la energía fotovoltaica una solución a sus problemas energéticos y, facilitarles el acceso y uso de la energía fotovoltaica para 2034.
- **Estrategia:** Desarrollar programas de **provisión de energía fotovoltaica** en comunidades rurales y aisladas.
 - **Acciones:**

- Implementar proyectos de energía fotovoltaica distribuida que lleven paneles solares a zonas rurales sin acceso a la red eléctrica.
- Establecer subsidios y financiamiento para que las comunidades rurales puedan acceder a sistemas fotovoltaicos a bajo costo.
- Crear alianzas con ONGs y organizaciones comunitarias para la instalación de sistemas solares en zonas de difícil acceso.

5. Fomento a la investigación: Financiar al menos 15 proyectos de investigación y desarrollo enfocados en tecnologías solares avanzadas para 2034.

- **Estrategia:** Estimular la innovación y el desarrollo tecnológico en el campo de la energía solar fotovoltaica.
- **Acciones:**
 - Asignar fondos públicos y privados para la investigación en tecnologías fotovoltaicas de próxima generación.
 - Crear incubadoras y centros de innovación tecnológica que trabajen en colaboración con universidades y centros de investigación.
 - Promover la colaboración internacional para el intercambio de conocimientos y tecnologías solares avanzadas.

6. Fomentar la adopción de tecnología fotovoltaica en el Valle del Cauca

mediante políticas de incentivos y un marco regulador favorable.

- **Estrategia:** Desarrollar un marco normativo favorable y ofrecer incentivos fiscales y financieros para la adopción de tecnología fotovoltaica.
- **Acciones:**
 - Establecer incentivos fiscales para empresas que inviertan en energía fotovoltaica y faciliten el acceso de la población a este tipo de tecnología.
 - Desarrollar y aplicar una legislación que facilite la instalación de paneles solares en viviendas, comercios y empresas.
 - Crear un programa de financiamiento accesible para pequeñas y medianas empresas (PYMEs) interesadas en implementar energía fotovoltaica.

7. Incrementar la participación de la energía fotovoltaica en la matriz

energética para alcanzar una contribución del 20% de la generación eléctrica en la región hacia 2034.

- **Estrategia:** Acelerar la expansión de la capacidad instalada de energía fotovoltaica en la región.
- **Acciones:**
 - Facilitar la instalación masiva de sistemas fotovoltaicos tanto a gran escala como a nivel doméstico y comercial.

- Promover la creación de parques solares mediante la combinación de inversión pública y privada.
- Implementar proyectos piloto para demostrar la viabilidad de la fotovoltaica y promover su adopción en áreas específicas.

8. Impulsar la investigación y desarrollo en tecnologías fotovoltaicas para mejorar la eficiencia y reducir costos, promoviendo la innovación y el conocimiento local.

- **Estrategia:** Incrementar la inversión en I+D para desarrollar tecnologías más eficientes y asequibles en energía solar.
- **Acciones:**
 - Crear grupos de investigación especializados en el diseño de nuevas tecnologías fotovoltaicas que mejoren la eficiencia de los paneles solares.
 - Colaborar con instituciones académicas y empresas tecnológicas para mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción de paneles solares.
 - Promover el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía para maximizar el uso de la energía fotovoltaica.

9. Fortalecer la aceptación social y la participación comunitaria, creando una base sólida de apoyo para la energía fotovoltaica y generando empleo local en el sector de energías renovables.

- **Estrategia:** Promover la sensibilización y participación comunitaria en torno a los beneficios de la energía fotovoltaica.
- **Acciones:**
 - Desarrollar campañas de sensibilización pública sobre los beneficios de la energía solar fotovoltaica en términos de ahorro, sostenibilidad y empleo.
 - Implementar programas de participación comunitaria que incluyan a las comunidades locales en la instalación y mantenimiento de sistemas solares.
 - Fomentar la creación de cooperativas de energía renovable que permitan a las comunidades beneficiarse directamente de la generación de energía solar.

Políticas y Acciones Clave

Tabla 14. Políticas y acciones clave

Política	Acción Específica	Responsable	Plazo
Incrementar la adopción de energía solar	Diseñar e implementar políticas de incentivos fiscales y subsidios	Gobierno Nacional, Reguladores del Mercado	Corto plazo
Generar empleo local en el sector solar	Crear programas de capacitación técnica	Universidades, Empresas Constructoras	Mediano plazo

Impulsar I+D en energía solar	Crear un fondo colaborativo para proyectos de innovación tecnológica	Centros de Investigación Climática, Universidades	Largo plazo
Fortalecer la aceptación social	Realizar campañas de sensibilización y educación en comunidades	Medios de Comunicación, Líderes Comunitarios	Corto plazo
Garantizar la infraestructura de almacenamiento	Establecer acuerdos con fabricantes de baterías	Empresas de Tecnología Solar, Fabricantes FV	Mediano plazo
Reducir costos de implementación	Generar alianzas internacionales para financiamiento	Organizaciones Internacionales, Inversores Privados	Mediano plazo
Mejorar la calidad de los equipos solares	Implementar certificaciones técnicas y auditorías de calidad	Consultores en Energía, Asociaciones Industriales	Largo plazo
Fomentar el desarrollo comunitario	Involucrar a ONGs de Desarrollo Comunitario en la planificación	ONGs de Desarrollo Comunitario, Comunidades Locales	Corto plazo

Aumentar la integración de sistemas solares rurales	Implementar soluciones solares fuera de red en áreas remotas	Empresas de Energía Fotovoltaica, ONG Ambientales	Mediano plazo
Promover la inversión privada	Establecer un marco normativo para garantizar retornos seguros	Reguladores del Mercado, Instituciones Financieras	Corto plazo
Asegurar la sostenibilidad ambiental	Crear normativas para mitigar el impacto ambiental de los proyectos	Ministerio de Ambiente, Grupos de Presión Ambiental	Largo plazo

Elaboración propia de los autores, 2024.

Elementos habilitadores.

La asignación de recursos es clave para asegurar que las metas se cumplan de manera eficiente y sostenible:

- **Financiamiento:** Fondos de inversión nacional e internacional, financiamiento público y privado para cubrir los costos iniciales de infraestructura y los programas de capacitación. Los incentivos fiscales serán otorgados por el gobierno para facilitar la inversión en infraestructura solar.
- **Recursos Humanos:** Profesionales capacitados en tecnologías fotovoltaicas, así como la colaboración con universidades locales para la investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras en energía fotovoltaica.

- **Infraestructura:** Creación de centros de innovación y la construcción de infraestructuras para el almacenamiento y conexión a la red, financiados a través de asociaciones público-privadas.

Indicadores de Progreso.

Tabla 15. Indicadores de progreso o KPIs

Políticas	Indicador	KPI	Responsable
Incrementar la adopción de energía solar	Número de proyectos implementados	+30 proyectos nuevos por año	Empresas de Energía Fotovoltaica, Gobierno
Generar empleo local en el sector solar	Número de técnicos capacitados	+500 técnicos al año	Universidades, Empresas Constructoras
Impulsar I+D en energía solar	Número de investigaciones activas	+20 proyectos de I+D en 5 años	Centros de Investigación, Startups
Fortalecer la aceptación social	Nivel de aceptación comunitaria	+80% aceptación en encuestas	Líderes Comunitarios, Medios de Comunicación

Garantizar la infraestructura de almacenamiento	Capacidad instalada de almacenamiento en MW	100 MW adicionales para 2034	Fabricantes FV, Empresas de Tecnología Solar
Reducir costos de implementación	Reducción promedio del costo de inversión	25% menos para 2034	Inversores Privados, Organizaciones Int.
Mejorar la calidad de los equipos solares	Porcentaje de equipos certificados	95% de certificación en 2034	Asociaciones Industriales, Consultores
Fomentar el desarrollo comunitario	Número de comunidades involucradas	+50 comunidades para 2034	ONGs de Desarrollo Comunitario, Comunidades
Aumentar la integración de sistemas solares rurales	Porcentaje de hogares rurales electrificados	70% de cobertura en áreas rurales para 2034	ONG Ambientales, Empresas FV
Promover la inversión privada	Fondos captados de inversión privada	USD 500M captados en 10 años	Reguladores del Mercado, Instituciones Fin.

Asegurar la sostenibilidad ambiental	Proyectos que cumplen con normativas ambientales	100% cumplimiento en 2034	Ministerio de Ambiente, Grupos de Presión
--------------------------------------	--	---------------------------	---

Elaboración propia de los autores, 2024.

Estimado Presupuestal.

Infraestructura y Equipamiento.

Tabla 16. Infraestructura y equipamiento estimado

Concepto	Cantidad Estimada	Costo Unitario	Costo Total
Instalación de plantas solares a gran escala.	10 plantas (50 MW cada una)	\$350,000,000,000 por planta	\$3,500,000,000,000
Sistemas de almacenamiento (baterías)	500 MWh en total	\$1,500,000,000	\$750.000.000.000
Infraestructura de transmisión y conexión a la red	300 km de líneas	\$2,000,000,000 por km	\$600.000.000.000
Monitoreo y automatización de sistemas	10 centros de control	\$15,000,000,000 por centro	\$150.000.000.000

Subtotal			\$5,000,000,000,000
Infraestructura			

Elaboración propia de los autores, 2024

Capacitación, Innovación y Desarrollo Tecnológico

Esta categoría contempla la formación de técnicos especializados, programas de investigación y desarrollo (I+D) en almacenamiento energético y optimización de eficiencia de paneles solares.

Tabla 17. Capacitación, Innovación y Desarrollo Tecnológico

Concepto	Cantidad Estimada	Costo Unitario	Costo Total
Programas de formación en energía solar.	5,000 personas capacitadas	\$4,000,000 por persona	\$20.000.000.000
Crea	3 laboratorios	\$50.000.000.000 por laboratorio	\$150.000.000.000
Financiación de proyectos de innovación tecnológica.	15 proyectos	\$10,000,000,000 por proyecto	\$150.000.000.000
Subtotal			\$320.000.000.000
Capacitación e I+D			

Elaboración propia de los autores, 2024

Incentivos, Financiamiento y Apoyos a Comunidades

Este apartado considera subsidios para la implementación del sistema.

Tabla 18. Incentivos, Financiamiento y Apoyos a Comunidades

Concepto	Cantidad Estimada	Costo Unitario	Costo Total
Incentivos fiscales y subsidios	20.000 viviendas rurales beneficiadas	\$15,000,000 por vivienda	\$300.000.000.000
Creación de fondos de inversión verde	1 fondo	\$500.000.000.000	\$500.000.000.000
Programas de microcréditos para pequeñas empresas solares	1 fondo rotatorio	\$200.000.000.000	\$200.000.000.000
Subtotal Incentivos y Apoyos			\$1,000,000,000,000

Elaboración propia de los autores, 2024

Costos de Operación y Mantenimiento.

Incluye mantenimiento de plantas solares, baterías y redes, así como gestión administrativa y operativa del plan.

Tabla 19. Costos de Operación y Mantenimiento.

Concepto	Cantidad Estimada	Costo Unitario	Costo Total

Mantenimiento anual de plantas solares	10 plantas	\$25,000,000,000 por planta	\$250.000.000.000
Mantenimiento de redes y almacenamiento.	500 MWh	\$3,000,000,000 por MWh	\$150.000.000.000
Gestion operativa y administrativa	10 años	\$50,000,000,000 por año	\$500.000.000.000
Subtotal Operación y Mantenimiento			\$900.000.000.000

Elaboración propia de los autores, 2024

Costos de Sensibilización y Comunicación.

Incluye campañas de concienciación sobre el uso de energía solar, divulgación científica y fortalecimiento de la aceptación social.

Tabla 20. Costos de Sensibilización y Comunicación.

Concepto	Cantidad Estimada	Costo Unitario	Costo Total
Campañas educativas y de sensibilización	5 años de campañas	\$30,000,000,000 por año	\$150.000.000.000

Producción de material informativo y difusión.	10 proyectos de comunicación	\$5,000,000,000 por proyecto	\$50.000.000.000
Subtotal			\$200.000.000.000
Sensibilización y Comunicación			

Elaboración propia de los autores, 2024

Evaluación y Control

Para realizar los proceso de evaluación y seguimiento, se propone implementar un sistema de monitoreo y control con las siguientes características:

- **Informes trimestrales** que registren el avance de cada proyecto, permitiendo un monitoreo constante y la adaptación de estrategias según sea necesario.
- **Revisión anual de KPIs**, analizando los resultados y ajustando los objetivos y estrategias para responder a cualquier cambio en el entorno político, económico o tecnológico.
- **Encuestas de percepción y aceptación social**, para evaluar el impacto del proyecto en la comunidad, asegurando que la población esté informada y apoye los proyectos fotovoltaicos en desarrollo.

Este proceso de evaluación permitirá la retroalimentación continua de los actores involucrados y garantizará la sostenibilidad de los esfuerzos a largo plazo.

Conclusiones.

El análisis exhaustivo del estado actual de la energía solar fotovoltaica en el Valle del Cauca ha revelado un contexto complejo que combina tanto oportunidades significativas como desafíos sustanciales. A través de un diagnóstico meticuloso, que incluyó una revisión documental detallada y la evaluación de proyectos en curso, se identificaron las barreras que limitan la adopción de tecnologías fotovoltaicas, tales como la insuficiencia de infraestructura adecuada y la necesidad de inversiones iniciales considerables. A pesar del notable potencial solar de la región, la implementación de soluciones fotovoltaicas ha sido lenta, lo que subraya la urgencia de aprovechar el marco normativo establecido por el Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052, el cual proporciona directrices estratégicas para la transición energética en Colombia.

En este contexto, se llevó a cabo un análisis de las variables clave que influyen en el desarrollo del sector, utilizando herramientas metodológicas como la construcción de un árbol de problemas y un diagrama de afinidad, que permitieron desentrañar las complejas interrelaciones entre factores tecnológicos, económicos, normativos y sociales. Este enfoque reveló la importancia de aspectos críticos como la eficiencia de los paneles solares, la viabilidad financiera de los proyectos, las políticas públicas de incentivos y la percepción social sobre la energía renovable, elementos que son esenciales para diseñar estrategias efectivas que aborden las barreras existentes y maximicen las oportunidades de crecimiento en el sector fotovoltaico.

A partir de este análisis, se definieron escenarios futuros mediante un proceso de consulta con actores clave del sector energético, lo que permitió validar las variables identificadas y su relevancia práctica. Se estableció un escenario apuesta que proyecta un

crecimiento significativo de la energía solar fotovoltaica hacia 2034, fundamentado en la integración de tecnologías emergentes, un marco normativo favorable y políticas de apoyo robustas. Este escenario no solo busca incrementar la capacidad instalada de energía fotovoltaica, sino también promover un desarrollo sostenible que contribuya a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la mejora de la calidad de vida de las comunidades locales.

Además, es fundamental considerar la evaluación del impacto ambiental de los proyectos fotovoltaicos, asegurando que su implementación no solo sea económicamente viable, sino también ecológicamente sostenible. La participación comunitaria se presenta como un elemento clave, ya que involucrar a las comunidades locales en el proceso de adopción de tecnologías solares puede facilitar la aceptación social y garantizar que se aborden sus necesidades y preocupaciones. Asimismo, fomentar la colaboración entre el sector público y privado es esencial para movilizar recursos, compartir conocimientos y promover la innovación en el sector energético.

La implementación de un sistema de monitoreo y evaluación permitirá medir el progreso de las iniciativas de energía fotovoltaica, ajustando las estrategias según sea necesario para maximizar su efectividad. También se destaca la importancia de programas de educación y sensibilización sobre los beneficios de la energía solar, que fomenten una cultura de sostenibilidad en la región. Por último, se sugiere el desarrollo de modelos de negocio innovadores y opciones de financiamiento accesibles, así como la creación de políticas de incentivo más robustas que promuevan la inversión en energías renovables.

Recomendaciones.

El éxito de la implementación del escenario apuesta en el Valle del Cauca depende de una estrategia integral que contemple aspectos políticos, sociales, técnicos, económicos, regulatorios y ambientales. En primer lugar, es fundamental establecer un marco político y regulatorio sólido que brinde estabilidad y genere incentivos claros para la adopción de tecnologías solares. Esto incluye la implementación de exenciones tributarias, tarifas diferenciadas para comunidades vulnerables y normativas que faciliten la integración de energía fotovoltaica en la red eléctrica. Estas acciones reducirían los costos iniciales de los proyectos y aumentarían su viabilidad económica, incentivando la inversión en el sector.

La colaboración multisectorial y la gobernanza participativa son otro componente esencial. A manera de recomendación, se sugiere la creación de un Consejo Regional de Energía fotovoltaica, integrado por representantes del gobierno, empresas privadas, instituciones académicas y comunidades locales, garantizaría una planificación estratégica y coordinada. Este órgano permitiría optimizar recursos, promover la transparencia y asegurar que las comunidades participen activamente en la toma de decisiones, mejorando la aceptación social de los proyectos.

La inversión en investigación y desarrollo es clave para superar barreras técnicas, como la intermitencia en la generación solar y la limitada capacidad de almacenamiento energético. Para ello, se recomienda financiar proyectos de I+D enfocados en baterías avanzadas y la mejora de la eficiencia de los paneles solares. Además, la colaboración con universidades locales y centros internacionales de investigación permitiría desarrollar soluciones adaptadas a las condiciones climáticas del Valle del Cauca, fortaleciendo la competitividad tecnológica de la región.

Para garantizar una transición energética equitativa, es crucial fomentar la justicia energética e inclusión social. Esto implica priorizar la implementación de energía fotovoltaica en comunidades rurales, diseñar programas de capacitación técnica dirigidos a mujeres y jóvenes, y establecer esquemas de financiamiento accesible para pequeños productores. Estas acciones no solo reducirían las desigualdades en el acceso a la energía, sino que también generarían empleos inclusivos, beneficiando a sectores tradicionalmente marginados.

El monitoreo y la evaluación dinámica son herramientas imprescindibles para medir el progreso hacia los objetivos establecidos. Un sistema digital que permita rastrear indicadores clave en tiempo real, combinado con auditorías anuales independientes, garantizaría la rendición de cuentas y facilitaría ajustes estratégicos en respuesta a cambios en el entorno. La publicación de informes periódicos dirigidos a los actores clave también fomentaría la transparencia y el compromiso colectivo.

La integración de la economía circular en el sector fotovoltaico es vital para garantizar la sostenibilidad ambiental a largo plazo. Esto incluye el desarrollo de programas de reciclaje para paneles solares y baterías, incentivos para el uso de materiales reciclables y la implementación de tecnologías de segunda vida para componentes en desuso. Estas prácticas reducirían significativamente el impacto ambiental de la transición energética.

Diversificar las fuentes de financiamiento es otro aspecto crítico. La emisión de bonos verdes, la creación de fondos de inversión regionales y la implementación de programas de microfinanciamiento garantizarían recursos suficientes para proyectos solares a gran escala y comunitarios. Este enfoque permitiría alcanzar la meta de USD 1,000 millones en inversiones para 2034.

Finalmente, las campañas de sensibilización y educación son esenciales para generar apoyo social hacia los proyectos solares. Estas iniciativas deberían incluir programas educativos en escuelas, talleres comunitarios sobre el uso y mantenimiento de energía fotovoltaica, y la difusión de casos de éxito a través de plataformas digitales. Este enfoque fortalecería la percepción pública de la energía fotovoltaica como una solución viable, accesible y beneficiosa para la región.

En conjunto, estas recomendaciones ofrecen un marco integral para transformar al Valle del Cauca en un modelo de transición energética sostenible, garantizando un impacto positivo tanto en el desarrollo económico como en la calidad de vida de sus habitantes.

Referencias

- Bank of America. (23 de 06 de 2022). *newsroom.bankofamerica.com*. Obtenido de [newsroom.bankofamerica.com](https://newsroom.bankofamerica.com/content/newsroom/press-releases/2022/06/bank-of-america-builds-on-its-environmental-commitment-to-power.html):
<https://newsroom.bankofamerica.com/content/newsroom/press-releases/2022/06/bank-of-america-builds-on-its-environmental-commitment-to-power.html>
- Barreto, A. (02 de 12 de 2024). *Energías Renovables: El periodismo de las energías limpias*. Obtenido de [energias-renovables.com](https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/el-precio-de-los-paneles-solares-ha-20240731): <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/el-precio-de-los-paneles-solares-ha-20240731>
- BloombergNEF. (2023). *Energy transition investment trends 2023*. BloombergNEF. Obtenido de <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/energy-transition-investment-trends-2023.pdf>
- Bradfield, R., Wright, G., Burt, G., Cairns, G., & Van Der Heijden, K. (2005). *The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning* (Vol. 37). Futures. doi:<https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.01.003>
- Bryman, A. (2016). *Social Research Methods*. London: Oxford University Press. Obtenido de <https://ktpu.kpi.ua/wp-content/uploads/2014/02/social-research-methods-alan-bryman.pdf>
- Brynjolfsson, E., & Kahin, B. (2002). *Understanding the Digital Economy: data, tools, and research*. MIT Press. Obtenido de <https://mitpress.mit.edu/9780262523301/understanding-the-digital-economy/>

- Cardona, D., Tamayo, J. A., & Eslava-Garzón, J. S. (2024). Hacia una matriz energética sostenible en Colombia. Una revisión sistemática de la literatura. *Información tecnológica*, 35(5), 1-16. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642024000500001>
- CEPAL, & NU. (2012). *Estado de la banda ancha en América Latina y el Caribe, 2012: informe del Observatorio Regional de Banda Ancha (ORBA)*. CEPAL. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/4014-estado-la-banda-ancha-america-latina-caribe-2012-informe-observatorio-regional>
- Chermack, T. (2011). *Scenario Planning in organizations. How to create, use and assess scenarios*. USA: Berrett-Koehler Publishers, Inc. Obtenido de https://www.bkconnection.com/static/Scenario_Planning_in_Organizations_EXCE RPT.pdf
- Climate Cooperation China. (26 de 01 de 2024). <https://climatecooperation.cn/>. Obtenido de <https://climatecooperation.cn/>: <https://climatecooperation.cn/climate/chinas-installed-solar-capacity-rises-55-2-in-2023/>
- Comisión Europea. (2022). *Pacto Verde Europeo: Consecución de nuestros objetivos*. Comisión Europea. Obtenido de https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869813/EGD_brochure_ES.pdf
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and Conducting Mixed Methods Research*. SAGE Publications, Inc. Obtenido de <https://collegepublishing.sagepub.com/products/designing-and-conducting-mixed-methods-research-3-241842>

Fraunhofer ISE. (2023). *Results and Figures: Annual Report 2023 /24*. Fraunhofer ISE.

Obtenido de

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/annual_reports/fraunhofer-ise-annual-report-2023-2024.pdf

Godet, M., & Durance, P. (2011). *La prospectiva estratégica para las empresas y los*

territorios. Paris: ONU/Dunod. Obtenido de

https://www.ceplan.gob.pe/documentos_/la-prospectiva-estrategica-para-las-empresas-y-los-territorios/

IDEAM, I. (2023). *Informe de gestión*. Bogotá D.C: IDEAM. Obtenido de

https://ideam.gov.co/sites/default/files/transparencia/planeacion/informe_de_gestion_2023_ideam.pdf

IEA, I. (2020). *Renewable Energy Market Update*. IEA. Obtenido de

https://iea.blob.core.windows.net/assets/9ee2be30-de3f-4507-940c-ae4726c78845/Renewable_Energy_Market_Update.pdf

IPCC, I. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC.

Obtenido de

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf

IRENA, I. (2022). *Renewable Capacity Statistics*. Abu Dhabi: IRENA. Obtenido de

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf

- IRS. (01 de 01 de 2023). <https://www.irs.gov/>. Obtenido de <https://www.irs.gov/>:
<https://www.irs.gov/credits-deductions/energy-efficient-home-improvement-credit>
- Jeffs, C. (2019). *E-commerce Competition Enforcement Guide*. Londres, Reino Unido: Law Business Research. Obtenido de
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8080/1/478357-2020-III-NIIE.pdf>
- Jiménez Osorio, G. R., & Giraldo López, C. M. (2021). *SITUACIÓN ACTUAL DE LA INDUSTRIA DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA*. Medellín.
Obtenido de
<https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/1736/43.%20TGII%20Articulo%20Fotovoltaica-%20Cata%20y%20Gloria%20Final%2017%20de%20junio2021%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kaplan, S., & Sawhney, M. (2000). *E-hubs: los nuevos mercados B2B* (Vol. 78). Harvard Business Review. Obtenido de http://levinfab.free.fr/E-Commerce_Hubs.pdf
- Laudon, K., & Guercio T, C. (2009). *E-commerce, Business Technology Society*. (P. Education, Ed.) México. Obtenido de <https://dokumen.pub/e-commerce-negocios-tecnologia-y-sociedad-college-spanish-edition-6074420491-9786074420494.html>
- Miller, C. A., Iles, A., & Jones, C. F. (2013). *The Social Dimensions of Energy Transitions* (Vol. 22). Science as Culture. doi:<https://doi.org/10.1080/09505431.2013.786989>

- MINENERGÍA, M. (2023). *Oportunidades y desafíos socioambientales de la Transición Energética Justa*. Bogotá D.C: MINENERGÍA. Obtenido de <https://minenergia.gov.co/documents/12636/Desafios-TEJ-2024.pdf>
- Montes, M. (2020). APORTES DEL ANÁLISIS MULTIVARIANTE EN PLANIFICACIÓN POR ESCENARIOS. *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 25-51. doi:<https://doi.org/10.24054/16927125.v2.n2.2020.4152>
- Mora, C., McKenzie, T., Gaw, I. M., Dean, J. M., Von Hammerstein, H., Knudson, T. A., . . . Franklin, E. C. (2022). *Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change* (Vol. 12). Nature Climate Change. doi:<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1>
- OIT. (28 de 09 de 2023). <https://www.ilo.org/>. Obtenido de <https://www.ilo.org/:https://www.ilo.org/es/resource/news/los-empleos-en-renovables-casi-se-duplicaron-en-la-%C3%BAltima-d%C3%A9cada-alcanzando>
- RocaSalvatalla - Infometrika. (2017). *El Comercio Electrónico en Colombia, Análisis integral y perspectiva regulatoria*. Bogotá D.C. Obtenido de <https://www.crcom.gov.co/es/biblioteca-virtual/comercio-electronico-en-colombia-analisis-y-perspectiva-regulatoria>
- Rodríguez-Ardura, I., Artola, A., M., & Vilaseca I, R. J. (2008). *EL COMERCIO ELECTRÓNICO EN PERSPECTIVA: DINÁMICA Y DESENCADENANTES* (Vol. 14). Vigo, España: Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2741/274120249003.pdf>

- Schoemaker, P. J. (1995). *Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking* (Vol. 36). Sloan Management Review. Obtenido de <https://sloanreview.mit.edu/article/scenario-planning-a-tool-for-strategic-thinking/>
- SOLMIC. (03 de 11 de 2024). *solmic: un futuro brillante*. Obtenido de <https://www.solmic.co/>: <https://www.solmic.co/panorama-de-los-proyectos-de-energia-solar-en-colombia#:~:text=Actualmente%2C%20el%20pa%C3%ADs%20cuenta%20con,ca pacidad%20neta%20de%20388%20MW.>
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2010). *SAGE Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research*. SAGE Publications, Inc.
doi:<https://doi.org/10.4135/9781506335193>
- UNEP. (19 de 02 de 2024). <https://www.unep.org/>. Obtenido de <https://www.unep.org/>: <https://www.unep.org/es/resources/informe-anual-2023>
- UPME, U. (2023). *INFORME – Resultados indicadores*. UPME. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Documents/Informe_gerencia_resultados_indicadores_2023.pdf
- Wood Mackenzie. (17 de 12 de 2021). *Predictions for 2022*. Obtenido de <https://www.woodmac.com/>: <https://www.woodmac.com/blogs/energy-pulse/predictions-for-2022/>
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods*. Thousand Oaks, CA: Sage. Obtenido de <https://cmc.marmot.org/Record/.b5928917x>