



Universidad del  
**Rosario**

| Escuela de Ciencias  
e Ingeniería



Universidad del  
**Rosario**



Facultad de Estudios  
Internacionales,  
Políticos y Urbanos

## **Comunidades Energéticas Inteligentes y Sostenibles**

Autores:

**Edwin Alexander Muñoz Vera**  
**Luz Esneider Tovar Garibello**

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO**  
**MAESTRÍA EN CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES**  
**ESCUELA DE CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS INTERNACIONALES, POLÍTICOS Y URBANOS**  
**BOGOTÁ, COLOMBIA**  
**04 DE DICIEMBRE DE 2025**



Universidad del  
**Rosario**

Escuela de Ciencias  
e Ingeniería



Universidad del  
**Rosario**



Facultad de Estudios  
Internacionales,  
Políticos y Urbanos

## **Comunidades Energéticas Inteligentes y Sostenibles**

Trabajo presentado para obtener el título de  
Magíster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Autores:

**Edwin Alexander Muñoz Vera**  
**Luz Esneider Tovar Garibello**

Director:

Johan Manuel Redondo PhD.

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO**  
**MAESTRÍA EN CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES**  
**ESCUELA DE CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS INTERNACIONALES, POLÍTICOS Y URBANOS**  
**BOGOTÁ COLOMBIA**  
**04 DE DICIEMBRE DE 2025**

## **ABSTRACT**

This paper examines the role of energy communities as instruments for a just and decentralized energy transition in Colombia, focusing on 208 sixth-category municipalities with high levels of multidimensional energy poverty. Using a systemic and multilevel framework, three analytical dimensions are integrated: (1) the structural dimension, through the identification of territorial typologies; (2) the dynamic dimension, by analyzing the systemic structure of intelligent and sustainable energy communities; and (3) the strategic dimension, through game theory modeling of cooperative incentives among community, institutional, and private actors. The results show that intelligent energy communities can reduce energy poverty, strengthen territorial autonomy, and foster social equity when combining locally adapted renewable technologies with collaborative governance mechanisms. The study proposes an integrated conceptual model that supports decentralized energy policy, institutional co-responsibility, and local knowledge management.

**Keywords:** Energy communities, just energy transition, energy poverty, decentralized governance, resilience, intelligent territories, Colombia.

## RESUMEN

Este artículo examina el papel de las comunidades energéticas como instrumentos para una transición energética justa y descentralizada en Colombia, enfocándose en 208 municipios de sexta categoría con altos niveles de pobreza energética multidimensional. A partir de un enfoque sistémico y multinivel, se integran tres dimensiones de análisis: (1) la dimensión estructural, mediante la identificación de tipologías territoriales; (2) la dimensión dinámica, a través del análisis de la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles; y (3) la dimensión estratégica, mediante la modelación de incentivos cooperativos entre actores comunitarios, institucionales y privados utilizando teoría de juegos.

Los resultados muestran que las comunidades energéticas inteligentes pueden reducir la pobreza energética, fortalecer la autonomía territorial y fomentar la equidad social cuando combinan tecnologías renovables adaptadas localmente con mecanismos de gobernanza colaborativa. El estudio propone un modelo conceptual integrado que respalda la política energética descentralizada, la corresponsabilidad institucional y la gestión del conocimiento local.

**Palabras clave:** Comunidades energéticas, transición energética justa, pobreza energética, gobernanza descentralizada, resiliencia, territorios inteligentes, Colombia

## CONTENIDO

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                                                           | 10 |
| 1.1    Objetivos.....                                                                                          | 12 |
| 1.1.1    Objetivo general.....                                                                                 | 12 |
| 1.1.2    Objetivos específicos.....                                                                            | 12 |
| 1.2    Problema y justificación .....                                                                          | 13 |
| 2. MARCO DE REFERENCIA .....                                                                                   | 16 |
| 2.1    Marco teórico .....                                                                                     | 16 |
| 2.1.1    Transición energética justa .....                                                                     | 17 |
| 2.1.2    Sistemas sociotécnicos y gobernanza multinivel.....                                                   | 17 |
| 2.1.3    Inteligencia territorial y territorios inteligentes .....                                             | 18 |
| 2.1.4    Resiliencia energética y la complejidad de la sostenibilidad .....                                    | 18 |
| 2.1.5    Pobreza energética multidimensional.....                                                              | 19 |
| 2.1.6    Síntesis del marco teórico.....                                                                       | 19 |
| 2.2    Estado del arte.....                                                                                    | 21 |
| 2.2.1    Perspectivas internacionales sobre comunidades energéticas .....                                      | 22 |
| 2.2.2    Literatura en contextos rurales y en desarrollo.....                                                  | 22 |
| 2.2.3    Gobernanza energética participativa y justicia distributiva.....                                      | 23 |
| 2.2.4    Transición energética descentralizada e inclusión territorial .....                                   | 23 |
| 2.3    Marco Normativo .....                                                                                   | 24 |
| 2.3.1    Régimen de servicios públicos y electricidad: bases y retos para la descentralización .....           | 24 |
| 2.3.2    Leyes de energías renovables y transición energética: habilitando la generación distribuida .....     | 25 |
| 2.3.3    Ordenamiento territorial, política ambiental y nuevas herramientas para comunidades energéticas ..... | 26 |
| 2.3.4    Análisis normativo .....                                                                              | 28 |
| 3. METODOLOGÍA .....                                                                                           | 29 |
| 4. TIPOLOGÍAS DE COMUNIDADES ENERGÉTICAS EN MUNICIPIOS DE SEXTA CATEGORÍA .....                                | 31 |
| 4.1    Introducción .....                                                                                      | 31 |
| 4.2    Tipo 1. Territorios dispersos con aislamiento energético y geográfico. ....                             | 42 |
| 4.3    Tipo 2. Núcleos productivos rurales con potencial energético local.....                                 | 43 |
| 4.4    Tipo 3. Territorios con alta oferta hídrica y riesgo ambiental .....                                    | 44 |
| 4.5    Tipo 4. Cabeceras municipales conectadas pero vulnerables a la intermitencia .....                      | 45 |

|       |                                                                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.6   | Comparación transversal y fases de madurez energética .....                                                                        | 46 |
| 4.7   | Discusión .....                                                                                                                    | 47 |
| 4.8   | Conclusiones sobre las tipologías .....                                                                                            | 48 |
| 5.    | ESTRUCTURA SISTÉMICA DE LAS COMUNIDADES ENERGÉTICAS INTELIGENTES Y SOSTENIBLES                                                     | 50 |
| 5.1   | Introducción .....                                                                                                                 | 50 |
| 5.2   | Perspectiva sistémica.....                                                                                                         | 51 |
| 5.2.1 | Enfoque conceptual para la sostenibilidad energética comunitaria .....                                                             | 51 |
| 5.2.2 | Metodología para la identificación de la estructura sistémica .....                                                                | 51 |
| 5.2.3 | Descripción detallada de la estructura sistémica .....                                                                             | 52 |
| 5.2.4 | Dominancia de bucles .....                                                                                                         | 61 |
| 5.2.5 | Discusión integradora de los bucles. ....                                                                                          | 65 |
| 5.2.6 | Puntos de palanca. ....                                                                                                            | 66 |
| 5.2.7 | Matriz de intervenciones sistémicas.....                                                                                           | 67 |
| 5.2.8 | Conclusiones del análisis sistémico. ....                                                                                          | 68 |
| 6.    | ANÁLISIS DE EQUILIBRIOS E INCENTIVOS: TEORÍA DE JUEGOS APLICADA AL DESARROLLO<br>ENERGÉTICO Y TERRITORIAL.....                     | 69 |
| 6.1   | Enfoque teórico y metodológico .....                                                                                               | 70 |
| 6.1.1 | Teoría de juegos y desarrollo territorial .....                                                                                    | 70 |
| 6.1.2 | Estructura del juego.....                                                                                                          | 70 |
| 6.2   | Análisis de escenarios y resultados .....                                                                                          | 73 |
| 6.2.1 | Escenario base: equilibrio no cooperativo.....                                                                                     | 73 |
| 6.2.2 | Escenario con subsidio o incentivo.....                                                                                            | 73 |
| 6.2.3 | Escenario con corrupción o castigo débil.....                                                                                      | 73 |
| 6.2.4 | Escenario con capacitación y reducción de costos.....                                                                              | 74 |
| 6.2.5 | Escenario con monitoreo y transparencia.....                                                                                       | 74 |
| 6.2.6 | Integración con los resultados previos .....                                                                                       | 74 |
| 6.2.7 | Ventajas y limitaciones del enfoque .....                                                                                          | 75 |
| 6.3   | Conclusiones del análisis.....                                                                                                     | 76 |
| 7.    | RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA.....                                                                                           | 76 |
| 7.1   | Recomendaciones derivadas de las tipologías (Resultado 1) .....                                                                    | 77 |
| 7.2   | Recomendaciones basadas en la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles<br>(Resultado 2)..... | 77 |
| 7.3   | Recomendaciones desde el análisis de equilibrios e incentivos (Resultado 3).....                                                   | 78 |
| 7.4   | Articulación multinivel y hoja de ruta de implementación .....                                                                     | 78 |

|     |                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------|----|
| 7.5 | Conclusión de las recomendaciones de política..... | 79 |
| 8.  | CONCLUSIONES.....                                  | 81 |
| 8.1 | Trabajos futuros .....                             | 83 |
|     | REFERENCIAS .....                                  | 84 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Enfoques y relaciones de los hallazgos de la literatura .....                           | 20 |
| <b>Tabla 2.</b> Marco normativo colombiano .....                                                        | 27 |
| <b>Tabla 3.</b> Tipologías de comunidades energéticas en municipios de sexta categoría en Colombia..... | 41 |
| <b>Tabla 4.</b> Dominancia de los bucles del sistema. ....                                              | 64 |
| <b>Tabla 5.</b> Matriz de intervenciones sistémicas. ....                                               | 67 |
| <b>Tabla 6.</b> Estructura de Teoría de juegos.....                                                     | 70 |
| <b>Tabla 7.</b> Metodología .....                                                                       | 72 |
| <b>Tabla 8.</b> Recomendaciones para el Gobierno local.....                                             | 79 |
| <b>Tabla 9.</b> Recomendaciones para la Empresa energética .....                                        | 80 |
| <b>Tabla 10.</b> Recomendaciones para la Comunidad.....                                                 | 81 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Marco de Referencias.....                                                                                                                                                     | 16 |
| Figura 2 Metodología.....                                                                                                                                                              | 29 |
| Figura 3 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Perfil Demográfico. Fuente: elaboración propia. ....                                                                           | 33 |
| Figura 4 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Perfil Socioeconómicos. Fuente: elaboración propia. ....                                                                       | 34 |
| Figura 5 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Perfil Educación. Fuente: elaboración propia. ....                                                                             | 35 |
| Figura 6 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios – Salud. Fuente: elaboración propia. ....                                                                                        | 36 |
| Figura 7 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Infraestructura y Servicios Públicos. Fuente: elaboración propia. ....                                                         | 37 |
| Figura 8 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Seguridad y Convivencia. Fuente: elaboración propia Ver: <a href="https://n9.cl/3asjet">https://n9.cl/3asjet</a> .....         | 38 |
| Figura 9 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Inversión Pública y Desarrollo. Fuente: elaboración propia. Ver: <a href="https://n9.cl/3asjet">https://n9.cl/3asjet</a> ..... | 39 |
| Figura 10 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Agricultura y Actividad Económica. Fuente: elaboración propia.....                                                            | 40 |
| Figura 11. Diagrama causal.....                                                                                                                                                        | 53 |
| Figura 12 Bucle 1. Demanda energética. ....                                                                                                                                            | 54 |
| Figura 13 Bucle 2. Tecnología y productividad. ....                                                                                                                                    | 55 |
| Figura 14 Bucle 3. Desarrollo basado en capacidad energética. ....                                                                                                                     | 56 |
| Figura 15 Bucle 4. Cambio climático. ....                                                                                                                                              | 57 |
| Figura 16 Bucle 5. Calidad de la energía. ....                                                                                                                                         | 57 |
| Figura 17 Bucle 6. Gobernanza y eficiencia. ....                                                                                                                                       | 58 |
| Figura 18 Bucle 7. Oferta energética. ....                                                                                                                                             | 59 |
| Figura 19 Bucle 8. Conflictos.....                                                                                                                                                     | 60 |
| Figura 20 Bucle 9. Decisiones inteligentes. ....                                                                                                                                       | 60 |
| Figura 21 Bucle 10. Retención del talento humano.....                                                                                                                                  | 61 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Colombia enfrenta importantes brechas territoriales que se manifiestan con crudeza en sus municipios de sexta categoría, los más pequeños y con menores recursos del país. Más del 90% de los municipios colombianos pertenecen a esta categoría (población  $\leq 10.000$  habitantes y bajos ingresos), lo que los convierte en entidades localmente débiles desde el punto de vista institucional [1]. Estas localidades rurales suelen carecer de infraestructura básica adecuada y presentan desigualdades estructurales en comparación con centros urbanos más desarrollados.

En zonas rurales dispersas la problemática se agrava por la insuficiente cobertura de red eléctrica, la baja confiabilidad del suministro y los elevados costos operativos derivados del uso de combustibles fósiles en generación aislada. Según el *Informe de Calidad del Servicio Eléctrico* [2], existen más de 1.710 localidades que reciben electricidad entre cuatro (4) y doce (12) horas al día, lo que limita el desarrollo productivo y el acceso a servicios básicos como salud y educación.

El universo de análisis de esta investigación está conformado por doscientos ocho (208) municipios de sexta categoría con un Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM) muy alto, distribuidos en distintas regiones del país y pertenecientes tanto al Sistema Interconectado Nacional (SIN) como a Zonas No Interconectadas (ZNI) y sistemas mixtos. Este conjunto territorial constituye el marco empírico sobre el cual se desarrollan los análisis estructurales, dinámicos y estratégicos de la tesis, permitiendo identificar patrones diferenciados de pobreza energética y potencialidades para la implementación de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles.

En este contexto, Colombia ha asumido el reto de una Transición Energética Justa (TEJ), reconociendo que la descarbonización de la matriz energética debe ir acompañada de equidad social y territorial. El país se comprometió a reducir 51% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al 2030 y alcanzar la carbono-neutralidad en 2050, integrando el principio de “no dejar a nadie atrás” en su hoja de ruta climática [3]. Esto implica asegurar que comunidades vulnerables, especialmente las rurales, no queden excluidas de los beneficios de la transición energética [4]. Una estrategia clave en esta agenda es la democratización de la energía, promoviendo modelos participativos e incluyentes de acceso a fuentes limpias [3]. En línea con ello, el Gobierno nacional ha impulsado la figura de las comunidades energéticas como pilar de sostenibilidad y desarrollo rural.

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022-2026 estableció la creación del programa de Comunidades Energéticas para que las comunidades participen activamente en la generación y gestión de la energía en sus territorios, a través de fuentes renovables y recursos distribuidos [3]. Según el artículo 235 de dicho PND, “*los usuarios o potenciales usuarios de servicios energéticos podrán constituir comunidades energéticas para generar, comercializar y/o usar eficientemente la energía a través de fuentes no convencionales de energías renovables (FN CER), combustibles renovables y recursos energéticos distribuidos*” [5].

En otras palabras, una comunidad energética es una asociación de actores locales que, cooperativamente, produce y utiliza energía limpia, pasando de ser meros consumidores a “prosumidores” empoderados [6]. Este enfoque coloca a la comunidad en el centro del sistema energético, permitiendo que aquella sea *dueña de su propia energía* y reciba beneficios económicos directos por su participación [4]. La importancia de las comunidades energéticas ha quedado plasmada en políticas recientes como la *Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas*, lanzada en 2023 y concebida para impulsar proyectos comunitarios de energía renovable en zonas remotas y vulnerables, considerada un paso clave hacia la transición energética justa y equitativa [4].

Paralelamente, el país ha venido adecuando su marco normativo y programático para apoyar una transición inclusiva. El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), entidad encargada de las ZNI, lleva décadas ejecutando proyectos de electrificación rural con soluciones renovables y mixtas. No obstante, la escala del desafío sigue siendo grande: aún existen 1.710 localidades rurales de las cuales alrededor de 128.587 personas solo disponen de electricidad entre cuatro (4) y doce (12) horas al día [7]. Casos como el de Sipí (Chocó), que apenas cuenta con cinco (5) horas diarias de energía mediante una planta diésel, ilustran las condiciones precarias de servicio en muchos municipios aislados [7]. Las causas incluyen la alta dispersión poblacional, costos elevados de generación con combustible fósil y limitaciones presupuestales locales, factores que perpetúan la dependencia de esquemas poco amigables con el medio ambiente [7].

Para enfrentar estas brechas, el Ministerio de Minas y Energía (MME) y otras agencias han desarrollado iniciativas como el *Plan Nacional de Electrificación Rural* y el *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura*, orientados a llevar energía a comunidades rurales mediante interconexión, paneles solares individuales y microrredes autónomas. Igualmente, la planificación energética de largo plazo ha incorporado criterios de resiliencia energética: el Plan Energético Nacional 2020-2050 trazó la transformación de la matriz energética proyectando que, para 2050, las fuentes eléctricas (especialmente renovables) y el gas natural representen cerca del 46% del consumo energético nacional, reemplazando gradualmente la actual preponderancia de diésel y gasolina [8] [9]. Este viraje estratégico busca no solo mitigar el cambio climático, sino también cerrar brechas territoriales asegurando acceso universal a energía moderna.

En efecto, el marco legal ha evolucionado. La Ley 2099 de 2021 [10], conocida como Ley de Transición Energética, modernizó la legislación energética colombiana para promover las energías limpias y la eficiencia energética en todo el país. Esta Ley incentivó la incorporación de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (solar, eólica, biomasa, pequeñas hidro, hidrógeno, etc.), fortaleció los servicios públicos de electricidad y gas combustible en zonas apartadas, y estableció disposiciones para dinamizar el mercado energético con miras a una recuperación económica verde [10].

Importantes modificaciones introducidas por la Ley 2099 [10] como la creación del Fondo Único de Soluciones Energéticas (Fonenergía), así como la actualización de la Ley 1715 de 2014 [11], buscan canalizar recursos e incentivos hacia proyectos renovables y ampliar cobertura en las ZNI [12].

Así mismo, el Gobierno ha expedido regulación específica para viabilizar las comunidades energéticas: el Decreto 2236 de 2023 [13] definió las modalidades de Autogeneración Colectiva (AGC) y Generación Distribuida Colectiva (GDC), fijando un límite de 5 MW por comunidad y estableciendo que estas asociaciones operarán bajo el derecho privado, con libertad para asociarse con otras comunidades o empresas [5].

Dicho decreto que reglamenta el modelo autorizado en el PND 2022–2026 marca un hito al introducir nuevas figuras en la cadena de valor eléctrico, permitiéndole a los ciudadanos organizarse para producir energía y democratizar el servicio, con la expectativa de reducir tarifas y mejorar la confiabilidad en regiones históricamente rezagadas [5].

En suma, el panorama colombiano combina una problemática estructural de desigualdad energética rural con un impulso político-normativo sin precedentes, para transformarla mediante la transición energética justa y la participación comunitaria activa. Por sus condiciones de pobreza, aislamiento geográfico y debilidad institucional, los municipios de sexta categoría están al centro de este reto: en ellos la transición energética no solo debe ser técnicamente sostenible, sino también socialmente justa, económicamente viable y políticamente legitimada, cerrando brechas de acceso y brindando oportunidades de desarrollo local genuino.

De esta manera, las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles surgen como una alternativa prometedora y estratégicamente pertinente para lograr estos objetivos simultáneos. Se trata de vincular a la población local en la generación, la gestión y el uso eficiente de energía limpia, adaptándose a las particularidades socioecológicas de cada territorio y fortaleciendo la autonomía, la resiliencia y la gobernanza democrática de las comunidades rurales.

Sin embargo, llevar esta visión a la práctica conlleva importantes desafíos analíticos, metodológicos y de gestión que es preciso abordar de manera rigurosa e integrada. La presente investigación responde a esta necesidad mediante un enfoque sistémico que articula tres niveles de análisis complementarios:

- **Nivel estructural:** caracterización y tipificación de los doscientos ocho (208) municipios de sexta categoría con el IPEM muy alto, según sus condiciones territoriales, energéticas, sociales y ambientales, con el propósito de identificar patrones diferenciados que orienten la adaptación de soluciones tecnológicas y organizativas a contextos específicos.
- **Nivel dinámico:** modelado de bucles de realimentación mediante metodología sistémica, para comprender las relaciones causales circulares que perpetúan la pobreza energética o, por el contrario, generan ciclos virtuosos de desarrollo sostenible, identificando puntos de apalancamiento estratégico.

- **Nivel estratégico:** aplicación de herramientas de teoría de juegos para analizar los incentivos, equilibrios cooperativos y mecanismos de gobernanza necesarios para alinear los intereses de comunidades, gobiernos locales, empresas y Estado hacia la sostenibilidad de largo plazo de las comunidades energéticas.

Con base en estos tres niveles, la investigación se propone generar conocimiento teórico, metodológico y aplicado que oriente el diseño y la implementación de estrategias integrales para el desarrollo de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en municipios de sexta categoría.

Los hallazgos obtenidos buscan fortalecer la autonomía energética, la resiliencia territorial y la justicia social en contextos rurales vulnerables, contribuyendo así al avance de la transición energética justa en Colombia y aportando insumos relevantes para la formulación de políticas públicas y la gestión territorial descentralizada.

## 1.1 Objetivos

El propósito central de esta investigación es comprender, modelar y proponer estrategias integrales para el desarrollo de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en municipios de sexta categoría en Colombia. Estos territorios enfrentan vulnerabilidades energéticas, institucionales y sociales que limitan su desarrollo y profundizan la pobreza energética (Ministerio de Minas y Energía, 2025a). En este contexto, las comunidades energéticas surgen como instrumentos de empoderamiento local y gestión descentralizada, así como son capaces de promover una transición energética justa mediante el uso eficiente de recursos renovables y la participación activa de la ciudadanía. La articulación entre sostenibilidad, innovación tecnológica y gobernanza colaborativa permite plantear modelos energéticos adaptativos, resilientes y socialmente inclusivos [27].

Los objetivos planteados y las metodologías descritas se aplican al análisis comparativo de doscientos ocho (208) municipios de sexta categoría con IPEM muy alto (Ministerio de Minas y Energía, 2025), ubicados en departamentos como Cauca, Nariño, Chocó, Córdoba, La Guajira, Putumayo, Amazonas, Sucre, Bolívar, Cesar, Magdalena y Boyacá, entre otros. Estos municipios, clasificados según su conexión al SIN, ZNI o sistemas mixtos, constituyen la base territorial sobre la que se construye el modelo de caracterización, simulación y formulación de lineamientos estratégicos del estudio.

La investigación se estructura en torno a cuatro objetivos específicos que abarcan desde la caracterización territorial hasta la formulación de lineamientos de política pública. Se analizan las dinámicas sistémicas que explican la transición energética local mediante modelos causales; además, se aplican herramientas de teoría de juegos para identificar incentivos y equilibrios en la gobernanza comunitaria [14]. Los resultados buscarán ofrecer una base metodológica sólida para orientar políticas de electrificación rural, fortaleciendo la autonomía energética y la resiliencia territorial de comunidades rurales vulnerables, en coherencia con la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15].

### 1.1.1 Objetivo general

Analizar y modelar el sistema energético de los municipios de sexta categoría para diseñar lineamientos que impulsen comunidades energéticas inteligentes y sostenibles, integrando su realidad territorial, las dinámicas sistémicas y los mecanismos de gobernanza. Con ello se busca fortalecer una transición energética justa en zonas rurales vulnerables, garantizando acceso a energía limpia, participación comunitaria y reducción de la pobreza energética según las particularidades de cada territorio

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las tipologías territoriales de los municipios de sexta categoría desde su estructura energética, social y ambiental, identificando factores clave (oferta de recursos, demanda energética, niveles de desarrollo, organización comunitaria, entre otros) que permitan clasificar y diferenciar estos territorios para un análisis focalizado.
- Modelar y analizar los bucles de realimentación que determinan las dinámicas sistémicas de la transición energética a escala municipal, mediante diagramas causales que representen las interacciones no lineales entre

variables críticas como pobreza energética, acceso y calidad del servicio eléctrico, inversión pública y privada, capacidad institucional local, participación comunitaria, sostenibilidad y resiliencia territorial.

- Analizar con teoría de juegos equilibrios e incentivos en la gobernanza energética comunitaria, sopesando distintos escenarios de interacción entre actores (comunidades, gobierno local, empresas, Estado) a fin de determinar qué condiciones favorecen la cooperación, la estabilidad financiera y el cumplimiento de los objetivos de las comunidades energéticas.
- Formular lineamientos de política pública y recomendaciones de gestión territorial que fortalezcan el desarrollo de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles a partir de los hallazgos anteriores. Estos lineamientos incluirán recomendaciones sobre marcos normativos locales, mecanismos de financiamiento, estrategias de capacitación y acompañamiento comunitario, así como esquemas institucionales para escalar las mejores prácticas en municipios de sexta categoría.

## 1.2 Problema y justificación

A pesar de los avances en política pública y del interés creciente por las comunidades energéticas, persiste una brecha entre la intención y la realidad en los municipios rurales más pobres de Colombia. El problema central de esta investigación radica en *cómo desarrollar e implementar modelos efectivos de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en municipios de sexta categoría*, dados los obstáculos estructurales, dinámicos y estratégicos presentes en estos entornos.

Este problema se examina empíricamente en un conjunto de doscientos ocho (208) municipios de sexta categoría con IPEM muy alto, representativos de las condiciones más críticas de pobreza energética rural en Colombia. La clasificación de estos municipios según su conexión al SIN, su pertenencia a ZNI o su configuración en sistemas mixtos permite comparar dinámicas diferenciadas de acceso, confiabilidad y sostenibilidad del suministro eléctrico, fortaleciendo la validez del análisis sistémico propuesto en la investigación.

En términos analíticos, se trata de entender y enfrentar un sistema de problemas interrelacionados:

- **Persistencia de la pobreza energética rural.** Numerosas comunidades de sexta categoría continúan sumidas en la pobreza energética, manifestada no solo como ausencia de conexiones eléctricas, sino también como baja calidad, intermitencia y altos costos del servicio. La evidencia empírica muestra situaciones críticas en zonas rurales dispersas. Por ejemplo, comunidades que apenas cuentan con unas pocas horas de electricidad al día o que dependen de combustibles tradicionales (leña, diésel) para subsistir [7]. Esta precariedad energética contribuye a ciclos de pobreza difíciles de romper, limitando la productividad, la educación, la salud y el bienestar de la población. Así mismo, amplía la brecha entre el campo y la ciudad.

Si bien ha habido programas de electrificación, aún el *47,9% de los habitantes rurales sufre de pobreza energética*, contra solo el 4,3% en ciudades [4]. Lo anterior indica que las soluciones convencionales no han logrado un cierre equitativo de la brecha. ¿Cómo diseñar, implementar y sostener modelos efectivos de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en municipios de sexta categoría, considerando los obstáculos estructurales, dinámicos y estratégicos presentes en estos entornos rurales vulnerables? Esta pregunta refleja el primer componente del problema, a saber: la necesidad de modelos técnicos y organizativos que aseguren acceso universal a energía limpia en contextos de pobreza y aislamiento.

- **Ausencia de modelos adecuados de gobernanza energética local.** Históricamente, la provisión de electricidad en áreas rurales colombianas ha seguido esquemas centralizados o proyectos aislados, con escasa participación de las autoridades municipales y de la comunidad en la toma de decisiones. Los municipios de sexta categoría rara vez cuentan con empresas energéticas propias o con capacidad para gestionar sistemas eléctricos; en cambio, dependen de operadores departamentales, cooperativas limitadas o, incluso, soluciones informales.

Este vacío de *gobernanza energética a escala municipal* implica que no existen aún modelos consolidados de cómo una comunidad local puede organizarse para autogestionar su energía de forma responsable y de largo plazo. La reciente normativa abre la puerta a que comunidades organizadas presten el servicio público eléctrico [5], pero en la práctica surgen *interrogantes sobre su implementación*: ¿qué figura jurídica adoptar?, ¿cómo articularse con el marco regulatorio de electricidad y con los planes de desarrollo municipal?, ¿cómo distribuir roles entre comunidad, alcaldía y empresas?

Además, la gobernanza local se ve dificultada por limitaciones institucionales: las alcaldías de sexta categoría suelen tener capacidades técnicas y administrativas muy limitadas [1]. Muchas carecen de personal especializado en energía o en formulación de proyectos, sus presupuestos son exigüos y dependen de transferencias nacionales, y enfrentan problemas de débil planificación y continuidad administrativa. Todo ello redundando en poca preparación para liderar o acompañar iniciativas energéticas innovadoras. Este déficit institucional y normativo agrava el problema: la falta de un modelo de gobernanza adaptado a la escala local y a las características rurales dificulta la creación y estabilidad de comunidades energéticas.

- **Participación comunitaria incipiente y desafíos socioculturales.** La noción de comunidades energéticas implica colocar a la ciudadanía como protagonista del sistema energético local. No obstante, fomentar una participación comunitaria efectiva presenta retos en municipios donde puede haber desconfianza hacia las instituciones, bajos niveles de organización social o experiencias previas negativas con proyectos externos. Muchas comunidades rurales han sido históricamente objeto de políticas top-down (de arriba hacia abajo), con poca consulta o poco control local, lo que puede generar apatía o escepticismo frente a nuevas iniciativas. Además, la organización comunitaria para gestionar un servicio público requiere cierto capital social (confianza, liderazgo, cohesión) y capital humano (conocimientos técnicos básicos, capacidades de administración), aspectos que varían ampliamente de un territorio a otro.

En algunos municipios, las juntas de acción comunal, las cooperativas agrarias u otras instancias pueden servir de base para una comunidad energética; en otros, habrá que crearlas desde cero y formar líderes locales. Por tanto, parte del problema es cómo lograr la apropiación comunitaria de los proyectos energéticos: sin involucramiento real de la gente local, una instalación de paneles solares o una microrred, difícilmente se convertirá en una comunidad energética en sentido pleno [6]. La experiencia muestra que, si la comunidad no percibe beneficios directos ni tiene poder de decisión, los proyectos pueden fracasar o ser inoperables [6]. En suma, existe una brecha conceptual y práctica sobre *cómo incentivar y sostener la participación comunitaria* en la gestión energética, especialmente en contextos rurales con limitaciones socioeducativas y geográficas.

- **Limitaciones tecnológicas y operativas en contextos rurales.** Si bien las tecnologías de energía renovable (como paneles solares fotovoltaicos, turbinas microhidro, biomasa, eólica de pequeña escala) se han vuelto más asequibles y disponibles, su implementación masiva en zonas rurales alejadas presenta desafíos. Por un lado, cada territorio tiene condiciones distintas (recursos solares o hídricos variables, dispersiones de vivienda, topografía compleja) que exigen soluciones tecnológicas diferenciadas; es decir, no hay un solo modelo técnico aplicable a todos los municipios de sexta categoría. Por otro lado, la operación y el mantenimiento de sistemas descentralizados requieren capacidades locales que no siempre existen.

Un ejemplo lo ofrece el sistema híbrido solar-diésel instalado por el IPSE en las islas de Múcura y Santa Cruz (Bolívar), concebido para brindar energía 24 horas a comunidades afrodescendientes aisladas: al poco tiempo enfrentó fallas por falta de mantenimiento adecuado de baterías e inversores, por la ausencia de un operador local capacitado que realizara mantenimiento preventivo a las plantas [3]. Casos así evidencian que introducir tecnologías limpias sin un esquema robusto de soporte técnico puede derivar en *inestabilidad del servicio o deterioro prematuro de los equipos*. En muchas alcaldías pequeñas no hay ingenieros electricistas y los contratistas externos pueden no estar permanentemente disponibles.

Adicionalmente, las condiciones económicas de la población imponen restricciones: *¿cómo financiar los costos iniciales* de paneles solares, baterías, convertidores o redes de distribución en comunidades de bajos ingresos? Si bien existen fondos públicos (por ejemplo, el Fondo Especial de Compensación de Interés,

FECI, o Fonenergía) y subsidios, articular esas fuentes con iniciativas comunitarias no es trivial. En síntesis, el problema incluye brechas tecnológicas y financieras: elegir las tecnologías apropiadas para cada tipología territorial, garantizar su mantenimiento operativo en el largo plazo y hacerlo de forma costeable para usuarios de escasos recursos.

En conjunto, estos factores describen un sistema complejo de naturaleza sociotécnica: la pobreza energética rural está anclada en estructuras socioeconómicas históricas; las dinámicas de provisión y consumo de energía generan bucles de realimentación (por ejemplo, pobreza  $\Rightarrow$  bajo consumo  $\Rightarrow$  poco interés comercial  $\Rightarrow$  falta de inversión  $\Rightarrow$  pobreza perpetuada); y las decisiones de los actores —Gobierno, comunidades y empresas— responden a incentivos frecuentemente desalineados. La ausencia de modelos de gobernanza local sólidos y las limitaciones institucionales profundizan el carácter estratégico del problema, pues lograr comunidades energéticas exitosas depende de coordinar actores con intereses distintos y capacidades desiguales.

Los tres resultados principales desarrollados en esta tesis emergen como respuestas integrales a este desafío multidimensional.

En primer lugar, la construcción de tipologías territoriales para municipios de sexta categoría permite abordar la dimensión estructural, reconociendo que los territorios rurales no son homogéneos y necesitan soluciones diferenciadas según sus características energéticas, sociales y ambientales. Esta clasificación facilita adaptar las alternativas tecnológicas y organizativas a contextos específicos, como municipios de alta irradiación y dispersión extrema frente a otros con pequeños centros poblados conectados a microcentrales hidroeléctricas.

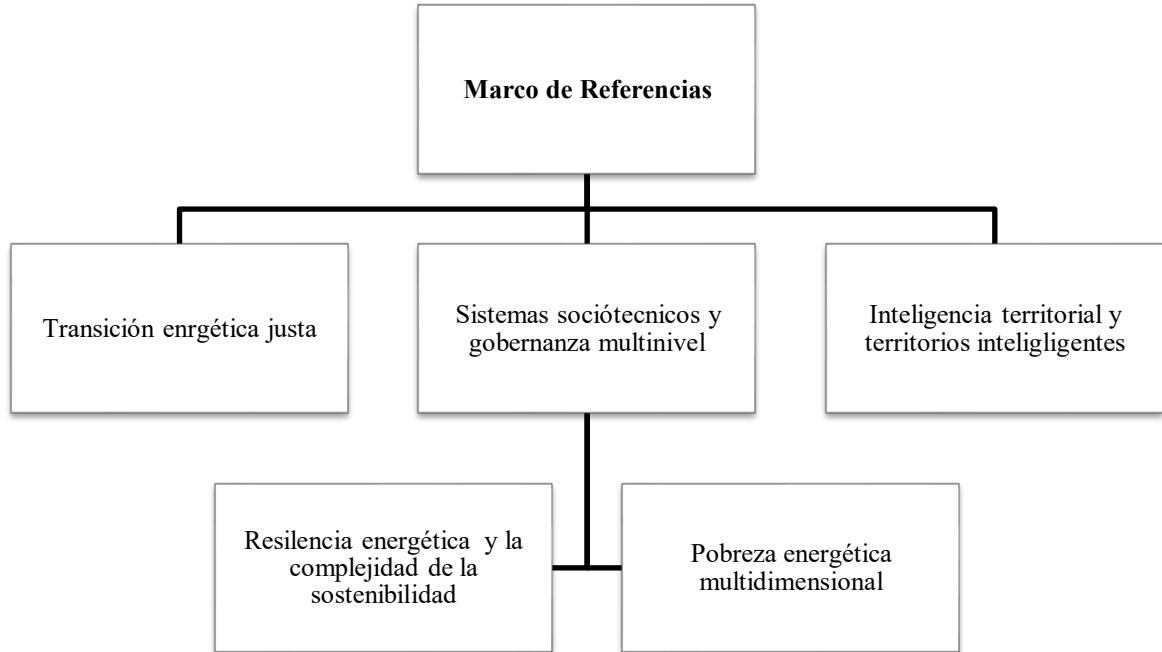
En segundo lugar, el análisis de bucles de realimentación mediante metodología sistémica permite abordar la dimensión dinámica. Este enfoque identifica relaciones de causa y efecto que perpetúan la pobreza energética o que, por el contrario, pueden activar transiciones virtuosas. Modelar estos bucles a través de diagramas causales y esquemas de sistema ayuda a reconocer palancas de cambio clave, como el rol de la capacidad institucional en acelerar la adopción de energías limpias o el impacto de una participación comunitaria efectiva en la calidad y sostenibilidad del servicio.

Finalmente, la aplicación de teoría de juegos y análisis de incentivos aborda la dimensión estratégica del problema. Este enfoque examina cómo interactúan comunidad, autoridades locales, empresas y Gobierno central, permitiendo identificar equilibrios de gobernanza posibles y los incentivos necesarios para que todos cooperen, evitando conflictos o deserciones mediante mecanismos como beneficios compartidos, subsidios condicionados o reglas colectivas de decisión.

En síntesis, la investigación evidencia que comprender simultáneamente la heterogeneidad territorial, las dinámicas sistémicas y los incentivos estratégicos de los actores es indispensable para formular soluciones energéticas transformadoras en contextos rurales vulnerables. Esto conduce a la pregunta central que orienta toda la tesis: **¿cómo diseñar un sistema energético local inteligente y sostenible en municipios rurales pobres, que sea estructuralmente viable, dinámicamente estable y estratégicamente aceptable para todos los actores involucrados?.**

## 2. MARCO DE REFERENCIA

*Figura 1 Marco de Referencias*



*Fuente: elaboración propia*

### 2.1 Marco teórico

En el contexto de la transición energética justa y descentralizada, las *comunidades energéticas inteligentes y sostenibles* se conciben como sistemas sociotécnicos complejos que integran actores, tecnología, instituciones y territorio para lograr objetivos simultáneos de sostenibilidad, equidad e innovación. Esta sección presenta los fundamentos conceptuales de la investigación, articulando tres niveles de análisis complementarios: 1) la comprensión estructural, a través de tipologías territoriales; 2) la comprensión dinámica, mediante bucles de realimentación sistémicos, y 3) la comprensión estratégica, basada en teoría de juegos y equilibrios cooperativos.

Los conceptos y niveles analíticos presentados en este marco teórico se aplican de manera directa a la comprensión de las realidades energéticas y territoriales de doscientos ocho (208) municipios de sexta categoría con IPEM muy alto, que conforman el universo empírico de la tesis. Estos municipios, distribuidos entre zonas interconectadas, no interconectadas y mixtas, ofrecen un contexto idóneo para observar cómo las dinámicas sociotécnicas, institucionales y de gobernanza inciden en la configuración y sostenibilidad de las comunidades energéticas rurales.

Cada nivel se sustenta en conceptos clave de la literatura contemporánea y está vinculado con los hallazgos empíricos y recomendaciones de política del estudio. A continuación, se desarrollan dichos conceptos (*transición energética justa, sistemas sociotécnicos, gobernanza multinivel, inteligencia territorial, resiliencia energética, pobreza energética multidimensional, complejidad de la sostenibilidad, y territorios inteligentes y sostenibles*), explicando su significado, su relevancia y vinculándolos con la realidad de los municipios rurales de sexta categoría en Colombia.

### 2.1.1 Transición energética justa

La noción de transición energética justa enfatiza en que el cambio hacia energías limpias debe ocurrir de manera equitativa, participativa e inclusiva, sin dejar atrás a las comunidades vulnerables. Se trata de incorporar consideraciones de justicia social en las políticas energéticas, de forma que los beneficios y costos de la transición se distribuyan equitativamente y que los actores locales tengan voz en las decisiones [17] [18].

En otras palabras, una transición justa no solo persigue la descarbonización, sino también la equidad territorial y la reducción de brechas socioeconómicas. En el caso colombiano, este principio guía recientes estrategias públicas, por lo cual el Ministerio de Minas y Energía [19] señala que la transición energética nacional debe ser “justa y centrada en las personas”, priorizando el acceso universal, la creación de empleo local y la participación comunitaria en proyectos de energía. Para los municipios de sexta categoría (zonas rurales con altos índices de pobreza), la transición energética justa implica asegurar que las *comunidades energéticas* emergentes contribuyan al mejoramiento de las condiciones de vida (por ejemplo, reduciendo la pobreza energética), al tiempo que empoderen a la ciudadanía en la gestión de los recursos energéticos. Esto se refleja en hallazgos de la investigación como, por ejemplo, la tipología de territorios dispersos identificada en los resultados que destaca la necesidad de subsidios y apoyo estatal focalizado para que las comunidades más aisladas puedan acceder a soluciones renovables, evitando profundizar desigualdades existentes.

Igualmente, las recomendaciones de política pública planteadas en la tesis (verbigracia, la creación de fondos territoriales de transición energética y esquemas tarifarios diferenciales) están orientadas a materializar una transición justa, en la que la equidad en el suministro energético rural sea un criterio central.

### 2.1.2 Sistemas sociotécnicos y gobernanza multinivel

Las comunidades energéticas pueden analizarse como *sistemas sociotécnicos*, es decir, como conjuntos interdependientes de elementos sociales (personas, organizaciones, normas) y tecnológicos (infraestructura, fuentes energéticas, redes) que coevolucionan. Desde la perspectiva de los estudios de transiciones, los sistemas sociotécnicos de energía operan en múltiples niveles: micro (prácticas locales, proyectos piloto), meso (regímenes institucionales y de mercado existentes) y macro (paisaje de tendencias globales y políticas nacionales). La gobernanza multinivel se refiere precisamente a la coordinación entre estos niveles (comunidades locales, gobiernos municipales, autoridades nacionales e incluso redes internacionales) para facilitar innovaciones en energía limpia [20] [21].

Una gobernanza eficaz en múltiples escalas permite alinear incentivos, recursos y conocimientos. Así, por ejemplo, la adopción de energías renovables distribuidas en una vereda rural depende tanto del empoderamiento comunitario (nivel local) como de marcos regulatorios adecuados (nivel nacional) y de financiación climática internacional (nivel global). En un enfoque multinivel, las comunidades energéticas rurales actúan como nichos de innovación que desafían al régimen centralizado tradicional, demostrando soluciones descentralizadas más sostenibles [22]. Para lograr escalar estas innovaciones, se requieren arreglos institucionales flexibles que conecten a las juntas de acción comunal y a las asociaciones locales con entidades gubernamentales (ministerios, UPME, regulador) y con programas internacionales de apoyo técnico o financiero.

La literatura reciente destaca casos exitosos de gobernanza colaborativa en energía. Por ejemplo, en Europa las cooperativas energéticas han prosperado gracias a políticas nacionales habilitantes y a redes municipales de apoyo [23]. En contextos en desarrollo, autores como Odou et al. [24] y Juanpera et al. [25] documentan que la falta de articulación multinivel puede condenar proyectos a la insostenibilidad. Para ilustrar lo mencionado, en África occidental y en los Andes peruanos numerosos sistemas solares o híbridos instalados en comunidades rurales quedaron abandonados u operando por debajo de su capacidad debido a vacíos de gobernanza y seguimiento institucional. La investigación de esta tesis parte de dicho enfoque sociotécnico multinivel: el análisis de bucles de realimentación (Resultado 2) muestra cómo factores sociales (por ejemplo, capital social, liderazgo local), técnicos (mix energético, calidad del suministro) y políticos (apoyo institucional, subsidios) interactúan constantemente.

Además, las simulaciones estratégicas con teoría de juegos (Resultado 3) evidencian que la estabilidad de acuerdos de cooperación depende de variables de nivel macro (es el caso de la credibilidad institucional del Estado), junto con variables de nivel micro (como la confianza dentro de la comunidad). En suma, entender a las comunidades

energéticas como sistemas sociotécnicos exige abordar la **interdependencia** entre tecnología, sociedad y gobierno a diferentes escalas, asegurando que la planificación energética descentralizada incorpore mecanismos de coordinación vertical y horizontal (entre sectores y territorios).

### 2.1.3 Inteligencia territorial y territorios inteligentes

La noción de inteligencia territorial se refiere a la capacidad de un territorio (sea una ciudad, un municipio rural o una región) para aprender, innovar y adaptarse colectivamente ante los desafíos del desarrollo sostenible.

Un *territorio inteligente y sostenible* no es simplemente aquel que aplica tecnologías avanzadas, sino aquel que logra articular de forma sinérgica el conocimiento local, la participación ciudadana, la planeación estratégica y las herramientas técnicas para mejorar el bienestar de su población de manera resiliente [26]. Desde la teoría de sistemas complejos, Redondo y Becerra [27] plantean que la “inteligencia” de un territorio emerge de las interacciones entre actores locales, infraestructuras y flujos de información, generando procesos de autoorganización y aprendizaje colectivo.

Este enfoque rompe con la idea de que las soluciones deben venir *de arriba hacia abajo*; por el contrario, promueve la construcción de conocimiento *de abajo hacia arriba*, aprovechando las redes colaborativas y la innovación social. En el ámbito energético, la *inteligencia territorial* implica que las comunidades locales desarrollen competencias para gestionar sus sistemas energéticos, por ejemplo, mediante la apropiación de tecnologías (paneles solares, microturbinas, medidores inteligentes), la formación de capital humano local (técnicos de energía) y la creación de esquemas organizativos propios (cooperativas, empresas comunitarias). La investigación evidenció múltiples manifestaciones de inteligencia territorial en municipios de sexta categoría: desde arreglos informales de vecinos para mantener microcentrales hidroeléctricas operando, hasta municipios que integran la dimensión energética en sus planes de desarrollo y ordenamiento territorial.

Así mismo, las recomendaciones de política pública abogan por fortalecer esta inteligencia local, por ejemplo, mediante *escuelas energéticas rurales* en alianza con el SENA, o plataformas digitales de monitoreo participativo, reconociendo que, a largo plazo, la sostenibilidad de las soluciones depende de que la comunidad se empodere como gestora de su propio desarrollo energético. En esencia, convertir a los municipios rezagados en “territorios inteligentes y sostenibles” requiere no solo llevar paneles solares, sino también nutrir procesos de innovación social y gobernanza local que permitan aprovechar al máximo esas tecnologías en función del bienestar comunitario [26].

### 2.1.4 Resiliencia energética y la complejidad de la sostenibilidad

El concepto de resiliencia energética alude a la capacidad de un sistema energético para resistir, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones externas como desastres naturales, fluctuaciones de mercado o cambios políticos [26]. En comunidades rurales aisladas la resiliencia energética es crucial, pues puede significar la diferencia entre mantener el servicio eléctrico básico durante una inundación o que la población quede a oscuras por semanas. La resiliencia tiene dimensiones técnicas (robustez de la infraestructura, diversificación de fuentes), pero también sociales e institucionales (capacidad de organización comunitaria, planes de contingencia, apoyo externo disponible).

Por su parte, cuando se habla de la complejidad de la sostenibilidad se subraya que la sostenibilidad es un atributo *emergente* de sistemas con múltiples interdependencias, y no simplemente el resultado de optimizar un indicador (económico, ambiental o social) aislado [4]. En un sistema complejo cambios pequeños pueden tener efectos no lineales y las soluciones suelen implicar balances y sinergias entre subsistemas (ambiental, sociocultural, económico, técnico). Aplicado a comunidades energéticas, un enfoque de sostenibilidad desde la complejidad implica considerar simultáneamente la viabilidad financiera de los proyectos, la conservación de los ecosistemas locales (por ejemplo, cuencas hidrográficas si se trata de microhidroeléctricas), la aceptación social y equidad en el acceso, y la compatibilidad con políticas nacionales e internacionales de clima, entre otras.

Los *bucles de realimentación* modelados en esta tesis (Resultado 2) son precisamente una representación de esa complejidad. Así se identificaron ciclos virtuosos donde mejoras en la confiabilidad de la energía aumentan la productividad local, lo que a su vez genera ingresos para reinvertir en el sistema, reforzando la resiliencia [14][15]. También se hallaron bucles, como el *círculo vicioso* de pobreza energética: altos costos o baja calidad del servicio limitan el desarrollo económico local, erosionando la capacidad de pago e inversión, lo que perpetúa la precariedad

energética [28]. Comprender estos bucles permite intervenciones más integrales. Por ejemplo, para romper un bucle de pobreza energética se requieren políticas combinadas (subsidios inteligentes, educación energética, mejora institucional local, etc.), en lugar de acciones aisladas.

La literatura apoya esta visión sistémica: estudios en África [28] evidencian que proyectos que no incorporan planes de mantenimiento y modelos económicos robustos terminan fallando cuando se retira el apoyo inicial[17]. En cambio, aquellos que fortalecen las capacidades locales y diversifican fuentes financieras muestran una evolución en el tiempo. Por tanto, la *sostenibilidad con perspectiva de sistemas complejos* en territorios rurales exige abordar conjuntamente la infraestructura, la sociedad y el ambiente como un todo interconectado. Dicho principio guía las recomendaciones de esta tesis, las cuales integran objetivos de transición energética con adaptación climática, desarrollo productivo local y fortalecimiento institucional, reconociendo que la resiliencia de largo plazo solo surge de ese enfoque.

### **2.1.5 Pobreza energética multidimensional**

Tradicionalmente, la pobreza energética se ha entendido como la falta de acceso a servicios modernos de energía. No obstante, recientes avances en Colombia y el mundo proponen un enfoque multidimensional para medirla, análogo al usado para la pobreza en general [27]. El IPEM desarrollado por el Ministerio de Minas y Energía [36] define la pobreza energética como la privación simultánea en varias dimensiones relacionadas con la energía: cantidad y calidad de la electricidad disponible, modalidades de cocción utilizadas, acceso a electrodomésticos y tecnologías de la información, entre otras. Este índice revela matices importantes. Por ejemplo, según el primer informe oficial, el 18,5% de los colombianos son pobres energéticamente, porcentaje que se eleva dramáticamente en zonas rurales (cerca del 48%) [27].

Muchas familias rurales pueden no ser consideradas pobres monetariamente o por el índice general de pobreza multidimensional, pero sí sufren pobreza energética (es el caso de 6,2 millones de colombianos, según estimaciones recientes) [27]. Las implicaciones son profundas: un hogar puede tener ingresos por encima de la línea de pobreza, pero si cocina con leña no tiene refrigeración ni iluminación adecuada y carece de conexión a internet. De esta forma, su *bienestar real* y sus oportunidades de desarrollo están muy limitadas [27]. La transición energética justa reclama abordar esta forma de pobreza de manera decidida. En efecto, para los municipios de sexta categoría analizados la reducción del IPEM es un objetivo explícito resaltado tanto en la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15] como en la propuesta propia de políticas.

Al clasificar las comunidades energéticas por tipologías (Resultado 1), se encontró que aquellas en ZNI y con alta dispersión poblacional presentan los mayores índices de pobreza energética multidimensional, requiriendo intervenciones focalizadas. Las soluciones pasan no solo por llevar paneles solares o turbinas, sino por integrar componentes educativos (para usar eficientemente la energía), proveer electrodomésticos básicos y mejorar las condiciones de vivienda ligadas al confort térmico. En suma, la noción multidimensional de pobreza energética amplía la mirada de la política pública: de simplemente contar nuevos usuarios conectados pasa a garantizar un uso significativo de la energía para mejorar la calidad de vida (educación, salud, productividad) [27]. Esta visión permea el enfoque de la tesis, que vincula los resultados técnicos con metas sociales, una comunidad energética “inteligente” debe evaluarse también por su capacidad de sacar a sus miembros de la pobreza energética a través de un suministro confiable, limpio y asequible que potencie su desarrollo humano.

### **2.1.6 Síntesis del marco teórico**

En síntesis, el marco teórico aquí expuesto proporciona una base sólida para entender el fenómeno estudiado. Conceptos como transición justa, sistemas sociotécnicos y gobernanza multinivel permiten situar la investigación en la intersección entre tecnología, sociedad y política. En esta perspectiva, nociones como inteligencia territorial, complejidad de la sostenibilidad y resiliencia orientan la mirada hacia las sinergias y realimentaciones de largo plazo, lejos de visiones simplistas o unidimensionales. Finalmente, la incorporación de la pobreza energética multidimensional y la noción de territorios inteligentes y sostenibles ancla la discusión en las metas últimas de equidad y bienestar territorial.

Todos estos elementos teóricos se entrelazan en la presente tesis para analizar y explicar las comunidades energéticas rurales en Colombia en varios planos. Estructuralmente, como parte de un territorio desigual que demanda

descentralización; dinámicamente, como sistemas vivos que aprenden y se adaptan, y estratégicamente, como escenarios donde actores con distintos incentivos deben cooperar bajo marcos normativos específicos. Este andamiaje conceptual respalda las recomendaciones de política formuladas, orientadas a una descentralización energética con equidad territorial e inteligencia local, coherente con los principios aquí descritos.

*Tabla 1. Enfoques y relaciones de los hallazgos de la literatura*

| <b>Enfoque</b>                                        | <b>Principales aportes de la literatura</b>                                                                                                      | <b>Relaciones clave con las comunidades energéticas</b>                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Transición energética justa</b>                    | Enfatiza equidad social, territorial e inclusión en la descarbonización. Requiere participación comunitaria y redistribución de beneficios.      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• La TEJ guía la necesidad de que las comunidades energéticas reduzcan pobreza energética y empoderen a municipios de sexta categoría.</li> <li>• Justifica subsidios focalizados y modelos de gestión local para evitar brechas urbano-rurales.</li> </ul> |
| <b>Sistemas sociotécnicos y gobernanza multinivel</b> | La energía es una interacción tecnología–sociedad–instituciones. Requiere coordinación entre niveles local, regional y nacional.                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Explica por qué proyectos fracasan si no se alinean incentivos locales, institucionales y regulatorios.</li> <li>• Los bucles sistémicos muestran que variables sociales, técnicas y políticas están interconectadas.</li> </ul>                          |
| <b>Inteligencia territorial</b>                       | Capacidad del territorio para aprender, adaptarse e innovar colectivamente. No depende solo de tecnología, sino de tejido social y organización. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• La sostenibilidad de comunidades energéticas depende del capital social, formación comunitaria y liderazgo local.</li> <li>• Justifica propuestas como escuelas energéticas rurales y plataformas participativas.</li> </ul>                              |
| <b>Resiliencia energética y complejidad</b>           | La resiliencia depende de infraestructura, capacidades sociales e institucionales. Los sistemas son no lineales y dependen de bucles dinámicos.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los bucles del sistema muestran ciclos virtuosos (productividad–reinversión–resiliencia) y ciclos viciosos (pobreza–baja calidad–desinversión).</li> <li>• Las intervenciones deben ser integrales, no aisladas.</li> </ul>                               |
| <b>Pobreza energética multidimensional (IPEM)</b>     | No se limita al acceso, incluye calidad, asequibilidad, tecnologías de cocción, electrodomésticos y conectividad.                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los municipios de sexta categoría presentan los mayores IPEM, lo que exige soluciones adaptadas por tipologías territoriales.</li> <li>• Orienta la formulación de comunidades energéticas como</li> </ul>                                                |

|                                                                                 |                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                 |                                                                                                                                                      | instrumentos para salir de la pobreza energética.                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Perspectivas internacionales de comunidades energéticas</b>                  | Experiencias exitosas basadas en cooperativas, modelos híbridos, almacenamiento y gobernanza transparente. Riesgos de elitización si no hay equidad. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• La comparación internacional evidencia que la confianza, reglas claras y participación amplia son críticas.</li> <li>• Los modelos europeos y asiáticos sirven como referentes para fortalecer gobernanza y financiamiento comunitario.</li> </ul>                                   |
| <b>Literatura en contextos rurales y en desarrollo</b>                          | Éxito depende de gobernanza local, tarifas sostenibles, participación real y diversidad tecnológica (solar, microhidro, híbridos).                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coincide con hallazgos del estudio: proyectos fracasan por falta de mantenimiento, institucionalidad o apropiación comunitaria.</li> <li>• Sustenta el diseño de tipologías territoriales diferenciadas.</li> </ul>                                                                  |
| <b>Gobernanza energética participativa y justicia distributiva</b>              | Democracia energética: las comunidades deben tener voz, control y beneficios. Requiere reglas, transparencia y corresponsabilidad.                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El análisis con teoría de juegos muestra que la cooperación solo emerge con reglas claras, incentivos correctos y sanciones creíbles.</li> <li>• Se refuerza la necesidad de manuales de gestión comunitaria y acuerdos participativos.</li> </ul>                                   |
| <b>Transición energética descentralizada e inclusión territorial</b>            | Para ser justa, la descentralización debe priorizar territorios rezagados. Tecnologías deben adaptarse a contextos socioculturales.                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se conecta con la clasificación de tipologías y la propuesta de intervenciones diferenciadas.</li> <li>• Justifica políticas públicas para fortalecer territorios con mayor vulnerabilidad energética.</li> </ul>                                                                    |
| <b>Marco normativo: Leyes 142, 143, 1715, 2099, PND 2022–2026, Decreto 2236</b> | Evolución desde un modelo centralizado a uno que habilita la generación distribuida y comunidades energéticas. Persisten barreras regulatorias.      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El soporte jurídico permite que comunidades gestionen energía, pero exige simplificar trámites y adecuar exigencias a municipios pequeños.</li> <li>• Se articula con propuestas de política pública de tu tesis (simplificación, flexibilización y apoyo institucional).</li> </ul> |

*Fuente: elaboración propia*

## 2.2 Estado del arte

El estudio del estado del arte sobre comunidades energéticas se enmarca en el contexto global de la transición hacia sistemas energéticos inteligentes y sostenibles, descentralizados e inclusivos. A nivel internacional, las comunidades energéticas se consolidan como un instrumento clave para democratizar la energía y promover la participación activa

de la ciudadanía en la generación, la gestión y el consumo de recursos renovables bajo modelos cooperativos y de gobernanza compartida [14] [34].

La literatura reciente evidencia una expansión significativa de estas experiencias en Europa, Asia y América Latina, impulsadas por innovaciones tecnológicas como los sistemas híbridos con almacenamiento hidroeléctrico y solar flotante, que fortalecen la estabilidad y eficiencia de las microrredes locales [31] [32]. En los contextos rurales y en desarrollo, las comunidades energéticas adquieren un papel estratégico en la universalización del acceso a la energía y la resiliencia territorial, articulando soluciones *off-grid* con modelos participativos de gestión comunitaria [24] [25] [28].

En América Latina, particularmente en Colombia, la institucionalización de la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15] y los avances metodológicos para la medición de la pobreza energética multidimensional [33] representan hitos relevantes hacia una transición energética justa, sustentada en la equidad territorial y la corresponsabilidad institucional. En conjunto, este estado del arte integra perspectivas técnicas, sociales y normativas para comprender la evolución de las comunidades energéticas como núcleos articuladores de la transformación hacia territorios sostenibles e inteligentes [27].

### **2.2.1 Perspectivas internacionales sobre comunidades energéticas**

En Europa y otros contextos desarrollados el concepto de comunidad energética se ha convertido en un instrumento central de la política climática y de la participación ciudadana. Las directivas europeas 2018/2001 (Energías Renovables II) y 2019/944 (Mercado Interior de la Electricidad) formalizaron las figuras de comunidad de energía renovable y comunidad ciudadana de energía, lo que permitió a ciudadanos, municipios y pequeñas cooperativas convertirse en actores activos de la transición energética [14].

Durante el periodo 2021–2025 se ha observado una expansión significativa de las experiencias de gobernanza energética descentralizada en Europa y Asia [14] se analizaron comunidades energéticas en Italia, demostrando que la confianza social y la cooperación institucional son determinantes para la perdurabilidad de los proyectos. De forma complementaria, Elliot et al. [34] identifican que las tendencias globales en almacenamiento energético comunitario están redefiniendo los modelos de propiedad y gestión energética, integrando tecnologías de baterías, almacenamiento térmico e hidrógeno, con estructuras de gobernanza híbridas entre lo público, lo privado y lo ciudadano.

La innovación tecnológica en energías distribuidas ha tenido un papel decisivo. Irshad et al. [32] demostraron que los sistemas híbridos que integran energía solar flotante y almacenamiento hidroeléctrico por bombeo (Floating PV–PHS) representan una alternativa costo-eficiente para garantizar estabilidad de red y suministro continuo, especialmente en países con grandes cuerpos de agua y alta radiación solar. Estos hallazgos complementan los de Bory et al. [31], quienes documentaron cómo las microcentrales hidroeléctricas autónomas pueden operar de manera eficiente mediante control electrónico adaptativo, fortaleciendo la autosuficiencia energética local.

Sin embargo, la literatura también advierte desafíos persistentes. De hecho, Elliot et al. [34] destacan los riesgos de “elitización” de las comunidades energéticas, de manera que solo los hogares con capacidad de inversión acceden a los beneficios de la autogeneración, mientras que los sectores vulnerables permanecen marginados. A su vez, Ceglia et al. [14] señalan la necesidad de marcos regulatorios que incentiven la participación equitativa y la redistribución de beneficios dentro de las comunidades. En conjunto, estas investigaciones refuerzan la idea de que la sostenibilidad debe ir acompañada del componente técnico, social y de gobernanza inclusiva.

### **2.2.2 Literatura en contextos rurales y en desarrollo**

En los países en desarrollo, las comunidades energéticas se vinculan directamente con la agenda de acceso universal a la energía. La evidencia más reciente muestra una convergencia entre los enfoques de electrificación rural, sistemas híbridos *off-grid* y modelos de gestión comunitaria. Odou et al. [24] evaluaron sistemas híbridos fotovoltaico-diésel en Benín, concluyendo que la viabilidad técnica y económica de las microrredes rurales depende de la participación activa de las comunidades y de la existencia de tarifas que garanticen la estabilidad financiera. En la misma línea, Muh y Tabet [28] analizaron proyectos híbridos en Camerún, encontrando que los subsidios temporales sin

fortalecimiento de la gobernanza local conducen a la desarticulación comunitaria y al deterioro de los sistemas una vez finalizado el apoyo externo.

Desde América Latina, Juanpera et al. [25] aportaron una evaluación longitudinal de proyectos de electrificación rural en Perú, evidenciando que el éxito sostenido de las microrredes depende tanto de la calidad técnica como del modelo de gestión social. Su investigación, basada en veintiocho (28) indicadores multidimensionales, demuestra que los proyectos con comités energéticos locales presentan mayores tasas de funcionamiento sostenido que aquellos gestionados externamente.

A nivel global, López-Castrillón et al. [29] realizaron una revisión sistemática de ciento sesenta y ocho (168) estudios sobre sistemas híbridos *off-grid*, identificando que el 70 % combina energía solar y eólica con baterías como principal forma de almacenamiento. Sin embargo, los autores destacan que pocos estudios incorporan biomasa o microhidro, y que la mayoría asume condiciones ideales de operación. Más recientemente, Gizaw y Bekele [30] diseñaron un sistema híbrido ecológico para comunidades insulares en Etiopía, demostrando que la integración óptima de energía solar, eólica e hidráulica puede reducir costos de generación y emisiones de CO<sub>2</sub>, mejorando simultáneamente el acceso a energía.

Estos trabajos coinciden en señalar que la sostenibilidad de los sistemas rurales no depende únicamente de su desempeño técnico, sino de la articulación entre tecnología, gobernanza y economía local. La presente tesis se inscribe en esta línea al proponer tipologías sociotécnicas que permiten adaptar los modelos de generación comunitaria a las particularidades de los municipios colombianos de sexta categoría, superando el enfoque único y estandarizado.

### **2.2.3 Gobernanza energética participativa y justicia distributiva**

El concepto de democracia energética, entendido como la redistribución del poder en la toma de decisiones sobre energía, ha cobrado fuerza en los últimos años [27]. Llama la atención que en Europa y América Latina este enfoque se ha traducido en mecanismos concretos de participación, por lo que incluye cooperativas energéticas, presupuestos participativos para proyectos renovables y procesos de remunicipalización de servicios eléctricos.

Redondo y Becerra [27] sostienen que la transición hacia territorios sostenibles exige abandonar la gobernanza jerárquica y avanzar hacia modelos colaborativos, en los que las comunidades energéticas puedan autogestionarse y negociar de igual a igual con empresas y gobiernos. En este sentido, Bory et al. (2021) [31] demostraron que la interacción entre confianza social, transparencia y desempeño técnico es clave para mantener equilibrios cooperativos estables en el tiempo.

En Colombia, la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15] institucionaliza esta visión, proponiendo escuelas de gestión comunitaria, metodologías de acompañamiento social y mecanismos de corresponsabilidad. El Manual de Gestión de Comunidades Energéticas [15] y la Metodología General de la Estrategia Nacional [15] establecen un marco operativo para fortalecer la gobernanza local, con especial énfasis en la transparencia, la participación de mujeres y la articulación con organizaciones comunitarias.

Este enfoque coincide con la literatura internacional más reciente, que muestra que la cooperación sostenida entre comunidad, empresa y Estado requiere credibilidad institucional, reglas claras y mecanismos de sanción ante incumplimientos [14] [34]. Nuestra investigación aporta un modelo teórico complementario, basado en teoría de juegos evolutiva, lo que permite identificar las condiciones bajo las cuales emergen equilibrios cooperativos o conflictivos en la gestión energética comunitaria.

### **2.2.4 Transición energética descentralizada e inclusión territorial**

La descentralización energética y la inclusión territorial son pilares de una transición justa. López-Castrillón et al. [29] y Ramírez et al. [17] han argumentado que la adopción de tecnologías renovables no garantiza por sí misma una transición equitativa, si no se acompaña de políticas redistributivas que benefician a las regiones históricamente marginadas. De manera similar, Bory et al. [31] mostraron que las microhidroeléctricas comunitarias en el país vasco no solo mejoraron la estabilidad energética, sino que fortalecieron la cohesión social y promovieron proyectos

productivos locales. De manera similar, Irshad et al. [32] evidencian que los sistemas híbridos con almacenamiento hidroeléctrico pueden reducir emisiones y costos, garantizando confiabilidad en regiones aisladas.

En el caso colombiano, el documento metodológico para medir la pobreza energética multidimensional [33] y el *Informe sobre Pobreza Energética Multidimensional* [33] proporcionan un marco analítico para comprender las desigualdades territoriales en el acceso a la energía. Estos documentos identifican correlaciones entre pobreza energética, ruralidad, género y pertenencia étnica, lo que refuerza la necesidad de diseñar políticas diferenciadas por tipo de territorio. Finalmente, en Ciudades y Territorios Inteligentes y Sostenibles [27] se plantea una visión sistémica que integra complejidad, resiliencia y gobernanza multinivel, ofreciendo herramientas para vincular la energía comunitaria con el desarrollo territorial. La presente tesis articula estos niveles (estructural, dinámico y estratégico), mostrando que una transición verdaderamente justa requiere tanto infraestructura descentralizada como gobernanza cooperativa e instituciones corresponsables.

## 2.3 Marco Normativo

El éxito de las comunidades energéticas inteligentes en Colombia depende en gran medida del marco jurídico e institucional que las habilite. En esta sección se analiza críticamente la evolución de la normativa colombiana relevante, desde las leyes de servicios públicos y electricidad de los años 90 hasta las políticas más recientes de transición energética y descentralización. Se abordan, en particular, i) el régimen de servicios públicos domiciliarios y energía eléctrica (Leyes 142 y 143 de 1994); ii) las leyes de promoción de energías renovables y transición [10] [11], junto con la política nacional plasmada en el Conpes 4075 de 2022; iii) las normas de ordenamiento territorial y ambientales que inciden en proyectos energéticos locales (Ley 388 de 1997; Ley 1931 de 2018), y iv) las iniciativas específicas para comunidades energéticas y reducción de pobreza energética (Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas 2024, Documento metodológico IPEM 2025, Manual de Gestión de Comunidades Energéticas 2024, Metodología General de la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas, Plan Energético Nacional 2024–2050, y desarrollos del PND 2022–2026). Se busca clarificar cómo este entramado normativo puede habilitar o limitar la consolidación de comunidades energéticas inteligentes, y cómo se relaciona con las recomendaciones de política pública propuestas en las tesis orientadas a la descentralización, la equidad territorial y la participación local.

### 2.3.1 Régimen de servicios públicos y electricidad: bases y retos para la descentralización

La Ley 142 de 1994 (Ley de Servicios Públicos Domiciliarios) y Ley 143 de 1994 (Ley Eléctrica) establecieron el marco fundamental que aún rige el sector energético colombiano. Estas normas, expedidas en el contexto de las reformas de la apertura económica de la década de los años 90, introdujeron criterios de eficiencia empresarial, competencia en generación y participación privada en la prestación de los servicios públicos. En particular, la Ley 143 reorganizó la industria eléctrica bajo un modelo centrado en el *Mercado Mayorista* (bolsa de energía) y en la separación de actividades (generación, transmisión, distribución, comercialización).

Si bien este marco logró importantes avances en cobertura eléctrica nacional (se pasó de ~70% de cobertura en 1994 a ~97% en 2018), también consolidó un esquema altamente centralizado. Por ello, pocas empresas (públicas o privadas) controlan la generación y operan las redes regionales, mientras que los usuarios rurales alejados quedaron en muchos casos relegados a programas especiales. La Ley 143 definió las ZNI y confió al Estado, a través de entidades como el IPSE, la misión de atenderlas con soluciones aisladas.

Sin embargo, esas soluciones se gestionaron típicamente como proyectos aislados con subsidios, sin integrar a las comunidades en su administración. Por otro lado, la Ley 142 permitió la posibilidad de que organizaciones comunitarias prestaran servicios públicos, pero bajo exigencias difíciles de cumplir para poblaciones pequeñas (por ejemplo, constitución de empresa, sujeción al régimen de la Superintendencia de Servicios Públicos). En la práctica, muy pocas comunidades rurales asumieron directamente la prestación del servicio eléctrico, de manera que predominó el modelo de *contratistas* operadores de las ZNI o la extensión de redes por empresas existentes con financiación estatal. Este contexto legal durante décadas fue poco propicio para el surgimiento de verdaderas comunidades energéticas: no había un reconocimiento formal de figuras de generación comunitaria ni incentivos para la autogestión local. Adicionalmente, el esquema tarifario nacional, construido sobre subsidios cruzados por estratos socioeconómicos, aseguraba tarifas bajas para los más pobres, pero a costa de depender siempre del suministro centralizado, sin estimular la producción local. Un efecto no deseado señalado por analistas [35] es que la

priorización de eficiencia económica y cobertura agregada, por encima de la participación social, generó desconexión con las realidades territoriales.

La planificación energética se hacía centralmente (planes de expansión de UPME) y los municipios tenían poco margen de incidencia, más allá de aportar terrenos o facilitar permisos. Esto constituye un **límite estructural** para las comunidades energéticas al propiciar un ordenamiento jurídico pensado para empresas grandes, con ciudadanos vistos solo como clientes y no como agentes activos. En la tesis se argumenta que este legado normativo explica en parte las debilidades institucionales actuales en sexta categoría. Por ejemplo, la ausencia de unidades técnicas de energía en los municipios, la dependencia casi total de recursos nacionales (Fondo de apoyo Financiero para Energización de Zonas No Interconectadas o FAZNI, Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas o FAER) para invertir en proyectos y la falta de cultura de gestión energética local.

No obstante, también existen disposiciones en las Leyes 142 y 143 que pueden servir de palanca para la descentralización: la posibilidad de crear *empresas de servicios públicos mixtas o comunitarias*, los fondos de apoyo como el FAER y el Programa de Normalización de Redes Eléctricas (PRONE), y la exención de requisitos de mercado para proyectos menores en ZNI. Estos resquicios fueron aprovechados en algunos casos (cooperativas eléctricas preexistentes en Boyacá, por ejemplo), demostrando que con ajustes reglamentarios se podía permitir mayor involucramiento local.

En su componente normativo, las recomendaciones de política de esta tesis sugieren precisamente modernizar aspectos del régimen de servicios públicos para bajar las barreras de entrada a esquemas comunitarios, por ejemplo, adaptando exigencias contables y de calidad al tamaño de los proyectos y permitiendo que varias comunidades se asocien para prestar el servicio bajo esquemas supervisados pero flexibles. En conclusión, las leyes base de 1994 sentaron cimientos para un sector eléctrico eficiente y extenso, pero no previeron el modelo distribuido y participativo que hoy se busca impulsar; superarlas implica reformas reglamentarias e interpretaciones innovadoras que ya se han comenzado a discutir en la última década.

### 2.3.2 Leyes de energías renovables y transición energética: habilitando la generación distribuida

Un punto de inflexión en la normativa colombiana lo marcó la Ley 1715 de 2014, “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional” [11]. Esta Ley, pionera en la región, reconoció la importancia de las fuentes renovables (solar, eólica, biomasa, pequeñas hidro, geotermia) y creó incentivos concretos: exenciones arancelarias y tributarias para equipos, depreciación acelerada y esquemas de medición neta para auto generadores. La Ley 1715 [11] introdujo figuras clave como el aerogenerador a pequeña escala (AGPE) y la generación distribuida (GD), las cuales permitieron por primera vez que usuarios residenciales, comerciales o comunidades locales pudieran instalar capacidad de generación y entregar excedentes a la red.

Aunque la Ley no hablaba explícitamente de “comunidades energéticas”, sí abrió la puerta a proyectos colectivos mediante el concepto de *autogeneración colectiva*. Por otra parte, la 1715 [11] creó el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), orientado a financiar proyectos de FNCE, especialmente en ZNI. Durante los años posteriores se expidieron regulaciones (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], Resoluciones 30 de 2018, 174 de 2021, entre otras) que operacionalizaron la medición neta, definieron las condiciones de conexión de pequeños generadores, etc. No obstante, en la práctica la adopción fue lenta y concentrada en usuarios industriales y comerciales con capacidad de inversión, más que en comunidades de bajos ingresos.

Con la Ley 2099 de 2021 (Ley de Transición Energética) [10] Colombia actualizó y amplió el alcance de la 1715 [11][48][51]. Además de reafirmar los incentivos existentes, la Ley 2099 [10] impulsó nuevas áreas como el hidrógeno verde y azul, el almacenamiento energético, la movilidad eléctrica y las respuestas activas de la demanda.

En cuanto a descentralización y comunidades, si bien tampoco mencionó textualmente las “comunidades energéticas”, sí fortaleció el marco para la generación distribuida y ordenó al Gobierno promover “*nuevos agentes y formas de transar energía... sin dejar de ser ambiental y socialmente sostenible*”. La ley 2099 [10] también modificó mecanismos financieros: transformó el FAER y el FAZNI en un fondo denominado Fonenergía, buscando agilizar la ejecución de proyectos en zonas apartadas. Un aspecto importante es que en el artículo 20 de la Ley 2099 [10] se

facultó al Ministerio de Minas para incentivar el desarrollo de energéticos de fuentes renovables y “promoción de otros usos alternativos”, un cajón de sastre normativo que luego sirvió como sustento para iniciativas piloto de comunidades energéticas (por ejemplo, proyectos de autogeneración comunitaria con biogás).

Complementariamente, el PND 2018-2022 (Ley 1955 de 2019) incluyó metas de diversificación de la matriz energética, preparando el terreno para una política de transición energética que se concretó en el documento Conpes 4075 de 2022. Aprobado a finales del gobierno anterior, el Conpes 4075 es quizás el instrumento más explícito en delinear una visión de transición energética *con participación ciudadana*: establece entre sus ejes estratégicos la promoción de comunidades energéticas y la atención especial a zonas con menor acceso. Si bien un Conpes no tiene fuerza de ley, sí marca la hoja de ruta interinstitucional. En la práctica, su impacto se evidencia en que para los años 2022 y 2023 se destinaron recursos de regalías y de cooperación a proyectos demostrativos de comunidades energéticas (por ejemplo, los primeros cinco proyectos piloto anunciados en 2022 abarcaron localidades en La Guajira, Chocó, Tolima, Nariño y Santander).

Por último, el actual PND 2022-2026 (Ley 2294 de 2023) dio un paso significativo al definir legalmente las comunidades energéticas en Colombia. En su artículo 235, el PND establece que los usuarios podrán constituir comunidades energéticas para generar, comercializar y usar eficientemente energía de fuentes renovables, incluyendo disposiciones sobre quiénes pueden conformarlas y la posibilidad de acceder a recursos públicos para infraestructura. Esto implica un reconocimiento formal sin precedentes: se pasa de iniciativas puntuales a una figura jurídicamente respaldada. Además, el PND 2022-2026 enmarca estas comunidades dentro de la “Transición Energética Justa en Colombia”, es decir, las concibe como instrumentos para lograr los objetivos de equidad y sostenibilidad que el Gobierno actual prioriza.

Para operacionalizar esa visión, el Gobierno expidió el Decreto 2236 de 2023 [13] que reglamenta parcialmente el artículo 235 del PND, agregando al Decreto Único del Sector Energía (1073 de 2015) las condiciones para el registro y funcionamiento de comunidades energéticas. Entre otras cosas, el Decreto 2236 [13] y normas asociadas encomiendan a la CREG adaptar la regulación de red y comercialización para estos esquemas, considerando criterios diferenciales en ZNI y en el SIN. También indican que las comunidades energéticas podrán recibir infraestructura financiada con recursos públicos en cesión a título gratuito bajo ciertas condiciones, lo cual es un cambio importante frente al modelo tradicional en el que el Estado conservaba la propiedad de activos en ZNI.

En resumen, las leyes 2099 y 1715 [10] [11], junto con los Conpes y PND recientes, habilitan jurídicamente la transición hacia la generación distribuida y las comunidades energéticas. Han creado los mecanismos para que pequeños actores entren al mercado (medición neta, contratos bilaterales), han establecido fondos de financiamiento y, más recientemente, han legitimado la figura comunitaria. Sin embargo, persisten desafíos normativos: la regulación detallada de la CREG aún debe ajustarse para esquemas tarifarios especiales, calidad del servicio en microrredes, responsabilidad de respaldo, etc. Además, es crucial que la implementación no quede solo en el papel, por lo que, por ejemplo, aunque existe la opción de autogeneración comunitaria, muchas cooperativas rurales reportan trámites engorrosos para obtener permisos o conectarse al SIN, lo cual desincentiva su participación. La tesis recomienda simplificar y “regionalizar” cierta regulación, esto es, dar margen a autoridades locales y empresas territoriales para pactar soluciones con comunidades, en línea con la nueva política de transición descentralizada.

En definitiva, Colombia cuenta ya con un armazón legal para la transición energética moderna. El reto ahora es afinarlo para que sirva eficazmente a una transición energética justa y desde los territorios.

### **2.3.3 Ordenamiento territorial, política ambiental y nuevas herramientas para comunidades energéticas**

La consolidación de comunidades energéticas inteligentes no solo depende de leyes sectoriales de energía, sino también de los marcos de **ordenamiento territorial** y **ambientales** que regulan el uso del suelo, los recursos naturales y la planificación local. En Colombia, la **Ley 388 de 1997** (Ley de Desarrollo Territorial) y sus decretos reglamentarios establecieron que los municipios deben formular planes de ordenamiento territorial (POT), integrando componentes como uso del suelo, equipamientos, medioambiente y servicios públicos. Si bien la Ley 388 no menciona explícitamente la planificación energética, sí ofrece instrumentos para que las entidades territoriales orienten proyectos de infraestructura acordes con sus vocaciones y limitantes.

Por ejemplo, un POT puede delimitar áreas aptas para proyectos energéticos (como distritos solares en suelo rural) o incluir dentro de sus *programas de ejecución* iniciativas de energías renovables comunitarias. En la práctica, pocos POT de municipios pequeños han incorporado la dimensión energética más allá de señalar la necesidad de ampliar cobertura. No obstante, la legislación habilita esa posibilidad y algunos departamentos han comenzado a alentarla mediante lineamientos. Uno de los hallazgos de esta tesis es precisamente la importancia de articular las comunidades energéticas con el ordenamiento territorial. Así se recomienda que los proyectos comunitarios se inserten en los instrumentos de planificación local (POT, planes de desarrollo territoriales) para asegurar su permanencia y coherencia con otras inversiones.

Por ejemplo, si un municipio define en su POT un ecoparque energético en un corregimiento con buen potencial solar, será más fácil canalizar recursos y alianzas para hacerlo realidad y proteger ese suelo de otros usos incompatibles. En cuanto al marco ambiental, la Ley 1931 de 2018 estableció las directrices de gestión del cambio climático, incluyendo la obligación de formular Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales (PIGCCT) para cada departamento. Estos planes ofrecen una ventana para vincular acciones de mitigación y adaptación climática con comunidades energéticas. De esta forma, por ejemplo, un PIGCCT departamental podría priorizar proyectos de energías renovables en municipios con alta vulnerabilidad climática, o fomentar comunidades energéticas para reducir emisiones por uso de leña.

Finalmente, en el ámbito de instrumentos específicos para comunidades energéticas Colombia cuenta desde 2024 con dos documentos fundamentales: la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas y el Manual de Gestión de Comunidades Energéticas [15]. La Estrategia Nacional (versión metodológica general) traza un modelo de implementación que incluye la focalización de territorios prioritarios, la definición de tipologías de soluciones (conectadas, aisladas o mixtas) y la identificación de barreras para escalar estos proyectos. Además, introduce un glosario donde define *democratización energética*, *sostenibilidad de comunidades energéticas*, *usuario de comunidades energéticas*, etc., creando un lenguaje común para todos los actores involucrados.

Por su parte, el Manual de Gestión [15] es una guía práctica para llevar a cabo proyectos comunitarios: establece fases desde la *viabilidad* (Momento 0) hasta la *consolidación y operación* (Momento 4), con procedimientos detallados para conformar la organización comunitaria, elaborar el diseño técnico, conseguir financiación y operar/mantener la solución. Este Manual responde a la necesidad de llenar un vacío de capacidades. Si bien muchas comunidades o alcaldías pequeñas no sabrían por dónde empezar para montar una “comunidad energética”, el Manual les provee herramientas (formatos de acuerdos de voluntades, listas de verificación técnicas, módulos de capacitación, la llamada Escuela TEJ, o de Transición Energética Justa). Un aspecto valioso es que incorpora lineamientos de gobernanza multinivel. Así, por ejemplo, sugiere crear comités de energía locales con representación de autoridades y comunidad, y articularse al Registro de Comunidades Energéticas (RCE) que llevará el Ministerio.

También enfatiza en la perdurabilidad en el tiempo, recomendando planes de negocios que aseguren recursos para reposición de baterías, etc., y promoviendo la *economía popular energética* (uso productivo de la energía para que la misma comunidad genere ingresos). En línea con la política nacional, el Plan Energético Nacional 2024-2050 (UPME) plantea escenarios donde la generación distribuida podría cubrir un porcentaje significativo de la demanda, especialmente si se desarrollan comunidades energéticas en zonas rurales y periurbanas. Este plan largo plazo vincula la transición energética con la transformación digital y la participación ciudadana, proyectando para 2050 un sistema más descentralizado y resiliente.

*Tabla 2. Marco normativo colombiano*

| Norma                                             | Año         | Aportes principales                                                                                                 | Relevancia para comunidades energéticas                                                                                                   |
|---------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ley 142 – Servicios Públicos Domiciliarios</b> | <b>1994</b> | Regula la prestación de servicios públicos; define régimen tarifario, deberes y derechos de prestadores y usuarios. | Permite que organizaciones comunitarias presten servicios, aunque con barreras altas. Base inicial para considerar esquemas comunitarios. |

|                                                             |             |                                                                                                                |                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ley 143 – Ley Eléctrica</b>                              | <b>1994</b> | Organiza el sector eléctrico bajo un modelo centralizado; define actividades y crea el Mercado Mayorista.      | Establece ZNI pero sin enfoque participativo. Punto de partida del marco energético moderno.        |
| <b>Ley 388 – Ordenamiento Territorial</b>                   | <b>1997</b> | Introduce POT, uso del suelo, instrumentos urbanísticos y planificación territorial.                           | Permite incorporar proyectos energéticos en POT y zonas específicas para infraestructura renovable. |
| <b>Ley 1715 – Energías Renovables</b>                       | <b>2014</b> | Incentiva FNCE; crea FENOGÉ; regula autogeneración y generación distribuida; beneficios tributarios.           | Primer gran habilitador de proyectos colectivos de energía renovable y autogeneración comunitaria.  |
| <b>Ley 1931 – Gestión del Cambio Climático</b>              | <b>2018</b> | Crea PIGCCT; lineamientos de mitigación y adaptación climática.                                                | Integra proyectos energéticos comunitarios a estrategias de adaptación y financiación climática.    |
| <b>Ley 2099 – Ley de Transición Energética</b>              | <b>2021</b> | Moderniza la Ley 1715; impulsa hidrógeno, almacenamiento, movilidad eléctrica; transforma fondos a Fonenergía. | Amplía incentivos y financiación para proyectos descentralizados y comunitarios.                    |
| <b>Conpes 4075 – Política de Transición Energética</b>      | <b>2022</b> | Establece hoja de ruta nacional; prioriza democratización energética y participación ciudadana.                | Reconoce de forma estratégica a las comunidades energéticas como instrumento de política.           |
| <b>Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022–2026</b>          | <b>2023</b> | Artículo 235 reconoce jurídicamente las comunidades energéticas; autoriza generación, uso y gestión eficiente. | Primer reconocimiento legal formal. Habilita acceso a recursos públicos y esquemas de operación.    |
| <b>Decreto 2236 – Reglamento de Comunidades Energéticas</b> | <b>2023</b> | Reglamenta el artículo 235 del PND; define modalidades (AGC y GDC), requisitos, límites y gobernanza.          | Instrumento operativo clave para conformar y registrar comunidades energéticas.                     |
| <b>Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas</b>       | <b>2024</b> | Lineamientos metodológicos, enfoque territorial, tipologías y barreras.                                        | Marco técnico y social para implementar proyectos comunitarios en zonas vulnerables.                |
| <b>Manual de Gestión de Comunidades Energéticas</b>         | <b>2024</b> | Guía práctica de gobernanza, roles, etapas y sostenibilidad.                                                   | Herramienta para estructurar y gestionar comunidades energéticas en territorio.                     |

*Fuente: elaboración propia*

#### 2.3.4 Análisis normativo

Ahora bien, ¿cómo habilitan o limitan estas normativas la consolidación de comunidades energéticas inteligentes? Por el lado habilitante, se destaca que la existencia de incentivos económicos (exenciones de Ley 1715/2099) [10] [11] hace viables proyectos antes prohibitivos; la definición legal en PND 2023 brinda seguridad jurídica a las comunidades para organizarse y recibir apoyos; la estrategia nacional y el manual ofrecen rutas claras de actuación, lo cual disminuye la improvisación, y la integración con políticas de cambio climático y desarrollo rural asegura coherencia intersectorial (por ejemplo, fondos de desarrollo rural podrían alinearse con fondos energéticos si comparten metas).

Adicionalmente, normativas complementarias como el Conpes 4158 de 2023 (Transición Energética Justa y Descentralizada, actualmente en estructuración) y el anunciado Conpes de Pobreza Energética 2025 van en la dirección de asignar recursos e importancia política al tema. Por el lado limitante, subsisten barreras: el exceso de tramitología y centralización en la regulación (autorizaciones, licencias) puede dilatar proyectos comunitarios, por lo cual se recomienda en la tesis crear *ventanillas únicas* regionales para comunidades energéticas. Otra limitación es la capacidad institucional: muchas alcaldías y comunidades no cuentan con personal técnico jurídico para aprovechar estos marcos, de manera que, aunque el manual ayudará, hará falta asistencia técnica continuada de la UPME, del SENA o de universidades.

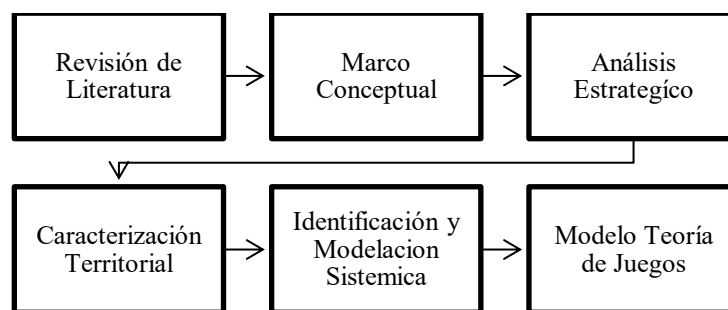
También hay tensiones normativas. De hecho, la supervisión de la Superintendencia de Servicios Públicos a comunidades energéticas (exigida por el PND) podría resultar demasiado onerosa si se aplica con los mismos criterios que a una empresa de servicios públicos. Se requerirá adaptar las exigencias de calidad y reporte a la escala comunitaria, evitando ahogar a estas iniciativas nacientes. En cuanto al régimen tarifario, la actual estructura de subsidios y contribuciones no contempla bien la figura de prosumidores comunitarios: si una comunidad genera la mayor parte de su energía, ¿cómo se le aplica el cargo de respaldos, pérdidas o los subsidios a terceros? Estos detalles están en discusión en la CREG en 2024 para ajustarse (Documento CREG 901-099 de 2024).

Finalmente, un riesgo normativo es la discontinuidad política, pues muchas medidas están en políticas de Gobierno (Conpes, estrategias) y no en leyes. Un cambio de administración podría relegar la prioridad dada a las comunidades energéticas. Por ello, algunas recomendaciones apuntan a incorporar principios de transición justa y democratización energética en leyes permanentes (por ejemplo, la próxima Ley de Cambio Climático o la reforma a la Ley 142) para blindar estos avances.

En conclusión, el marco normativo colombiano ha evolucionado de un modelo centralizado clásico a uno que, al menos en el papel, fomenta la descentralización y la participación en el sector energía. Las leyes y políticas vigentes ofrecen herramientas valiosas (incentivos económicos, figuras legales, estrategias metodológicas y sinergias con agendas de desarrollo territorial) para que las comunidades energéticas florezcan. No obstante, la efectividad de estas normas dependerá de su implementación y de subsanar detalles reglamentarios pendientes. Las recomendaciones de esta tesis en materia de política pública como simplificar trámites, fortalecer asistencia técnica local, crear fondos territoriales y ajustar regulaciones, buscan precisamente operacionalizar el espíritu de la normativa reciente, asegurando que las comunidades energéticas inteligentes pasen de ser una aspiración legal a una realidad en el terreno, contribuyendo a una transición energética verdaderamente justa, equitativa y sustentable en los municipios más rezagados de Colombia.

### 3. METODOLOGÍA

*Figura 2 Metodología*



*Fuente: elaboración Propia*

La investigación adoptó un enfoque metodológico de naturaleza analítica, descriptiva y explicativa, enmarcado en una perspectiva *sistémica y sociotécnica*. Esto significa que se combinan múltiples métodos para abordar el objeto de estudio en tres niveles complementarios. En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo-estructural de los municipios de sexta categoría, recolectando y examinando datos sobre su contexto energético (cobertura eléctrica,

fuentes utilizadas, potencial de recursos renovables), socioeconómico (indicadores de pobreza, desarrollo humano, demografía) y ambiental (condiciones geográficas, ambientales y climáticas relevantes).

Las fuentes de información incluyeron una amplia *revisión documental* de literatura científica y de informes técnicos, el *análisis normativo* de leyes, decretos y planes nacionales relacionados (Ley 2099 de 2021, PND 2022-2026, Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas, etc.), así como *datos oficiales* provenientes de entidades como el DANE, el IPSE, la UPME y el MME. La triangulación de estas fuentes permitió construir una base de conocimiento sólida sobre la situación actual y el marco institucional pertinente.

En segundo lugar, sobre la base de la caracterización anterior se implementó un método sistémico para el análisis dinámico. Se emplearon diagramas causales y técnicas de modelado de sistemas para identificar las relaciones de causa y efecto entre los elementos del sistema energético local. Este enfoque involucró la realización de talleres conceptuales y consultas con expertos para mapear los bucles de realimentación. Para lo anterior se diagramaron bucles que ilustran cómo la mejora en la oferta de energía renovable puede impactar positivamente en la productividad local y, a su vez, en la reducción de la pobreza, o cómo la falta de mantenimiento de una tecnología puede degradar el servicio y desalentar la participación comunitaria.

Dichos diagramas sistémicos proporcionan una visión *explicativa* de las dinámicas complejas, iluminando puntos de apalancamiento donde intervenciones específicas podrían generar cambios significativos. La triangulación analítica se aseguró también mediante la comparación de estos hallazgos con casos de estudio documentados de comunidades energéticas (tanto exitosas como fallidas) en Colombia y Latinoamérica, extrayendo lecciones relevantes.

En tercer lugar, se incorporó una dimensión estratégica a través de la aplicación de la *teoría de juegos*. Este componente metodológico, de corte más analítico-formal, consistió en construir modelos simplificados de interacción entre actores clave del entorno de una comunidad energética.

Se definieron juegos representativos como, por ejemplo, uno de cooperación tipo dilema del prisionero modificado para reflejar la decisión de una comunidad de invertir (o no) en un proyecto energético con apoyo gubernamental, o un juego de bienes públicos para modelar la contribución de diferentes usuarios al mantenimiento de una microrred comunitaria. Mediante estos modelos se identificaron los posibles equilibrios de Nash y se exploró cómo distintos(as) *incentivos o penalizaciones* podrían mover el equilibrio hacia escenarios deseables de colaboración. Se analizaron estrategias dominantes de agentes como el Gobierno, priorizando la equidad y la empresa, buscando rentabilidad, o la comunidad, buscando minimizar riesgos.

De la misma manera, se evaluaron mecanismos (subsídios condicionados al desempeño, tarifas con componentes solidarios, contratos asociativos con reparto de beneficios, etc.) para alinear estas estrategias. La teoría de juegos brindó un marco riguroso para entender en qué condiciones cada parte estaría dispuesta a participar activamente en la comunidad energética, y qué diseños institucionales podrían fomentar la estabilidad y evitar el oportunismo o la desvinculación de algún actor.

Cabe destacar que la presente investigación de tipo no experimental se basa principalmente en la *síntesis teórica* y el *análisis de información secundaria*, complementada con algunas *consultas a expertos y actores locales* para validar supuestos. No obstante, la integración de métodos (descriptivo, sistémico y estratégico) le otorga un carácter multidisciplinario y triangulado, aumentando la confiabilidad de los hallazgos. Se hicieron esfuerzos por contrastar los resultados de los distintos enfoques, de modo que las tipologías territoriales derivadas de datos cuantitativos se contrastaron con percepciones cualitativas de campo. Además, los diagramas causales se revisaron frente a evidencias empíricas de casos reales y las conclusiones de los modelos de teoría de juegos se discutieron a la luz de experiencias prácticas documentadas en informes y literatura.

Como resultado final de este proceso metodológico, la tesis propone un modelo conceptual integrado para el impulso de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en municipios de sexta categoría. Dicho modelo sintetiza las dimensiones estructural, dinámica y estratégica estudiadas, sirviendo como *herramienta de orientación* para la formulación de políticas públicas y estrategias de gestión territorial. En particular, el modelo permite identificar qué tipo de intervención (verbigracia, la de enfoques tecnológicos versus la de fortalecimiento institucional) es más

pertinente en cada tipología de municipio, cómo las acciones en un frente impactan otras partes del sistema, evitando así soluciones aisladas que puedan fallar y qué incentivos deben alinearse para asegurar la colaboración de todos los involucrados. De este modo, la metodología empleada no solo genera nuevo conocimiento académico sobre el fenómeno de las comunidades energéticas rurales, sino que busca también proporcionar insumos prácticos para autoridades y comunidades en la construcción de una transición energética justa en Colombia.

A continuación, se desarrollan los principales hallazgos de la investigación, los cuales se estructuran en tres resultados interrelacionados que conforman un sistema de análisis progresivo: las tipologías de comunidades energéticas en municipios de sexta categoría, la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles, el análisis de equilibrios e incentivos a partir de la teoría de juegos y las recomendaciones de política pública aplicada al desarrollo energético y territorial. La elección de estos cuatro ejes responde a la necesidad de articular la comprensión estructural, dinámica y estratégica de las comunidades energéticas en contextos rurales y periféricos de Colombia, donde la transición energética justa debe adaptarse a realidades territoriales caracterizadas por la escasez de recursos, la desigualdad socioespacial y la baja densidad institucional [36].

En conjunto, los tres resultados ofrecen una lectura integral del fenómeno de las comunidades energéticas desde tres perspectivas complementarias: la estructural, centrada en la caracterización tipológica; la dinámica, orientada a los procesos de aprendizaje y a la autoorganización, y la estratégica, enfocada en la interacción y los incentivos. Esta progresión analítica le permite al lector transitar desde un plano descriptivo hacia un marco explicativo y prospectivo, en el que la energía se entiende como un vector de transformación territorial y social.

## **4. TIPOLOGÍAS DE COMUNIDADES ENERGÉTICAS EN MUNICIPIOS DE SEXTA CATEGORÍA**

### **4.1 Introducción**

La transición energética justa en Colombia exige una comprensión profunda de las heterogeneidades territoriales y sociales que caracterizan al país. En particular, los municipios de sexta categoría, definidos por su limitada capacidad fiscal, baja densidad poblacional, altos niveles de pobreza energética y condiciones diferenciadas de conexión eléctrica, representan un desafío estratégico para la consolidación de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles.

Estos territorios incluyen municipios plenamente integrados al SIN, aquellos localizados en ZNI y los de carácter mixto, donde coexisten ambas condiciones. En ellos la energía trasciende su dimensión técnica para convertirse en un bien social y cultural que determina las oportunidades de bienestar, productividad y equidad. En este contexto, clasificar las comunidades energéticas según tipologías territoriales se vuelve una herramienta fundamental para el diseño de estrategias de planificación descentralizada más precisas, capaces de reconocer la diversidad de contextos locales y orientar políticas públicas hacia la reducción del IPEM [36].

La noción de tipología, entendida aquí como una forma de sistematizar patrones espaciales, socioeconómicos y energéticos, se inscribe en una perspectiva de análisis territorial complejo. En efecto, los municipios de sexta categoría en Colombia presentan combinaciones diversas de aislamiento geográfico, vocación productiva, disponibilidad de recursos energéticos locales y vulnerabilidad ambiental. Por tanto, la tipificación permite pasar de una visión homogénea de la ruralidad a un enfoque diferenciado, en el cual las comunidades energéticas emergen como sistemas sociotécnicos adaptativos. Esta aproximación resulta coherente con la propuesta metodológica de la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15], que plantea la identificación de contextos energéticos diferenciados como paso previo a la estructuración de soluciones técnicas, sociales y de gobernanza.

Desde un punto de vista epistemológico, la clasificación de comunidades energéticas puede interpretarse como un ejercicio de análisis de sistemas complejos, en el que los municipios se consideran nodos dentro de un entramado territorial dinámico. Según Redondo y Becerra [27], los territorios inteligentes y sostenibles se conciben como sistemas autoorganizados en los que la inteligencia surge de la interacción entre actores, infraestructuras y flujos de información. Este enfoque propone que la sostenibilidad no se alcanza mediante soluciones únicas o lineales, sino mediante trayectorias adaptativas que combinan aprendizaje social, tecnología y gobernanza. Aplicado al campo

energético, ello implica que las comunidades deben ser vistas como sistemas vivos, capaces de aprender, gestionar y coevolucionar con su entorno físico y social.

En esta línea de sentido, las tipologías de comunidades energéticas constituyen una herramienta para interpretar la madurez energética de los municipios de sexta categoría. Cada tipología expresa un nivel distinto de articulación entre recursos naturales, capacidades comunitarias y mecanismos de gestión. En términos analíticos, se distinguen fases progresivas de desarrollo energético: una fase básica, centrada en el acceso mínimo a la electricidad mediante soluciones individuales; una fase productiva, donde la energía se integra con actividades económicas locales, y una fase inteligente, caracterizada por la autogestión y el uso de sistemas híbridos interconectados. Esta secuencia refleja el tránsito hacia comunidades energéticas inteligentes y sostenibles que, además de proveer energía, fortalecen el tejido social y promueven la resiliencia territorial [29].

Para llevar a cabo el análisis, se integraron datos de diversas fuentes oficiales. Se utilizaron principalmente los indicadores territoriales disponibles en TerriData del Departamento Nacional de Planeación (DNP), los registros del Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM) proporcionados por la UPME, y la información suministrada por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) acerca de las Zonas No Interconectadas (ZNI).

TerriData ofreció un amplio conjunto de datos demográficos, socioeconómicos, de infraestructura y servicios para todos los municipios del país. El IPEM –desarrollado por el Ministerio de Minas y Energía y operado por la UPME– permitió focalizar el estudio en municipios con privaciones de pobreza energética multidimensional severas, identificando cuáles califican con un IPEM “Muy Alto”. Adicionalmente, la información del IPSE resultó clave para distinguir aquellos municipios de sexta categoría ubicados fuera del Sistema Interconectado Nacional (SIN), es decir, en ZNI o con sistemas eléctricos aislados, dado que en estos territorios las condiciones de suministro energético son particularmente precarias. La triangulación de estas fuentes garantizó una base de datos integral sobre las características territoriales, sociales y energéticas de los municipios en análisis.

Una vez recopilados, los datos fueron descargados, depurados y sistematizados en una base unificada. Se llevó a cabo un proceso de limpieza para corregir inconsistencias y filtrar únicamente las variables relevantes para el estudio. Posteriormente, la información consolidada se organizó en archivos de Excel estructurados por temáticas y variables clave, facilitando su consulta y análisis.

Entre las temáticas consideradas se incluyeron demografía, indicadores socioeconómicos (como pobreza multidimensional y necesidades básicas insatisfechas), educación, salud, infraestructura de servicios públicos, seguridad, inversión pública e indicadores productivos, entre otros. Sobre esta base depurada se identificaron específicamente los 952 municipios de sexta categoría del país, destacando dentro de ellos los 208 municipios cuyo IPEM es calificado como *Muy Alto*. Estos 208 municipios –que representan la muestra central del estudio– fueron marcados y aislados en la base de datos para un análisis focalizado. De este modo, el archivo consolidado permitió caracterizar y comparar de forma consistente las condiciones territoriales y energéticas de los municipios objetivo, sirviendo como insumo para las siguientes etapas del estudio.

Con la base de datos finalizada, se procedió a un análisis exploratorio apoyado en herramientas de visualización. La información fue importada a Power BI, donde se diseñaron tableros temáticos interactivos que permitieron examinar las variables por categoría de forma dinámica y visual. Cada tablero abordó un eje temático específico, revelando patrones dentro del conjunto de municipios de sexta categoría con IPEM muy alto. A continuación, se resumen los hallazgos principales observados en cada componente temático, tal como se evidenciaron en los paneles visuales:

- **Demografía:** Los datos poblacionales confirman que se trata de municipios pequeños y mayoritariamente rurales. La mayoría de estas localidades cuentan con menos de 10.000 habitantes (umbral de la sexta categoría) y en muchos casos con poblaciones efectivas por debajo de 5.000 personas. Un rasgo común es la alta dispersión poblacional: en promedio, más de las *dos terceras partes* de sus habitantes residen en zonas rurales dispersas, con solo una fracción menor concentrada en la cabecera municipal. Este patrón demográfico refleja el aislamiento de sus comunidades y plantea desafíos para la prestación de servicios básicos a lo largo del territorio. Por ejemplo, se observó que varios municipios amazónicos y del Chocó

combinan baja densidad demográfica con vastas áreas geográficas, lo que dificulta las soluciones de infraestructura convencionales.

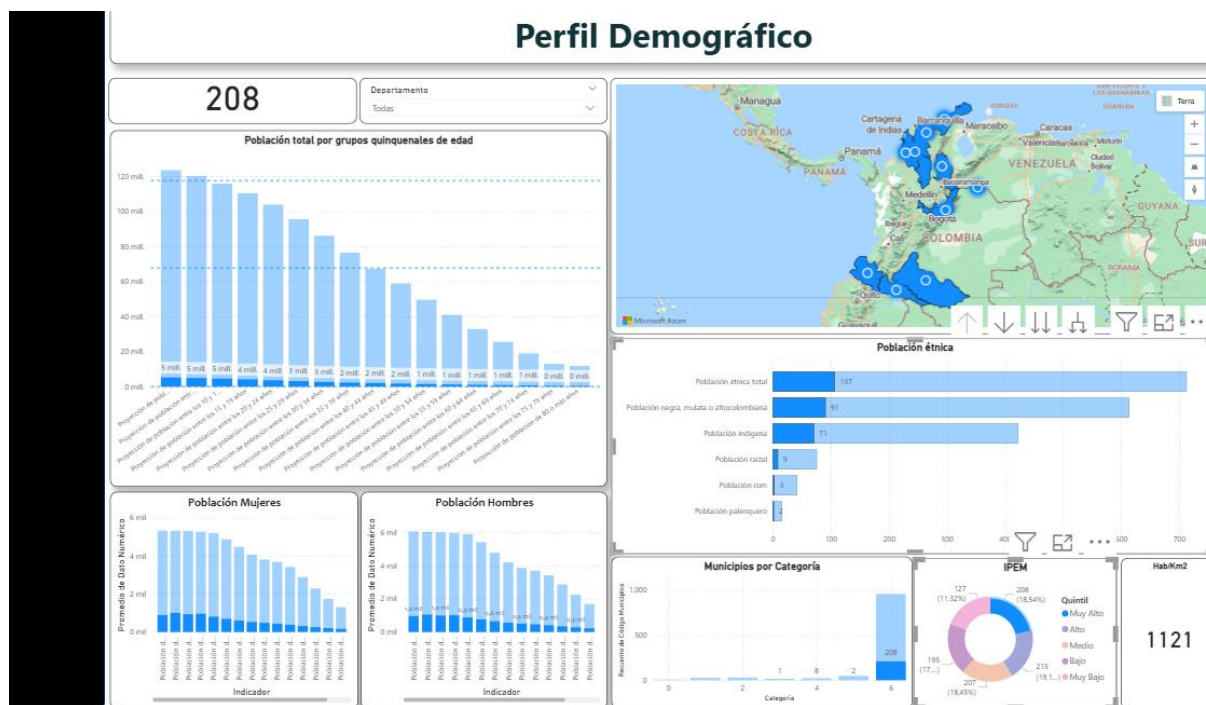


Figura 3 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Perfil Demográfico. Fuente: elaboración propia.  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Socioeconómico:** Los indicadores socioeconómicos muestran niveles críticos de pobreza y bajo desarrollo humano. Prácticamente todos estos municipios registran índices muy elevados de necesidades básicas insatisfechas y pobreza multidimensional. En muchos casos, más del 70% de la población se encuentra en condición de pobreza multidimensional, cifra muy superior al promedio nacional. Asimismo, los ingresos locales son bajos y la informalidad laboral es predominante. Estos territorios carecen de bases económicas sólidas, dependiendo en gran medida de transferencias estatales y economías de subsistencia. Un ejemplo notorio es la alta incidencia de NBI en municipios de la Guajira y Córdoba presentes en la muestra, donde las carencias en vivienda digna, saneamiento y acceso a bienes básicos superan el 80%, evidenciando el rezago socioeconómico estructural.

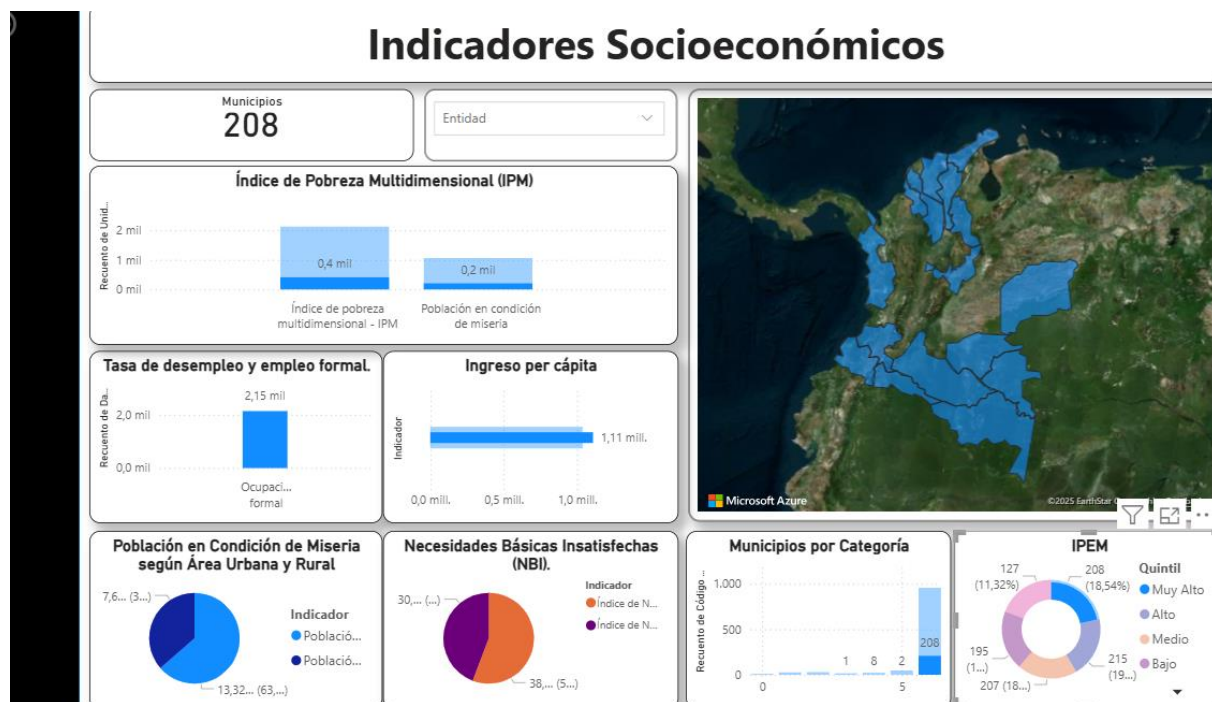


Figura 4 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Perfil Socioeconómicos. Fuente: elaboración propia.  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Educación:** En el plano educativo se evidencian atrasos significativos. Las tasas de analfabetismo son de dos dígitos en varios de estos municipios, reflejando que una proporción importante de adultos no culminó la educación básica. La cobertura educativa también es limitada: en numerosas localidades menos de la mitad de los jóvenes culminan la educación secundaria, ya sea por falta de oferta educativa local (escasez de instituciones de bachillerato) o por la necesidad de migrar a centros urbanos para continuar estudiando. Igualmente, el promedio de años de escolaridad de la población es bajo en comparación con los promedios nacionales. Por ejemplo, departamentos como Cauca y Nariño muestran municipios en la muestra con menos de 6 años promedio de educación formal, lo que indica interrupciones tempranas en la trayectoria educativa. Esta brecha educativa se traduce en menores capacidades locales para la gestión de proyectos y adopción de nuevas tecnologías.

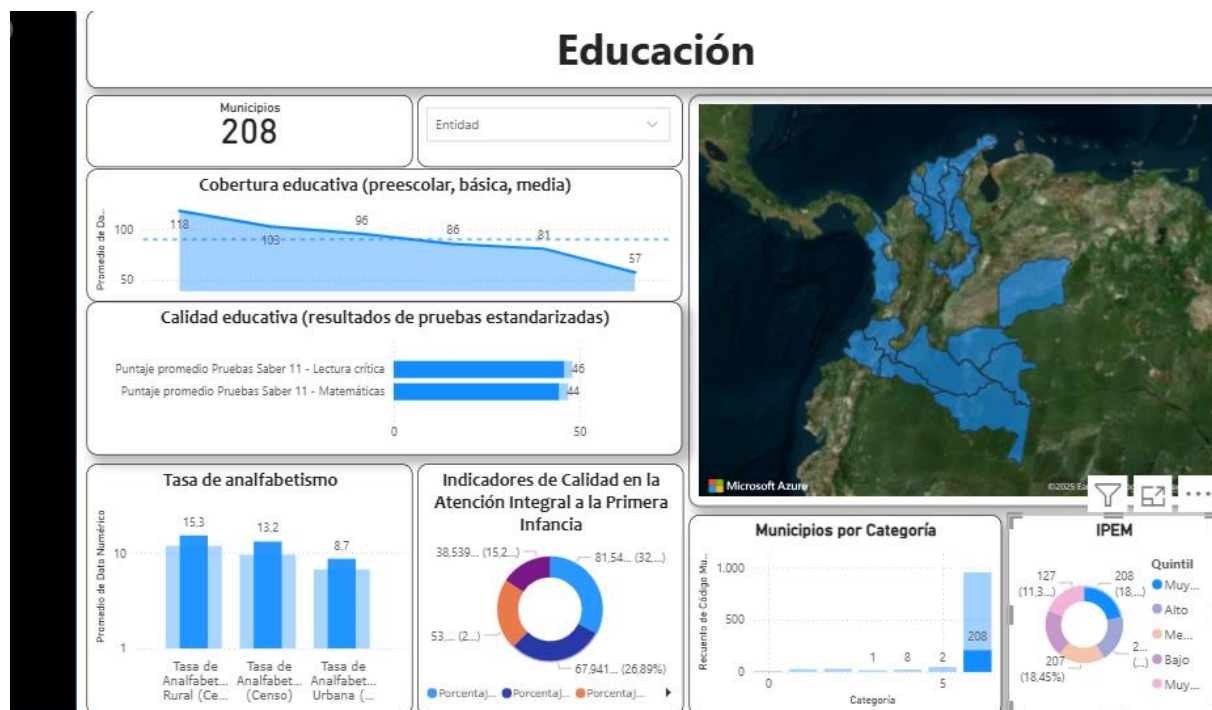


Figura 5 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Perfil Educación. Fuente: elaboración propia.  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Salud:** Los indicadores de salud confirman limitaciones en la cobertura y calidad de los servicios sanitarios. Muchos de estos municipios carecen de hospitales plenamente dotados y solo cuentan con centros de atención primaria con capacidades restringidas. Se observaron altas tasas de mortalidad infantil y materna en comparación con estándares nacionales, señal de deficiencias en la atención básica y preventiva. Asimismo, persisten problemas de desnutrición crónica en la niñez y enfermedades transmitidas por agua no tratada en zonas rurales. Varios municipios de la Amazonía y Orinoquía, por ejemplo, exhiben índices elevados de enfermedades tropicales endémicas y deben referir pacientes a la cabecera departamental debido a la falta de personal médico especializado. La cobertura de aseguramiento en salud, si bien ha mejorado con los años, aún no garantiza acceso efectivo en territorios alejados donde las distancias y dificultades de transporte impiden una atención oportuna.

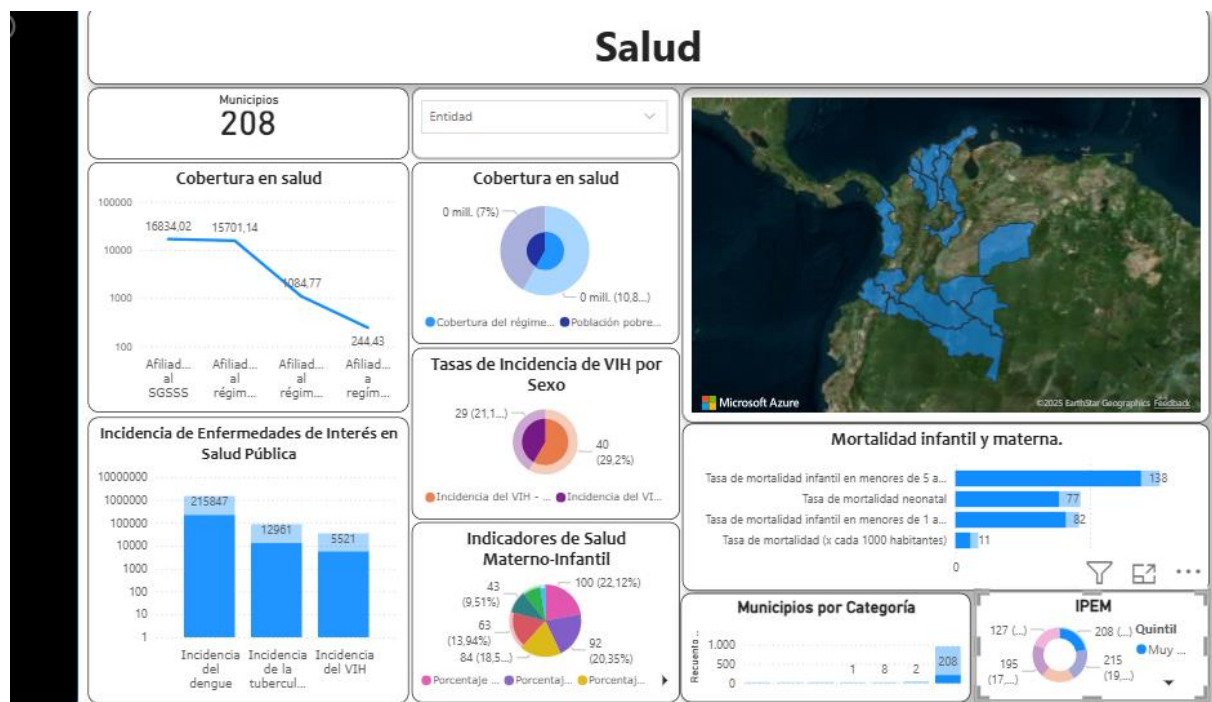


Figura 6 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios – Salud. Fuente: elaboración propia.  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Infraestructura y servicios públicos:** En cuanto a infraestructura básica, se evidencia una marcada brecha urbano-rural en el acceso a servicios esenciales. Las cabeceras municipales suelen tener acceso aceptable a acueducto, saneamiento, electricidad y telecomunicaciones; sin embargo, las veredas y poblaciones dispersas presentan coberturas muy bajas. Por ejemplo, la cobertura de agua potable rural en muchos de estos territorios es inferior al 50%, mientras que en la zona urbana puede superar el 90%. De manera análoga, el acceso a energía eléctrica en áreas rurales es extremadamente limitado o de mala calidad: abundan los corregimientos que no están conectados a redes eléctricas continuas, dependiendo de plantas diésel que operan unas pocas horas al día. Esta situación contrasta con las cabeceras municipales, donde suele haber conexión al SIN, aunque con posibles limitaciones en la calidad del servicio. La conectividad vial y digital también es precaria en los corregimientos: vías terciarias en mal estado aíslan comunidades durante temporadas de lluvia, y la cobertura de internet o telefonía móvil en zonas alejadas es muy deficiente. En síntesis, la falta de infraestructura integradora profundiza las inequidades dentro de cada municipio, dejando a la población rural en clara desventaja frente al casco urbano.

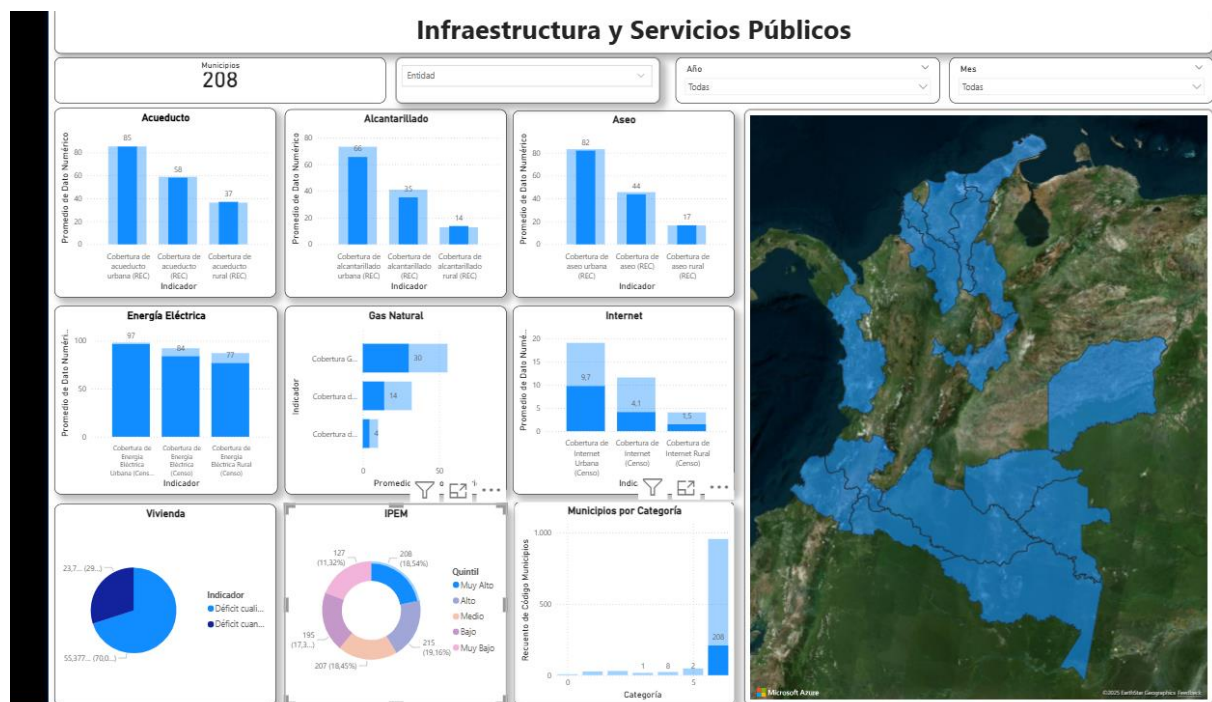


Figura 7 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Infraestructura y Servicios Públicos. Fuente: elaboración propia.  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Seguridad:** El análisis de seguridad ciudadana y orden público revela que muchos de los municipios estudiados enfrentan desafíos significativos en materia de seguridad. Varios se localizan en regiones históricamente afectadas por el conflicto armado interno o con presencia de economías ilícitas (cultivos ilícitos, minería ilegal, contrabando), lo cual se refleja en indicadores de violencia elevados. Se registran tasas de homicidio por encima de la media nacional rural en municipios de departamentos como Cauca, Chocó y Putumayo, así como eventos recurrentes de orden público (desplazamientos forzados, enfrentamientos armados) en zonas apartadas. Estos factores de inseguridad no solo impactan el bienestar de las comunidades, sino que dificultan la ejecución de proyectos de infraestructura y la presencia institucional. La situación de orden público, cruzada con la pobreza, configura círculos viciosos que requieren intervenciones integrales del Estado para garantizar condiciones mínimas de estabilidad necesarias para el desarrollo de comunidades energéticas.



Figura 8 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Seguridad y Convivencia. Fuente: elaboración propia  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Inversión pública:** Los datos de finanzas territoriales e inversión evidencian muy bajos niveles de inversión pública per cápita en estos municipios. Al ser entidades de sexta categoría, sus presupuestos locales son exigüos y dependen en gran medida de las transferencias del Sistema General de Participaciones (SGP) para cubrir gastos básicos de funcionamiento e inversión. En el tablero financiero se apreció que la inversión anual per cápita en la mayoría de estas localidades difícilmente supera unos pocos cientos de miles de pesos, muy por debajo de la media nacional municipal. Adicionalmente, la capacidad de ejecución de proyectos es limitada: muchos municipios apenas logran financiar obras de infraestructura social básica (acueductos veredales, mejoramientos viales menores, electrificación rural puntual) y carecen de recursos para proyectos de mayor envergadura. La débil capacidad fiscal y administrativa se traduce en baja inversión en sectores productivos o tecnológicos. Por ejemplo, municipios en Vaupés o Amazonas presentan ejecución casi nula en proyectos de energía renovable o desarrollo económico, reflejando la brecha en inversión estratégica frente a municipios de categorías superiores.

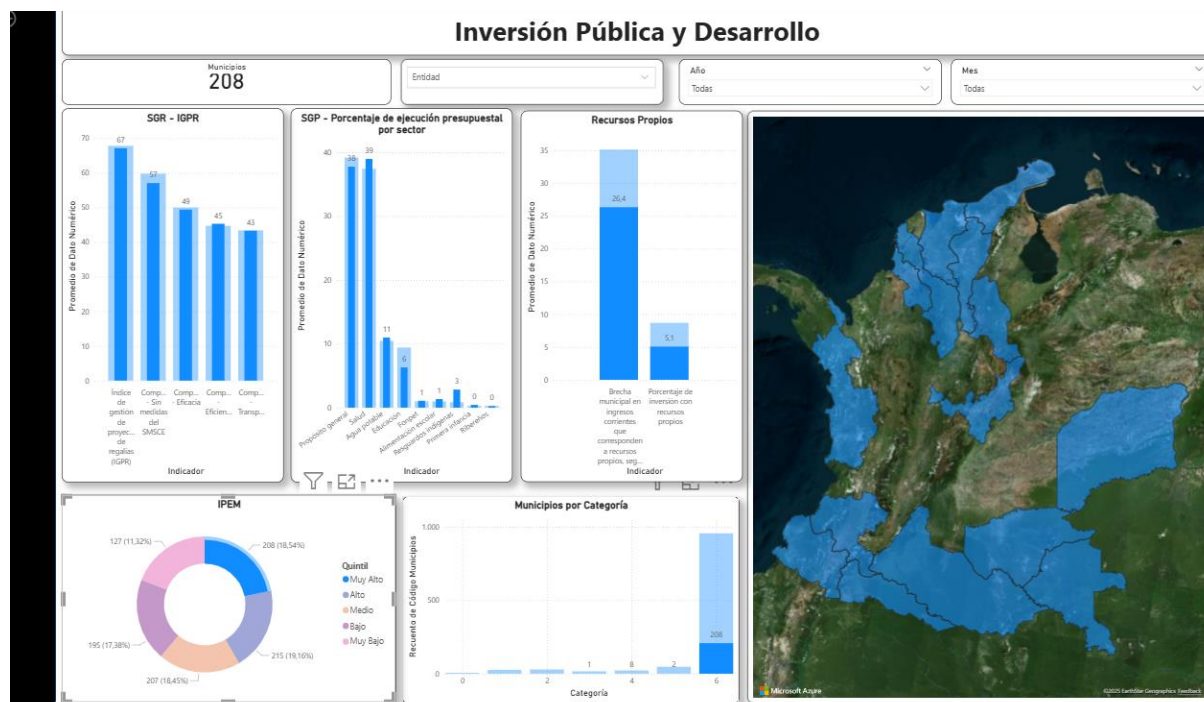


Figura 9 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Inversión Pública y Desarrollo. Fuente: elaboración propia. Ver: <https://n9.cl/3asjet>

- Actividad económica:** El perfil económico de estos territorios está dominado por el sector primario y la economía de subsistencia. Los tableros mostraron que la agricultura tradicional, la pesca artesanal, la ganadería extensiva y la extracción básica (madera, minería de subsistencia) constituyen las actividades económicas centrales en la mayoría de los casos. Más del 70% de la población ocupada se concentra típicamente en actividades agropecuarias o informales de bajo valor agregado, mientras que la participación de sectores industriales o servicios especializados es marginal o inexistente. Este escaso nivel de diversificación económica hace a los municipios muy vulnerables a choques como variaciones climáticas (sequías, inundaciones que afectan cosechas) o fluctuaciones de precios de productos agrícolas. No obstante, el análisis también permitió identificar potencialidades locales: por ejemplo, algunos municipios del Tipo 2 (ver más adelante) cuentan con vocación agroindustrial no explotada o recursos energéticos locales (solares, hídricos, biomasa) que podrían aprovecharse para impulsar cadenas productivas locales. En general, la actividad económica limitada explica por qué la demanda energética actual es baja y está enfocada en satisfacer consumos básicos residenciales, sin una base empresarial robusta que dinamice la economía local.

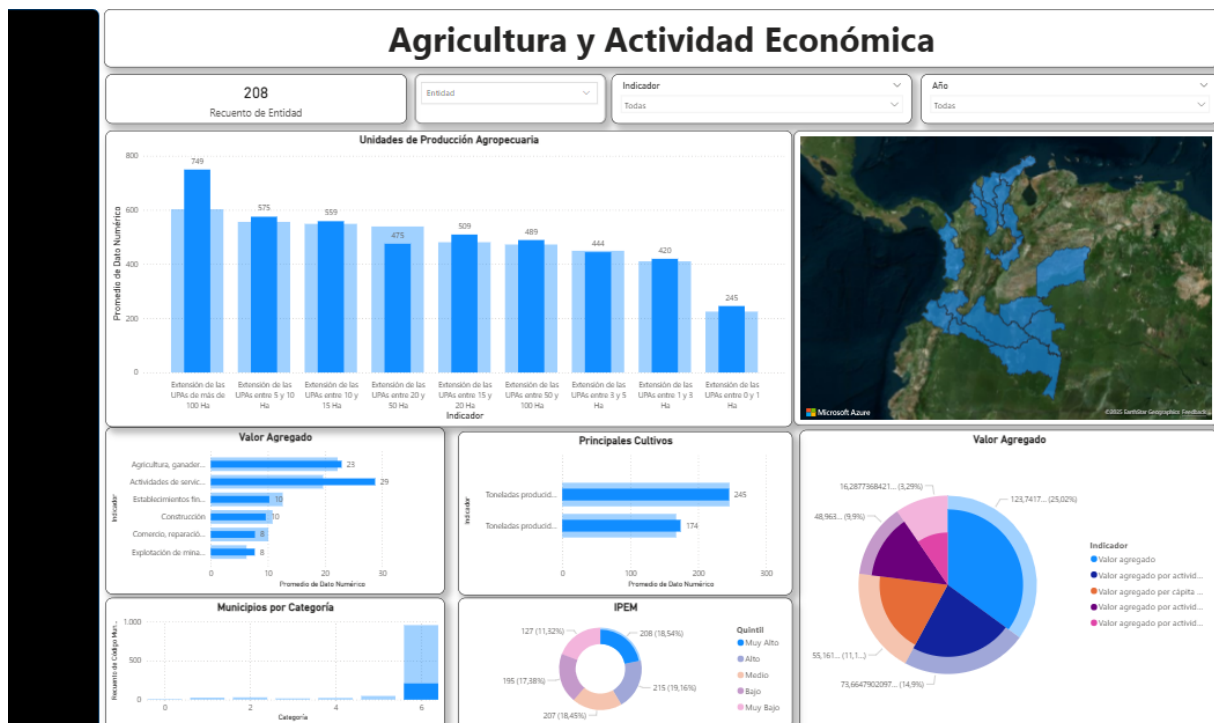


Figura 10 Tablero PowerBI - Caracterización Municipios - Agricultura y Actividad Económica. Fuente: elaboración propia.  
Ver: <https://n9.cl/3asjet>

El proceso de identificación de tipologías se fundamenta en un análisis multidimensional que considera variables territoriales, socioeconómicas y energéticas. Desde la dimensión territorial, se examinan factores como la conectividad vial, la dispersión poblacional y la disponibilidad de recursos locales (hídricos, solares, eólicos). Desde la dimensión socioeconómica, se evalúan indicadores de pobreza energética, dependencia institucional y organización comunitaria. Finalmente, desde la dimensión energética, se analizan las condiciones de acceso al SIN y la calidad del suministro. Este cruce de variables permite establecer patrones territoriales que explican la diversidad de condiciones bajo las cuales las comunidades colombianas pueden avanzar hacia la autosuficiencia energética.

La relevancia de esta clasificación no radica únicamente en su valor descriptivo, sino en su potencial operativo. Cada tipología se convierte en una unidad de planificación energética descentralizada, útil para orientar decisiones sobre inversión pública, cooperación internacional y participación privada. En efecto, los municipios con aislamiento geográfico requieren soluciones basadas en microrredes híbridas y gestión comunitaria, mientras que los núcleos rurales con vocación productiva demandan sistemas inteligentes que integren la energía con el desarrollo agroindustrial. En conjunto, las tipologías aportan una lectura territorial del proceso de transición energética justa, alineada con los principios de equidad, participación y sostenibilidad que orientan la política pública nacional [15].

En suma, el presente capítulo desarrolla y analiza cuatro tipologías de comunidades energéticas identificadas en municipios de sexta categoría en Colombia:

- **Tipo 1**, territorios dispersos con aislamiento energético y geográfico;
- **Tipo 2**, núcleos productivos rurales con potencial energético local;
- **Tipo 3**, territorios con alta oferta hídrica y riesgo ambiental;
- **Tipo 4**, cabeceras municipales conectadas pero vulnerables a la intermitencia.

Cada una de estas tipologías representa una configuración socioenergética particular y plantea un conjunto diferenciado de retos y oportunidades (ver *Tabla 3* para un resumen). Su análisis permitirá comprender cómo la gestión local, la disponibilidad de recursos y la innovación tecnológica pueden converger en la construcción de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles, contribuyendo a cerrar brechas energéticas, fortalecer la resiliencia territorial y promover el bienestar multidimensional en el contexto colombiano.

*Tabla 3. Tipologías de comunidades energéticas en municipios de sexta categoría en Colombia.*

| Tipo                                                                               | Descripción                                                                                                                          | Principales retos                                                                                                          | Escenario 1: Comunidades energéticas                                                                                                                                                                                                                            | Escenario 2: Sinergia productiva                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Escenario 3: Inteligente y sostenible                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | SIN | ZIN | Mixto | Total Municipios |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-------|------------------|
| <b>Tipo 1 – Territorios dispersos con aislamiento físico y digital</b>             | Municipios con población muy dispersa, baja densidad, aislamiento geográfico y limitado acceso a energía, agua y telecomunicaciones. | Desconexión del SIN, altos costos por diésel, falta de internet, limitaciones en educación y salud a distancia.            | Instalación básica de paneles solares para viviendas rurales sin red. Se mide solo cobertura eléctrica, sin considerar sostenibilidad social o cultural. Representa la fase inicial de comunidades energéticas, con riesgo de pseudosostenibilidad dimensional. | Integración de microrredes solares con actividades agrícolas (ej. riego, conservación de alimentos, molienda de granos). Fortalece seguridad alimentaria y productividad.                                                                                                                                                                                                                                                       | Redes híbridas (solar + microhidráulica) gestionadas con IoT. Comunidad autogestiona energía, usa blockchain para transacciones energéticas locales y garantiza resiliencia ante crisis climáticas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5   | 8   | 9     | 22               |
| <b>Tipo 2 – Núcleos productivos rurales con potencial agroindustrial</b>           | Municipios con cabeceras pequeñas y vocación agro, pero baja capacidad de transformación y comercialización.                         | Pérdidas postcosecha, baja agregación de valor, dependencia de intermediarios, infraestructura productiva deficiente.      | Proyectos solares o eólicos pequeños que solo buscan reducir facturación. Gobernanza limitada al alcalde o a la empresa de energía. Comunidades energéticas incipientes sin integración multidimensional.                                                       | Energía apoya microempresas locales (cacao, café, turismo). Se crean comités ciudadanos de energía para vincular sectores productivos. Aprovechamiento de residuos agrícolas y estiércoles con biodigestores y briquetas locales para energía térmica y biofertilizantes, creando unidades productivas comunitarias y empleo.                                                                                                   | Implementación de sistemas inteligentes de gestión (medidores smart, almacenamiento). Gobernanza simétrica entre comunidad, Estado y privados; energía financia proyectos de salud y educación. Se integran sensores IoT y datos para medir ahorros y emisiones, preparando la conexión a microrredes solares-biomasa.                                                                                                                                                                              | 77  |     | 3     | 80               |
| <b>Tipo 3 – Territorios con alta oferta hídrica y riesgo climático</b>             | Municipios con ríos y corrientes aptos para generación, pero con alta vulnerabilidad a inundaciones y deslizamientos.                | Interrupciones por eventos climáticos, baja resiliencia de la red, falta de integración entre energía y gestión de riesgo. | Implementación de mini/micro-hidroeléctricas aisladas sin planificación integral. Se mide solo la capacidad de generación, ignorando impactos ambientales y sociales. Gobernanza centralizada y poca participación comunitaria.                                 | Integración de mini/micro-hidro con paneles solares de respaldo para seguridad energética en sequías. Uso productivo de la energía en riego tecnificado, refrigeración, piscicultura y agroindustria. Gobernanza participativa con juntas de agua y energía.                                                                                                                                                                    | Sistemas híbridos inteligentes (hidro + solar + almacenamiento) con IoT para monitorear caudales y calidad del agua. Gobernanza colaborativa entre comunidad, asociaciones productivas y Estado. La energía financia proyectos de conservación de cuencas, educación digital y turismo ecológico. El sistema se vuelve antifrágil frente a sequías e inundaciones.                                                                                                                                  | 53  | 8   | 39    | 100              |
| <b>Tipo 4 – Cabeceras municipales conectadas pero con baja calidad de servicio</b> | Municipios conectados al SIN pero con interrupciones frecuentes, baja calidad de energía y deficiencias en infraestructura crítica.  | Cortes de energía, daños a equipos, interrupciones en salud, educación y agua.                                             | Instalación aislada de renovables en instituciones (escuelas o puestos de salud), sin cobertura comunitaria. Comunidad energética inicial pero reducida a un servicio parcial.                                                                                  | Energía se integra a proyectos de resiliencia climática: potabilización de agua, refrigeración de vacunas, talleres comunitarios. Se activa gobernanza participativa. Instalar un micro data center modular, que incluye protección eléctrica, enfriamiento, seguridad y monitoreo. De manera que se podrá procesar datos de salud, educación, agua y energía de forma rápida y confiable, sin depender de conexiones externas. | Sistemas inteligentes priorizan equidad y bienestar: cobertura universal, educación digital, monitoreo climático. Modelo de gobernanza colaborativa reduce desigualdad y fortalece cohesión social. Este sistema se alimentará con energía solar y baterías, lo que asegura continuidad y menores costos energéticos. Además, se creará un modelo para vender la capacidad del centro como servicio a municipios y empresas cercanas, generando ingresos y trabajo técnico para la comunidad local. | 6   |     |       | 6                |

*Fuente: elaboración propia.*

En conjunto, el proceso descrito de consolidación y análisis de la información permitió identificar con precisión la diversidad territorial y energética existente dentro de los municipios rurales más rezagados de Colombia. Al lograr perfilar tipologías diferenciadas, el estudio aporta insumos concretos para la formulación de estrategias adaptadas a cada contexto. Es decir, la caracterización integral hace posible orientar iniciativas de comunidades energéticas de manera focalizada: intervenciones tecnológicas, modelos de gestión y políticas de apoyo pueden diseñarse considerando las necesidades y potencialidades específicas de un territorio disperso y aislado (Tipo 1) frente a las de un núcleo productivo rural (Tipo 2), o las de un municipio con riesgos ambientales (Tipo 3) o de municipios conectados pero con fallas en el suministro de energía (Tipo 4).

En última instancia, esta diferenciación estratégica busca asegurar que la Transición Energética Justa incluya a todas las comunidades, ofreciendo soluciones viables y acordes con la realidad de cada municipio. La identificación rigurosa de tipologías territoriales y energéticas sienta así las bases para intervenciones más eficaces, maximizando el impacto social de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en el país.

#### 4.2 Tipo 1. Territorios dispersos con aislamiento energético y geográfico.

Los municipios que conforman esta primera tipología se caracterizan por su alta dispersión poblacional, baja densidad demográfica y difícil acceso físico, condiciones que limitan la expansión del SIN y encarecen la prestación del servicio eléctrico. Se trata, principalmente, de territorios rurales dispersos ubicados en zonas de montaña, selva o llanura amazónica y pacífica, donde la provisión de energía depende en gran medida del diésel y de generadores aislados de baja eficiencia. En estos espacios la desconexión energética se combina con procesos de marginación social, institucional y territorial, conformando un círculo persistente de pobreza energética y dependencia tecnológica [36].

En esta tipología se incluyen tres tipos de municipios:

1. **Municipios del SIN con zonas rurales aisladas**, donde la cobertura de la red eléctrica es parcial y las veredas o corregimientos periféricos dependen de soluciones autónomas o microrredes.
2. **Municipios de las ZNI**, caracterizados por una desconexión estructural del SIN, cobertura energética limitada y fuerte dependencia del diésel, que representa más del 65% de su suministro energético. Estas zonas abarcan aproximadamente el 53% del territorio nacional, con un servicio continuo solo para el 38% de los usuarios [15].
3. **Municipios mixtos**, en los cuales coexisten cabeceras urbanas conectadas al SIN y áreas rurales no interconectadas. Esta dualidad genera brechas significativas en la calidad y continuidad del servicio eléctrico, afectando la equidad territorial y la capacidad de desarrollo local.

El principal desafío de estos municipios radica en la desconexión estructural del SIN y en la vulnerabilidad de su infraestructura local. Las dificultades logísticas para transportar combustibles, equipos o materiales incrementan los costos operativos y reducen la viabilidad económica de las soluciones convencionales. A ello se suma la dependencia de subsidios nacionales, lo que limita la autonomía comunitaria y la estabilidad financiera de los sistemas energéticos locales. Además, la falta de capacidades técnicas y de mecanismos de gobernanza participativa obstaculiza la consolidación de modelos de gestión comunitaria duraderos, lo cual ha contribuido a que muchos proyectos previos tengan ciclos de vida cortos o discontinuos [25].

En este contexto, los municipios SIN, ZNI y mixtos representan territorios prioritarios para la implementación de comunidades energéticas rurales inteligentes y sostenibles, orientadas a promover la autonomía energética, la gestión local de recursos renovables y la integración de tecnologías híbridas de generación, almacenamiento y distribución. Estas estrategias constituyen un instrumento clave para avanzar hacia una transición energética justa, que no solo mejore la cobertura y la calidad del servicio, sino que también impulse procesos de desarrollo socioeconómico inclusivo, resiliente y bajo en carbono [15].

Ante este panorama, los escenarios de solución propuestos para este tipo de territorios se estructuran en tres fases progresivas.

- **Escenario 1 (Básico):** instalación de sistemas solares individuales para viviendas rurales dispersas. Estos proyectos buscan garantizar un acceso mínimo a la electricidad mediante kits fotovoltaicos domésticos, priorizando el alumbrado y la carga de equipos esenciales.
- **Escenario 2 (Productivo):** integración de microrredes solares locales vinculadas a actividades rurales productivas como secado de granos, refrigeración de alimentos o bombeo de agua. En esta etapa la energía se convierte en un habilitador del desarrollo económico.
- **Escenario 3 (Inteligente):** consolidación de redes híbridas inteligentes (solar + microhidro) gestionadas por la comunidad, con sistemas de monitoreo remoto, almacenamiento en baterías y mecanismos de control descentralizado. Este escenario supone una comunidad energética madura, capaz de gestionar la operación técnica y financiera del sistema.

Las microrredes híbridas emergen como la tecnología más adecuada para este contexto, combinando fuentes renovables con sistemas de almacenamiento que garantizan la continuidad del servicio. [29] destacan que, en comunidades aisladas, la hibridación solar-hidro-diésel reduce hasta un 60 % los costos del kilovatio-hora y mejora la resiliencia frente a la variabilidad climática. En el caso colombiano, estas configuraciones deben acompañarse de modelos de gestión comunitaria energética, en los que la toma de decisiones y el mantenimiento se realicen de forma participativa, fortaleciendo las capacidades locales y la apropiación tecnológica.

En síntesis, el Tipo 1 refleja una fase inicial de la transición energética en municipios altamente aislados, en la que la descentralización energética, tecnológica y la organización social son los pilares para avanzar hacia la autosuficiencia.

#### **4.3 Tipo 2. Núcleos productivos rurales con potencial energético local.**

El segundo tipo agrupa municipios con cabeceras pequeñas, vocación agroindustrial y presencia de actividades económicas consolidadas (producción de cacao, café, panela, lácteos, etc.) que demandan un suministro eléctrico confiable y continuo. A diferencia del tipo anterior, estos territorios suelen contar con mayor conectividad vial y con alguna infraestructura energética básica, aunque el suministro continúa siendo irregular y limitado. La energía, en estos casos, no solo es un servicio doméstico, sino un factor determinante de la competitividad rural [15].

Los principales **retos** de esta tipología se relacionan con la pérdida de valor agregado por falta de energía confiable, las deficiencias en almacenamiento y procesamiento de productos agrícolas, y la baja articulación entre energía y desarrollo local. A nivel institucional, estos municipios presentan debilidades en la planificación energética y en la gestión de proyectos, lo que limita la atracción de inversiones.

En esta tipología se incluyen municipios del SIN con infraestructura deficiente y municipios mixtos que poseen vocación productiva rural. En los municipios del SIN, las fallas recurrentes y los cortes de energía afectan la cadena de valor agroindustrial, mientras que en los municipios mixtos las cabeceras urbanas reciben energía del sistema interconectado, pero las zonas rurales dependen de sistemas aislados o híbridos con diésel. Por su parte, los territorios ZNI mantienen una dependencia significativa de combustibles fósiles, lo que incrementa los costos de producción y reduce la rentabilidad de las actividades económicas. En todos los casos, la ausencia de energía continua y de calidad impide consolidar una base productiva estable y limita la adopción de tecnologías de valor agregado [36].

Los principales retos de esta tipología se relacionan con la pérdida de valor agregado por falta de energía confiable, las deficiencias en el almacenamiento y procesamiento de productos agrícolas y la baja articulación entre energía y desarrollo local. Además, la limitada capacidad institucional para planificar, ejecutar y sostener proyectos energéticos obstaculiza la atracción de inversiones y el fortalecimiento de cadenas productivas territoriales.

El escenario multidimensional propuesto para esta tipología considera la incorporación de **tecnologías solares, eólicas y, en algunos casos, microhidráulicas**, priorizando soluciones modulares y escalables que fortalezcan las actividades económicas locales. Así, los escenarios de solución se estructuran como:

- **Escenario 1 (Básico):** implementación de sistemas solares o eólicos pequeños para garantizar la continuidad de operaciones agroindustriales esenciales y el funcionamiento de servicios comunitarios básicos.
- **Escenario 2 (Productivo):** integración de energía renovable en microempresas locales de procesamiento, secado, conservación y transformación de alimentos, favoreciendo la diversificación económica y la generación de empleo rural.
- **Escenario 3 (Inteligente):** desarrollo de sistemas inteligentes de gestión energética que optimicen el uso de la energía en función de la demanda, integren almacenamiento y promuevan la eficiencia productiva y ambiental.

Este tipo de comunidades energéticas tiene un alto potencial de escalamiento, ya que combina oferta de recursos locales con demanda productiva estructurada, lo cual facilita modelos de negocio autosuficientes y replicables. El tránsito hacia la inteligencia energética se manifiesta en la incorporación de plataformas digitales para el

monitoreo del consumo, la facturación transparente y la toma de decisiones basadas en datos. En estos escenarios, la comunidad actúa como un prosumer colectivo, productor y consumidor a la vez, alineando la generación local con los objetivos de estabilidad económica y responsabilidad ambiental.

Además, la experiencia colombiana demuestra que cuando la energía se vincula con cadenas productivas rurales, la estabilidad operativa y financiera de los proyectos mejora significativamente, pues la rentabilidad productiva asegura recursos para el mantenimiento y la expansión del sistema. De este modo, el Tipo 2 representa una fase intermedia de madurez energética en la que la autogeneración comunitaria se integra con el desarrollo económico territorial, impulsando una transición energética justa y productiva que fortalece la resiliencia y la autonomía de los municipios SIN, ZNI y mixtos.

#### **4.4 Tipo 3. Territorios con alta oferta hídrica y riesgo ambiental**

Esta tipología corresponde a municipios ubicados en cuencas y microcuencas con abundante recurso hídrico, potencialmente aprovechable mediante micro o minicentrales hidroeléctricas. En Colombia, muchos de estos territorios se encuentran en la región Andina y en áreas de piedemonte amazónico y llanero donde los ríos ofrecen un flujo constante de agua, pero también presentan alta vulnerabilidad ante fenómenos climáticos extremos. Estos municipios, tanto interconectados como no interconectados, poseen una vocación hídrica y energética diferenciada, pero requieren infraestructuras adaptativas y resilientes para garantizar la continuidad del servicio [15].

En esta tipología se incluyen tres grupos de municipios, según su nivel de conexión:

- 1. Municipios del SIN con potencial hidroenergético subutilizado**, donde la infraestructura eléctrica existe, pero los sistemas locales no aprovechan el recurso hídrico de manera descentralizada. En estos casos, las micro centrales comunitarias pueden reducir pérdidas por transmisión y fortalecer la resiliencia ante fallas del sistema interconectado.
- 2. Municipios mixtos**, en los cuales la cabecera urbana se encuentra conectada al SIN, mientras que sus corregimientos rurales y zonas altas dependen de sistemas aislados. Estos territorios tienen condiciones topográficas y climáticas favorables para el desarrollo de **micro centrales hidroeléctricas comunitarias** complementadas con energía solar o eólica, configurando esquemas híbridos resilientes.
- 3. Municipios de las ZNI** con disponibilidad de recursos hídricos, en los que la instalación de micro o minihidroeléctricas representa una alternativa de menor impacto ambiental al uso de diésel, reduciendo costos, emisiones y dependencia de combustibles fósiles. En muchos de ellos, la energía hidroeléctrica local puede operar como base del sistema híbrido, complementada por fuentes solares o biomásas [36].

Los retos principales de esta tipología son la baja resiliencia de las infraestructuras hidráulicas, la variabilidad climática que afecta los caudales y la limitada capacidad institucional para manejar los riesgos ambientales. Así mismo, persisten conflictos por el uso del agua y tensiones entre generación energética, agricultura y conservación ambiental, especialmente en municipios con economías rurales dependientes del riego o la pesca artesanal [15].

El escenario multidimensional propuesto se basa en la hibridación de fuentes hidroeléctricas y solares, combinadas con una gestión comunitaria del recurso hídrico y monitoreo ambiental en tiempo real. Los tres escenarios de solución son:

- **Escenario 1 (Básico):** implementación de mini o micro centrales hidroeléctricas a escala comunitaria, priorizando el suministro continuo y local.
- **Escenario 2 (Productivo):** integración de sistemas microhidro con paneles solares para abastecer infraestructuras productivas rurales, sistemas de bombeo, centros de acopio o servicios comunitarios esenciales.
- **Escenario 3 (Inteligente):** sistemas híbridos inteligentes (hidro + solar) con monitoreo climático y gestión preventiva del riesgo.

Los estudios sobre microhidroelectricidad en zonas rurales demuestran que estas soluciones son robustas y ambientalmente amigables, con una vida útil superior a treinta (30) años y bajos requerimientos de mantenimiento [31] [37]. En el caso colombiano, estas experiencias deben enmarcarse en estrategias de gestión integral del recurso hídrico y en esquemas de gobernanza ambiental participativa. Así, los proyectos hidro solares no solo aseguran suministro energético, sino que fortalecen la conciencia ambiental y la corresponsabilidad comunitaria en la conservación del territorio.

Por su parte, en los municipios SIN estos proyectos pueden aumentar la autonomía energética y la seguridad del sistema nacional, mientras que en los municipios ZNI y mixtos actúan como núcleos de resiliencia energética local, permitiendo sustituir generación diésel, estabilizar la oferta y garantizar continuidad de servicio. Además, fortalecen la conciencia ambiental y la corresponsabilidad comunitaria en la conservación de las fuentes hídricas y ecosistemas asociados.

Así, el Tipo 3 representa un estado avanzado de resiliencia socioambiental e inteligencia energética, en el que la energía se vincula con la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático. La inteligencia energética aquí se expresa en la capacidad de anticipar eventos hidrometeorológicos, modular la generación y mantener la continuidad del servicio, integrando información ambiental en tiempo real y protocolos de acción comunitaria y sistemas híbridos que garantizan seguridad, estabilidad y equidad energética en municipios SIN, ZNI y mixtos.

#### **4.5 Tipo 4. Cabeceras municipales conectadas pero vulnerables a la intermitencia**

La cuarta tipología corresponde a cabeceras municipales formalmente conectadas al SIN, pero que presentan baja calidad del servicio, interrupciones frecuentes y alta vulnerabilidad ante fallas técnicas, climáticas o de mantenimiento. Aunque cuentan con infraestructura eléctrica convencional, muchas de estas localidades registran índices elevados de pobreza energética debido a la discontinuidad del suministro, la limitada capacidad de respuesta institucional y la ausencia de planes locales de gestión energética [36]. Los principales retos se relacionan con la baja resiliencia urbana, la ausencia de planes locales de energía y la escasa participación ciudadana en la gestión del servicio. Estas localidades son ejemplos claros de una conexión formal sin garantía efectiva de acceso continuo y de calidad.

En esta tipología se incluye un tipo de territorio, como se observa a continuación.

1. Municipios del SIN que, a pesar de estar formalmente conectados, presentan deficiencias en la continuidad, la calidad y el voltaje del servicio eléctrico. Se trata, por lo general, de municipios con redes obsoletas, transformadores sobrecargados o falta de redundancia en las líneas de transmisión, donde los eventos climáticos o los picos de demanda provocan cortes prolongados y pérdidas energéticas significativas.

Los principales retos de esta tipología se relacionan con la baja resiliencia de las redes eléctricas urbanas y rurales, la ausencia de esquemas locales de mantenimiento y reposición tecnológica, así como la escasa participación ciudadana en la gobernanza del servicio. En consecuencia, estos municipios constituyen ejemplos claros de conexión formal sin garantía efectiva de acceso continuo, equitativo y de calidad.

El escenario multidimensional propuesto combina eficiencia energética, tecnologías de respaldo y participación ciudadana. Los escenarios de solución incluyen:

- **Escenario 1 (Básico):** instalación de sistemas renovables aislados (solar o eólico) en instituciones críticas como hospitales, escuelas, estaciones de bombeo o centros administrativos, asegurando la continuidad operativa ante fallas del SIN.
- **Escenario 2 (Productivo):** integración de tecnologías renovables en proyectos urbanos y rurales de resiliencia climática, incluyendo alumbrado público solar, microrredes comunitarias, centros de carga eléctrica o refrigeración descentralizada para pequeños comercios y mercados locales.
- **Escenario 3 (Inteligente):** implementación de compensadores eléctricos, UPS comunitarias y sensores de monitoreo que permitan una gestión inteligente y equitativa del consumo.

En los municipios del SIN estas estrategias permiten avanzar hacia redes inteligentes de distribución local, fortaleciendo la capacidad de respuesta frente a contingencias y mejorando la eficiencia del sistema.

El enfoque de comunidades energéticas urbanas implica un cambio cultural: pasar del usuario pasivo al ciudadano energético consciente. Este proceso requiere fortalecer la gobernanza local del servicio, promover la transparencia tarifaria y fomentar la corresponsabilidad en el uso eficiente de la energía. En términos tecnológicos, la instalación de sensores, almacenamiento distribuido y micro inversores inteligentes permite que los municipios desarrollen capacidades de resiliencia energética urbana, reduciendo la dependencia del SIN y mejorando la equidad en la prestación del servicio [27].

#### **4.6 Comparación transversal y fases de madurez energética**

El análisis comparado de las cuatro tipologías evidencia un gradiente de madurez energética asociado al grado de conexión territorial con el SIN y a las condiciones estructurales de los municipios ZNI y mixtos. Este gradiente no solo refleja diferencias tecnológicas y de acceso, sino también dinámicas socioeconómicas, institucionales y de gobernanza energética.

El **Tipo 1** representa el punto de partida del proceso: territorios mayoritariamente ZNI o mixtos rurales caracterizados por desconexión estructural del SIN, alta dispersión poblacional y limitada capacidad técnica. En estos espacios, el acceso básico a la energía constituye el objetivo principal y la condición mínima para habilitar procesos de desarrollo. La prioridad radica en garantizar el suministro continuo, reducir la dependencia del diésel y sentar las bases para una gobernanza comunitaria de los recursos energéticos [36].

El **Tipo 2** agrupa municipios del SIN y mixtos con vocación productiva, donde la energía comienza a integrarse con el desarrollo económico local. Aquí la madurez energética se expresa en la capacidad de articular autogeneración comunitaria y uso productivo, vinculando la energía a cadenas agroindustriales, microempresas rurales y cooperativas locales. En esta fase, la energía deja de ser únicamente un servicio básico para convertirse en un factor de competitividad y transformación territorial, avanzando hacia una autonomía técnica parcial con modelos híbridos ambiental y económicamente convenientes.

El **Tipo 3** incluye municipios conectados parcial o totalmente al SIN, mixtos y ZNI hídricamente estratégicos, donde se consolidan esquemas de hibridación energética (hidro + solar) y de gestión ambiental integrada. La madurez energética aquí se asocia con la resiliencia climática y la optimización de recursos naturales renovables, permitiendo a las comunidades anticipar riesgos hidrometeorológicos, estabilizar su generación y fortalecer su capacidad adaptativa. Estos territorios se ubican en una fase de transición entre la autonomía técnica y la estabilidad sistémica, donde la energía se concibe como parte del ecosistema ambiental y productivo local [31] [37].

El **Tipo 4**, por su parte, corresponde a municipios del SIN con conexión formal pero baja calidad del servicio. En esta fase avanzada, la madurez energética se vincula a la inteligencia del sistema, la eficiencia operativa y la resiliencia urbana, mediante el uso de tecnologías digitales, almacenamiento distribuido y participación ciudadana activa. Estos territorios enfrentan el desafío de transformar la dependencia del sistema centralizado en una capacidad local de gestión y respuesta, fortaleciendo la gobernanza energética municipal y reduciendo la vulnerabilidad ante fallas del SIN [27].

De este modo, la secuencia de escenarios puede interpretarse como una trayectoria de evolución adaptativa del sistema energético comunitario, coherente con los principios de la complejidad de la sostenibilidad [27]. En la fase básica, el objetivo es la cobertura universal y el acceso equitativo; en la fase productiva, la eficiencia y el valor agregado; en la fase híbrida o ambiental, la resiliencia socioecológica; en la fase inteligente, la autonomía, la equidad y la gobernanza distribuida.

Así mismo, las tipologías y su distribución entre municipios SIN, ZNI y mixtos revelan una tensión estructural entre autonomía local y dependencia institucional. Mientras los municipios más aislados requieren apoyo técnico, financiero y normativo sostenido, aquellos con mayor infraestructura y base económica pueden avanzar hacia modelos de autogestión y participación energética comunitaria. La clave está en diseñar mecanismos de gobernanza

multinivel, donde la planeación nacional, la gestión regional y la organización comunitaria se articulen para consolidar ecosistemas energéticos integrados.

Finalmente, desde la perspectiva de la transición energética justa, esta comparación transversal demuestra que la equidad territorial y energética debe constituir el eje central de la política pública. No basta con expandir la cobertura eléctrica, pues es indispensable asegurar que la energía se convierta en un medio para el bienestar multidimensional, la inclusión social y la responsabilidad ambiental. Esto puede contribuir a cerrar las brechas históricas entre municipios del SIN, ZNI y mixtos, promoviendo una transición energética diferenciada y contextualizada que garantice justicia y resiliencia en todos los territorios del país.

#### 4.7 Discusión

El proceso de construcción de las tipologías de comunidades energéticas en municipios de sexta categoría constituye un ejercicio de análisis territorial integral, sustentado en la convergencia entre conocimiento técnico, comprensión social y evidencia empírica. Lejos de ser una clasificación meramente descriptiva, estas tipologías configuran un modelo interpretativo de las realidades energéticas diferenciadas entre municipios del SIN, ZNI y mixtos, donde confluyen variables de acceso, vulnerabilidad, capacidades institucionales y potencial de recursos locales. Sin embargo, como todo proceso de síntesis territorial, su construcción implica decisiones metodológicas y epistemológicas que deben ser objeto de reflexión crítica.

En primer lugar, es importante reconocer que las tipologías emergen de un cruce multivariable que integra condiciones físicas, sociales, institucionales y energéticas. Este enfoque multidimensional se alinea con la metodología del IPEM desarrollada por el Ministerio de Minas y Energía (2025), que trasciende el simple acceso eléctrico e incorpora indicadores de calidad de servicio, asequibilidad, estabilidad de la conexión y capacidad de uso. En este sentido, las tipologías no solo reflejan desigualdades de infraestructura entre el SIN, las ZNI y los municipios mixtos, sino que capturan las brechas en bienestar energético, revelando cómo el lugar de conexión dentro del sistema nacional determina la equidad territorial. No obstante, el proceso enfrenta tres tensiones estructurales que determinan la viabilidad de las comunidades energéticas en el contexto colombiano.

La **primera tensión** es la dualidad entre aislamiento y conectividad, particularmente visible en los municipios ZNI y mixtos del Tipo 1. En estos territorios, la geografía y la dispersión poblacional imponen límites físicos al SIN y encarecen su expansión. Esta realidad obliga a priorizar soluciones descentralizadas e híbridas, basadas en energías renovables locales y en mecanismos de gobernanza comunitaria. La experiencia nacional demuestra que los proyectos energéticos aislados suelen fracasar no por limitaciones técnicas, sino por debilidad institucional y falta de estructuras locales de gestión y mantenimiento [15]. En consecuencia, la gobernanza energética participativa se convierte en un elemento tan crucial como la tecnología misma.

La **segunda tensión** se relaciona con la asimetría en capacidades técnicas y organizativas entre municipios del SIN y aquellos de las ZNI. Mientras los primeros pueden contar con empresas distribuidoras, recursos técnicos y redes de apoyo institucional, los segundos dependen de liderazgos comunitarios incipientes y de un acompañamiento estatal intermitente. Si bien la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas (2024) promueve la autogestión, el éxito de estos proyectos depende de la formación de capacidades locales, la consolidación de estructuras de gobernanza energética y la articulación con universidades, ONG y actores privados. En los municipios mixtos, donde coexisten redes interconectadas y sistemas aislados, la falta de integración institucional provoca ineficiencias y conflictos de competencia. Por tanto, la comunidad energética inteligente no se construye únicamente instalando tecnología, sino fortaleciendo el tejido social que la sostiene [27].

La **tercera tensión** radica en la dependencia institucional y normativa, que continúa orientada hacia el modelo centralizado del SIN. La regulación energética colombiana, diseñada para grandes agentes y mercados integrados, limita la autonomía local y la autogeneración en municipios ZNI y mixtos, donde la prestación del servicio suele ser deficiente o fragmentada. Aunque se han dado avances en autogeneración distribuida y comunidades energéticas, persiste una brecha entre la normatividad nacional y la realidad territorial. En este contexto, las tipologías energéticas y su distribución por niveles de conexión pueden convertirse en instrumentos de planificación diferenciada que orienten la asignación de recursos y promuevan modelos regulatorios adaptativos, según el nivel de aislamiento o vulnerabilidad energética [15].

Adicionalmente, las tipologías revelan tensiones socioambientales en la gestión de recursos energéticos según el tipo de conexión. En los municipios ZNI y mixtos con alta oferta hídrica (Tipo 3), la coexistencia entre generación hidroeléctrica, producción agrícola y conservación ambiental demanda gobernanza territorial del agua. La literatura internacional evidencia que los proyectos hidroeléctricos comunitarios exitosos son aquellos en los que las comunidades asumen la planificación del recurso hídrico como un bien común, estableciendo reglas locales y mecanismos de vigilancia social [31] [37]. Esta evidencia resulta especialmente relevante para el caso colombiano, donde la gestión del agua se encuentra altamente fragmentada entre múltiples instituciones; en este contexto, la articulación comunitaria en la gestión del recurso hídrico se vuelve indispensable para asegurar la viabilidad de las microcentrales hidroeléctricas y de los sistemas híbridos rurales.

De igual forma, la expansión tecnológica y digital plantea nuevos dilemas de equidad territorial. En efecto, los municipios del SIN avanzan hacia la digitalización mediante sensores, redes inteligentes e internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), mientras que muchos municipios ZNI y mixtos enfrentan brechas de alfabetización tecnológica y conectividad digital. Sin estrategias complementarias de capacitación y apropiación social de la tecnología, la transición hacia comunidades energéticas inteligentes corre el riesgo de reproducir las desigualdades estructurales del sistema energético centralizado. La inteligencia energética no debe reducirse a la automatización, sino entenderse como un proceso educativo y cultural, donde la comunidad aprende a gestionar información, tomar decisiones y actuar colectivamente frente a la energía [27].

Un elemento transversal de esta discusión es la gobernanza energética participativa, especialmente relevante en municipios ZNI y mixtos, donde el Estado debe asumir un rol de facilitador más que de ejecutor. El *Manual de Gestión de Comunidades Energéticas* [15] destaca que la participación no debe limitarse a la consulta, sino a la co-creación de soluciones, la toma de decisiones compartida y el control social sobre la operación del sistema. En este sentido, las comunidades energéticas reconfiguran la gestión pública, pasando de una lógica verticalizada a un modelo colaborativo y adaptativo, donde los ciudadanos son coproductores de energía y corresponsables de su perdurabilidad.

Sumado a lo anterior, las tipologías sirven como herramienta para priorizar la inversión pública diferenciada según el nivel de conexión y madurez energética. Así, los municipios ZNI del Tipo 1 requieren infraestructura básica, financiamiento inicial y formación comunitaria; los mixtos del Tipo 2 incentivos para integrar energía con cadenas productivas; los SIN y mixtos hídricos del Tipo 3 demandan inversión en gestión ambiental y resiliencia climática, y los SIN urbanos del Tipo 4 necesitan apoyo en digitalización, automatización y redes inteligentes. Esta priorización territorial coincide con los enfoques de planeación adaptativa y desarrollo sostenible impulsados por la política energética nacional [36].

Finalmente, desde una perspectiva crítica es necesario reconocer los límites epistemológicos de la tipificación. Si bien las categorías ayudan a sistematizar la complejidad, corren el riesgo de rigidizar realidades dinámicas. La frontera entre un municipio SIN de baja calidad del servicio y un mixto parcialmente interconectado es difusa y cambiante. Por ello, las tipologías deben entenderse como instrumentos flexibles y actualizables, sujetos a revisión continua conforme evolucionen las condiciones técnicas, sociales y climáticas. Como lo señalan Redondo y Becerra [27] los territorios sostenibles son sistemas en constante adaptación, donde la estabilidad no implica inmovilidad, sino equilibrio dinámico.

En consecuencia, la clasificación propuesta no debe interpretarse como un diagnóstico cerrado, sino como una plataforma de aprendizaje y gestión adaptativa. Cada tipología en sus distintos contextos de conexión SIN, ZNI o mixto aporta lecciones sobre los modos de producir, gestionar y compartir energía, pero también sobre la capacidad de innovación desde la escasez y la cooperación comunitaria. En esa capacidad radica la verdadera inteligencia energética: no en la sofisticación tecnológica, sino en la habilidad para articular conocimiento local, solidaridad y sostenibilidad en un mismo proyecto territorial.

#### **4.8 Conclusiones sobre las tipologías**

El análisis integral de las tipologías de comunidades energéticas en municipios de sexta categoría en Colombia permite afirmar que la transición energética justa no puede concebirse como un proceso uniforme ni centralizado, sino como una trayectoria diferenciada de madurez energética que responde a las particularidades geográficas,

institucionales y de conexión al sistema eléctrico nacional. Los resultados muestran que la relación entre los municipios del SIN, las ZNI y los municipios mixtos define las rutas posibles de evolución energética y las estrategias más adecuadas para alcanzar la equidad territorial y la estabilidad energética a largo plazo [36].

En primer lugar, las tipologías evidencian que los municipios de sexta categoría constituyen el núcleo crítico de la transición energética colombiana, concentrando tanto las brechas más profundas de acceso y calidad del servicio, como las mayores oportunidades de innovación social y tecnológica. En los municipios ZNI y mixtos la desconexión estructural del SIN convierte la energía en un bien escaso que condiciona el desarrollo humano y productivo. Por su parte, en los municipios del SIN la baja calidad del servicio, las pérdidas técnicas y la falta de resiliencia urbana revelan que la interconexión formal no equivale a un acceso efectivo. Por tanto, la energía debe abordarse no solo como infraestructura física, sino como factor de transformación social y cohesión territorial, articulado con los ejes de bienestar, productividad y protección ambiental.

En segundo lugar, la progresión entre las tipologías refleja una secuencia de madurez energética diferenciada según el grado de conexión: el Tipo 1 (ZNI y mixtos rurales dispersos) representa el acceso básico y la prioridad de cobertura; el Tipo 2 (mixtos y del SIN con vocación productiva) introduce la integración entre energía y desarrollo económico; el Tipo 3 (SIN, ZNI y mixtos hídricamente estratégicos) consolida la resiliencia ambiental mediante esquemas híbridos, y el Tipo 4 (municipios del SIN) avanza hacia la inteligencia energética con gestión digital, respaldo distribuido y participación ciudadana. Esta secuencia expresa una lógica de evolución adaptativa, coherente con los principios de la complejidad de la sostenibilidad [27], en la que cada territorio avanza de forma no lineal, aprendiendo, autoorganizándose y ajustando sus modelos de gobernanza y uso energético a su contexto particular.

Un tercer hallazgo central es la importancia estratégica de la gobernanza comunitaria y multinivel, especialmente en los municipios ZNI y mixtos. La experiencia comparada demuestra que las comunidades energéticas requieren estructuras de decisión horizontales, mecanismos de participación continua y marcos regulatorios flexibles capaces de adaptarse a la diversidad territorial. La Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15] establece que el éxito de los proyectos depende tanto de la viabilidad técnica como del fortalecimiento institucional local. En consecuencia, la construcción de capacidades en gestión, mantenimiento, monitoreo y gobernanza participativa debe considerarse parte sustantiva de la política energética, especialmente en municipios con menor institucionalidad o con redes fragmentadas.

Así mismo, la clasificación de las tipologías permite priorizar inversiones públicas de manera equitativa y territorialmente diferenciada, según el tipo de conexión y el nivel de madurez energética.

- Los municipios ZNI del Tipo 1 requieren infraestructura básica, apoyo técnico y financiamiento inicial para sustituir el diésel y garantizar acceso continuo.
- Los municipios mixtos del Tipo 2 necesitan incentivos productivos, integración de energías renovables con cadenas agroindustriales y desarrollo de capacidades empresariales rurales.
- Los municipios SIN y mixtos del Tipo 3 deben fortalecer la gestión ambiental, la resiliencia hídrica y la operación híbrida (hidrosolar), priorizando la preservación de los ecosistemas locales.
- Finalmente, los municipios SIN Tipo 4 requieren tecnologías inteligentes, automatización y redes locales de respaldo para mejorar la calidad del servicio y la eficiencia energética.

Esta planeación diferenciada contribuye a la descentralización energética efectiva, alineando los objetivos de cobertura, eficiencia y sostenibilidad con los principios de la equidad territorial y la justicia energética. En este sentido, las tipologías se consolidan como una hoja de ruta técnica y social para orientar la inversión pública y fortalecer los modelos de gestión local de la energía en todo el territorio nacional.

Desde una perspectiva crítica, el ejercicio de tipificación pone en evidencia las tensiones estructurales entre autonomía, dependencia, equidad, eficiencia, modernización tecnológica y apropiación comunitaria. La consolidación de las comunidades energéticas dependerá de la capacidad del Estado para articular políticas

multinivel que promuevan la participación local sin abandonar el acompañamiento institucional. Ahora bien, en los municipios ZNI y mixtos esta articulación es vital para evitar el aislamiento operativo, mientras que en los municipios del SIN el desafío radica en democratizar la gestión y reducir la vulnerabilidad del sistema centralizado. En ambos casos, la creación de redes de aprendizaje, alianzas público-comunitarias y esquemas de financiamiento mixtos será esencial para sostener los procesos en el tiempo.

Finalmente, las tipologías aportan un marco conceptual y operativo que trasciende la clasificación descriptiva y se proyecta como una estrategia de construcción de inteligencia energética territorial. Cada tipo refleja una forma específica de relación entre comunidad, territorio y energía; cada escenario de solución constituye una etapa de aprendizaje colectivo y de fortalecimiento institucional. Desde la óptica de los territorios inteligentes y sostenibles [27], la inteligencia energética no se limita al uso de tecnologías avanzadas, sino que se manifiesta en la capacidad de las comunidades SIN, ZNI y mixtas para gestionar la complejidad, adaptarse a los cambios y generar bienestar multidimensional a partir de la energía.

En síntesis, la clasificación propuesta no constituye un punto de llegada sino el punto de partida hacia el modelo integral de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles, que será desarrollado en el siguiente capítulo. Dicho modelo deberá integrar los hallazgos aquí presentados, articulando los principios de autonomía, resiliencia, equidad y gobernanza distribuida, con un marco operativo que combine infraestructura tecnológica, gestión ambiental, participación ciudadana y conocimiento local. Solo así será posible avanzar hacia una transición energética verdaderamente justa y territorialmente diferenciada, en la cual cada municipio ya sea SIN, ZNI o mixto participe activamente en la construcción de un futuro energético, inteligente, sostenible e inclusivo para Colombia.

## **5. ESTRUCTURA SISTÉMICA DE LAS COMUNIDADES ENERGÉTICAS INTELIGENTES Y SOSTENIBLES**

A partir de las tipologías identificadas en el capítulo anterior, este segundo capítulo de resultados profundiza en las dinámicas internas que explican cómo las comunidades energéticas evolucionan hacia mayores grados de inteligencia y sostenibilidad. Para ello, se adopta un enfoque de dinámica de sistemas que permite analizar las relaciones de causalidad circular y los bucles de realimentación que impulsan o limitan la transición energética en municipios de sexta categoría. Oportuno es anotar que la identificación de bucles se realizó mediante un proceso de modelado conceptual basado en la dinámica de sistemas [38], integrando información empírica proveniente de las tipologías territoriales descritas previamente y de la literatura especializada sobre comunidades energéticas. Con este propósito, se emplearon diagramas causales y análisis de dominancia para determinar las relaciones clave entre variables técnicas, sociales y económicas.

### **5.1 Introducción**

La comprensión de las dinámicas de transformación que configuran la fiabilidad energética en municipios de sexta categoría en Colombia requiere un abordaje sistémico que supere la lectura lineal de causas y efectos. Estos municipios, caracterizados por su alta dispersión poblacional, limitaciones fiscales y dependencias estructurales de modelos energéticos centralizados, representan entornos donde la innovación social y tecnológica se articula como estrategia de supervivencia y desarrollo [15]. En este contexto, el segundo resultado de la investigación se centra en la identificación y el análisis de los bucles que explican la manera en que los procesos de transición energética comunitaria generan efectos acumulativos, sinérgicos y autoorganizativos en los territorios.

La relevancia de este análisis radica en que los bucles identificados, constituyen mecanismos que impulsan los cambios sostenidos en los sistemas complejos [38]. En el caso de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles, estos bucles reflejan los ciclos virtuosos que emergen cuando la energía renovable descentralizada se integra con modelos de gobernanza participativa, educación técnica local y estructuras solidarias de gestión. Por tanto, la identificación de estos bucles permite reconocer cómo los pequeños avances tecnológicos o sociales pueden amplificarse y generar transiciones estructurales hacia la resiliencia y la autonomía energética.

Esta sección se conecta directamente con las tipologías de comunidades energéticas desarrolladas en el primer capítulo de resultados, donde se establecieron cuatro categorías principales:

1. Territorios dispersos con asilamiento físico digital;
2. Núcleos productivos rurales con potencial agroindustrial;
3. Territorios con alta oferta hídrica y riesgo climático;
4. Cabeceras municipales conectadas, pero con baja calidad de servicio.

Cada una de estas tipologías se comporta como un subsistema interdependiente dentro del entramado energético municipal. Los bucles, se constituyen en los nexos dinámicos que vinculan dichas tipologías, revelando las trayectorias adaptativas del sistema energético comunitario colombiano. De esta forma, la identificación de los bucles permite pasar del análisis estático de la estructura institucional a una visión dinámica de la transformación territorial, donde las decisiones colectivas, las tecnologías apropiadas y las prácticas de gestión local coevolucionan hacia estados de equilibrio territorial y mayor bienestar [16].

Así, el objetivo de este capítulo es caracterizar los diez bucles que operan en el marco de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles, explicar su lógica interna, analizar su dominancia temporal y derivar puntos de palanca e intervenciones estratégicas. La mirada sistémica aquí adoptada no se limita a describir relaciones causales, sino que busca comprender las trayectorias adaptativas del sistema energético comunitario hacia un estado de bienestar multidimensional sostenido. Esta noción trasciende la cobertura eléctrica y abarca dimensiones sociales, económicas, ambientales y culturales [27] [33].

En síntesis, este capítulo propone que la transición energética comunitaria en municipios de sexta categoría no depende únicamente de la incorporación tecnológica, sino del reforzamiento circular de capacidades locales. Los bucles identificados constituyen la evidencia de un proceso donde la energía deja de ser un servicio exógeno y se convierte en el núcleo organizador de nuevas formas de cohesión social, innovación territorial y gobernanza solidaria.

## 5.2 Perspectiva sistémica

El análisis de los bucles se fundamenta en la dinámica de sistemas para estudiar la evolución de sistemas complejos mediante la identificación de relaciones de causalidad circular. En este enfoque los sistemas se conciben como redes de realimentación, donde las variables se influyen mutuamente.

Desde esta óptica, las comunidades energéticas son sistemas sociotécnicos complejos que integran flujos energéticos, económicos, institucionales y simbólicos, y cuya sostenibilidad depende del equilibrio entre estos dominios. En los municipios de sexta categoría esta complejidad se expresa en la necesidad de compatibilizar la autonomía energética local con la viabilidad económica, la inclusión social y la preservación ambiental [29]. Los bucles permiten observar cómo estos componentes interactúan, generando procesos virtuosos sobre aspectos como, por ejemplo, la forma como el acceso a energía confiable impulsa la productividad local, lo que a su vez fortalece la capacidad de reinversión comunitaria y mejora la gestión energética.

### 5.2.1 Enfoque conceptual para la sostenibilidad energética comunitaria

El análisis de los bucles parte de la conceptualización de la fiabilidad energética comunitaria como una forma de sostenibilidad de paisajes [16], es decir, la capacidad del territorio para proveer servicios ecosistémicos y energéticos que sostengan el bienestar humano en el largo plazo. Esta definición implica que los sistemas energéticos locales deben ser autoorganizados, resilientes y adaptativos, cualidades propias de los sistemas vivos [27]. En consecuencia, los bucles identificados, son interpretados como mecanismos de autoorganización, donde la comunidad, al interactuar con su entorno biofísico y tecnológico, construye gradualmente trayectorias de desarrollo viable a largo plazo.

### 5.2.2 Metodología para la identificación de la estructura sistémica

La identificación de los diez bucles se realizó combinando dos niveles de análisis: el estructural y el dinámico.

- **Nivel estructural:** Se elaboró un mapa causal inicial del sistema energético comunitario, identificando las principales variables interrelacionadas, a saber: demanda de energía, tecnología y productividad, desarrollo basado en capacidad energética, cambio climático, calidad de la energía, gobernanza y eficiencia, oferta

energética, conflictos, decisiones inteligentes y retención del talento humano . Estas variables fueron organizadas en un modelo de dinámica causal utilizando la herramienta Vensim®.

- **Nivel dinámico:** A partir del modelo estructural se trazaron los circuitos de realimentación que reflejan cómo las interacciones entre variables generan efectos acumulativos. Se aplicó la técnica de análisis de dominancia temporal que permite establecer en qué fases de madurez comunitaria cada bucle ejerce mayor influencia [39].

El resultado fue la identificación de diez bucles interconectados, clasificados en tres categorías según su función sistémica:

- **Bucles de base estructural**, que sustentan la autosuficiencia y resiliencia energética.
- **Bucles de expansión adaptativa**, que impulsan la diversificación productiva y la digitalización.
- **Bucles de cohesión y bienestar**, que consolidan la gobernanza, equidad y sostenibilidad.

Cada bucle fue descrito en términos de su estructura causal, impactos esperados, condiciones de activación y potenciales de replicabilidad en municipios de sexta categoría.

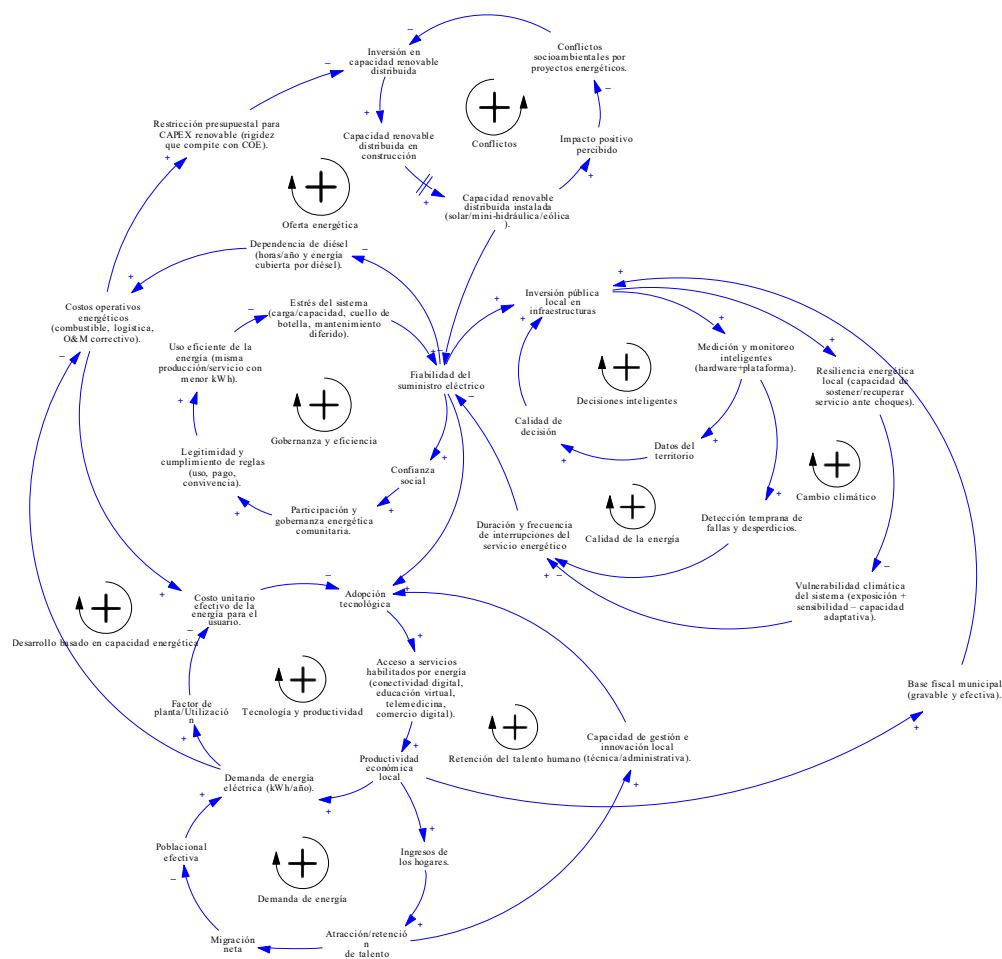
Esta metodología se inspiró en los marcos analíticos de sostenibilidad propuestos por Paish [37] para microhidroeléctricas rurales, Muh y Tabet [28] para sistemas híbridos *off-grid*, y Juanpera et al. [25] para la evaluación a largo plazo de proyectos de electrificación en comunidades rurales. La integración de estos enfoques permitió contextualizar la dinámica de los bucles dentro de las realidades socioeconómicas y tecnológicas del país, resaltando que la sostenibilidad comunitaria no emerge de la suma de componentes aislados, sino de la sinergia circular entre ellos. En síntesis, la metodología aplicada parte del reconocimiento de que los sistemas energéticos comunitarios son sistemas vivos [27]. Identificar sus bucles equivale a comprender los patrones de aprendizaje colectivo y la adaptación que les permiten evolucionar desde la vulnerabilidad energética hacia un bienestar multidimensional sostenido, concepto que será retomado al final del capítulo como núcleo interpretativo del sistema.

### 5.2.3 Descripción detallada de la estructura sistémica

El proceso de modelación sistémica desarrollado permitió identificar diez bucles que constituyen la arquitectura dinámica del sistema energético comunitario en municipios de sexta categoría. Estos bucles no deben entenderse como estructuras independientes, sino como subsistemas interconectados que, en conjunto, explican la transición hacia comunidades energéticas inteligentes y sostenibles. Cada bucle representa un circuito de realimentación positiva en el que una acción o cambio inicial se amplifica mediante relaciones causales circulares.

Su análisis integra las dimensiones técnica, social, ambiental y económica, siguiendo la metodología de paisajes sostenibles [16] y los principios de la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas [15].

*Figura 11. Diagrama causal.*



*Fuente: elaboración propia.*

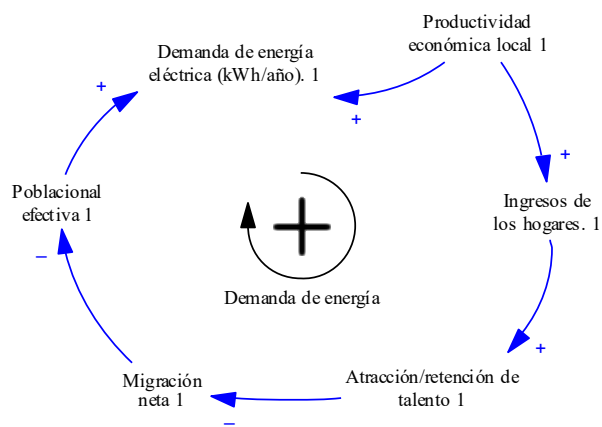
**Bucle 1. Demanda energía.**

Este bucle de refuerzo representa una dinámica virtuosa en torno a la expansión de la demanda eléctrica en territorios donde el acceso energético impulsa procesos de transformación productiva y social. El incremento en la demanda de energía eléctrica conlleva un aumento en el factor de utilización de la infraestructura energética, lo cual permite una distribución más eficiente de los costos fijos, reduciendo el costo unitario efectivo para el usuario. Este menor costo facilita la adopción tecnológica, entendida como la integración de dispositivos, plataformas y sistemas habilitados por energía como la conectividad digital, la educación virtual, la telemedicina y el comercio electrónico. Estos servicios no solo mejoran el acceso a derechos básicos, sino que elevan significativamente la productividad económica local. A su vez, este incremento en la productividad genera un aumento en la capacidad adquisitiva de los hogares y las pequeñas unidades económicas, estimulando una mayor demanda de energía. Así se cierra un ciclo virtuoso donde energía, tecnología y productividad se realimentan positivamente.

Cada eslabón de este bucle está sustentado en relaciones causales ampliamente respaldadas por la literatura en economía energética y desarrollo territorial. El aumento en el factor de planta, resultado del crecimiento en la demanda energética, permite reducir el costo unitario de la energía al distribuir los costos operativos y de capital sobre un mayor volumen de kWh consumidos. Esta reducción en costos energéticos tiene un efecto directo en la viabilidad económica de tecnologías que antes resultaban inaccesibles para comunidades rurales o vulnerables.

La adopción tecnológica habilita servicios esenciales que dependen críticamente de la estabilidad energética como los entornos virtuales de aprendizaje, la atención médica a distancia y el comercio digital, los cuales a su vez transforman la estructura productiva local. Wu et al. [16] destacan que la integración de estas tecnologías mejora la eficiencia sistémica y genera economías de escala que refuerzan la competitividad territorial. Así, la demanda energética no es simplemente un reflejo del consumo sino un catalizador de desarrollo endógeno, cerrando un ciclo de realimentación positiva basado en eficiencia y bienestar.

*Figura 12 Bucle 1. Demanda energía.*



*Fuente: elaboración propia.*

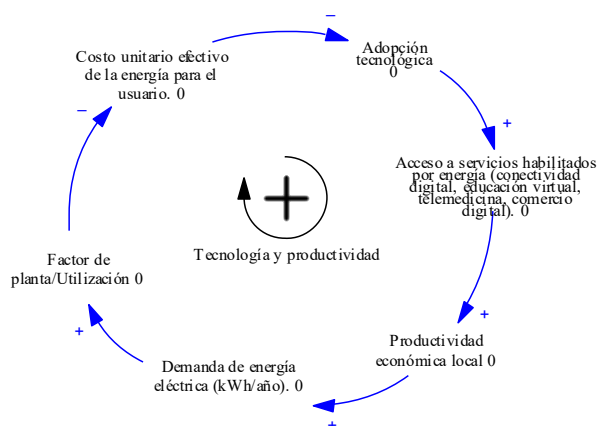
## **Bucle 2. Tecnología y productividad.**

Este bucle refleja una dinámica más compleja dentro del sistema energético territorial, en el cual los costos operativos actúan como una condición crítica que puede fortalecer o debilitar la trayectoria de desarrollo. En este caso, el crecimiento en la demanda de energía eléctrica eleva los costos operativos asociados al suministro (combustibles, logística, mantenimiento correctivo), lo que repercute directamente sobre el costo unitario de la energía para el usuario final. Un mayor costo reduce la asequibilidad energética, restringiendo la adopción tecnológica en sectores clave. Esto limita el acceso a servicios habilitados por energía como la educación virtual, la telemedicina y la conectividad digital, afectando negativamente la productividad económica local. Al disminuir la productividad también disminuye la capacidad de consumo energético, lo cual realimenta el sistema hacia una nueva alza de costos operativos por menor eficiencia de escala. Así, el bucle revela una realimentación positiva que puede devenir en trayectorias de empobrecimiento energético si no se gestionan adecuadamente los costos operativos.

Cada relación causal en este bucle evidencia cómo el costo unitario de la energía actúa como un nodo estratégico en los sistemas energéticos descentralizados. A medida que la demanda de energía crece, los requerimientos logísticos y de operación —especialmente en zonas de difícil acceso— se intensifican, incrementando costos que luego son transferidos al usuario final. Esta alza restringe la adopción tecnológica al volver inviable económicamente el uso de equipamientos digitales o dispositivos conectados que dependen de un suministro constante y asequible.

Dicha limitación impacta directamente la posibilidad de acceder a servicios habilitados por energía que son clave para dinamizar la productividad económica, como los canales de venta en línea o las plataformas educativas. Como indican Muh y Tabet [28], en territorios aislados estos costos pueden tener un peso desproporcionado, generando bucles de pobreza energética en los que la falta de acceso a servicios limita el desarrollo económico y viceversa. Por ello, este bucle evidencia la importancia de políticas públicas orientadas a reducir los costos operativos mediante tecnologías limpias, eficiencias logísticas y economías de escala.

Figura 13 Bucle 2. Tecnología y productividad.



Fuente: elaboración propia.

### Bucle 3. Desarrollo basado en capacidad energética.

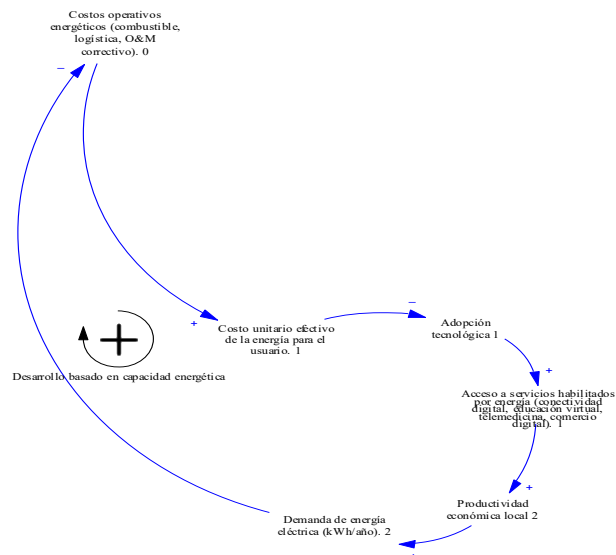
Este bucle articula la estrecha relación entre costos operativos, restricciones de inversión y capacidad de respuesta energética, destacando cómo una mala gestión financiera puede erosionar la posibilidad de consolidar un sistema energético resiliente. En este esquema, el crecimiento en la demanda energética genera un aumento en los costos operativos, especialmente en entornos que dependen de combustibles fósiles y redes logísticas costosas. Estos mayores costos reducen la disponibilidad de recursos para inversión en infraestructura energética, en particular en capacidad renovable distribuida.

Las restricciones presupuestarias en el CAPEX renovable (por competencia con el COE) limitan la expansión de sistemas solares, minihidráulicos o eólicos, lo cual a su vez deteriora la fiabilidad del suministro eléctrico. Un sistema menos fiable reduce la adopción tecnológica, restringiendo el acceso a servicios habilitados por energía. Este descenso en la calidad del servicio impacta negativamente la productividad económica local, cerrando un bucle en el que la debilidad en la capacidad energética frena el desarrollo territorial de manera acumulativa.

Las relaciones causales en este bucle están profundamente enraizadas en las tensiones estructurales que enfrentan las economías locales, al intentar expandir su infraestructura energética con recursos limitados. El aumento de los costos operativos, común en zonas sin acceso a energía convencional, genera una presión fiscal que compite directamente con las inversiones necesarias en energías renovables distribuidas. Esta competencia presupuestal se manifiesta en una menor inversión en tecnologías limpias y en una expansión limitada de la capacidad instalada. La baja penetración de renovables conlleva una menor estabilidad del suministro, afectando la continuidad del servicio.

La consecuencia directa es una adopción tecnológica restringida, ya que muchos servicios digitales requieren alta disponibilidad de energía. Como lo resaltan López-Castrillón et al. [29], este tipo de bucles es especialmente peligroso en contextos remotos, donde la rigidez fiscal y la vulnerabilidad social pueden perpetuar un ciclo de baja productividad y exclusión energética. En resumen, este bucle enfatiza cómo la eficiencia operativa y la inversión en infraestructura renovable son condiciones habilitantes para la viabilidad del desarrollo basado en energía.

Figura 14 Bucle 3. Desarrollo basado en capacidad energética.



Fuente: elaboración propia.

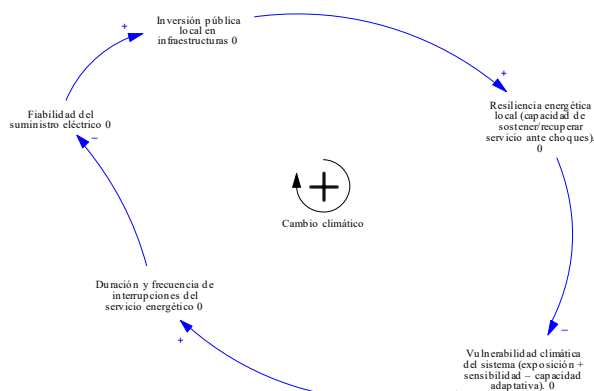
#### Bucle 4. Cambio climático.

Este bucle de refuerzo se centra en la interrelación entre fiabilidad del suministro eléctrico, inversión pública en infraestructura y resiliencia energética frente a choques climáticos. Una mayor fiabilidad en el suministro genera confianza institucional y técnica, lo que facilita la asignación de recursos públicos hacia infraestructura energética robusta. Estas inversiones aumentan la resiliencia del sistema, es decir, su capacidad para resistir, absorber y recuperarse de eventos extremos como tormentas, sequías o incendios. A medida que mejora la resiliencia energética, disminuye la vulnerabilidad climática, entendida como una combinación de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa del sistema. Esta reducción se traduce en una menor duración y frecuencia de interrupciones eléctricas, lo que a su vez refuerza la fiabilidad inicial del sistema. Este ciclo crea una realimentación positiva en la que los beneficios acumulativos fortalecen la estabilidad energética, permitiendo enfrentar el cambio climático de forma proactiva mediante infraestructura adaptativa y una gestión territorial preventiva de riesgos.

Las relaciones causales en este bucle se fundamentan en la evidencia empírica y teórica sobre el papel estratégico de la inversión pública en resiliencia energética. La mejora de la fiabilidad del sistema eléctrico, visible en reducidas interrupciones, menor variabilidad de voltaje, capacidad de respuesta ante emergencias, genera condiciones institucionales que favorecen decisiones de inversión a largo plazo en infraestructura. Estas decisiones permiten fortalecer los componentes críticos del sistema, esto es, líneas de distribución reforzadas, respaldo modular con renovables, sistemas de almacenamiento, entre otros.

Esta inversión mejora la resiliencia, es decir, la habilidad de enfrentar choques sin comprometer el funcionamiento estructural del sistema energético. Una resiliencia elevada reduce la vulnerabilidad climática total, mitigando tanto la exposición como los impactos sistémicos derivados de eventos extremos. Como lo indican Ma et al. (2014) [40], los sistemas eléctricos resilientes presentan una menor tasa de interrupción durante fenómenos climáticos severos, reforzando su fiabilidad técnica. Así, el bucle genera una trayectoria positiva que refuerza la estabilidad energética territorial ante el cambio climático.

Figura 15 Bucle 4. Cambio climático.



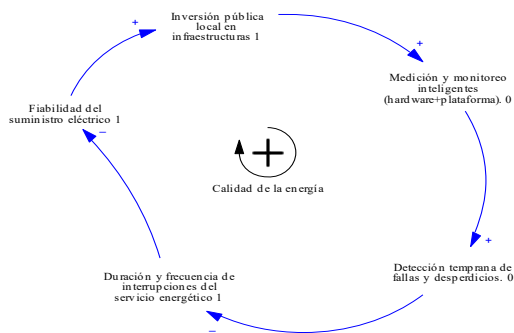
Fuente: elaboración propia.

### Bucle 5. Calidad de la energía.

Este bucle de refuerzo se enfoca en el vínculo entre fiabilidad del suministro eléctrico, inversiones en infraestructura y digitalización del monitoreo operativo del sistema. Cuando el sistema es fiable, los gobiernos locales y actores institucionales están más dispuestos a realizar inversiones en infraestructura energética, especialmente en tecnologías de medición y monitoreo inteligente. Estas inversiones permiten desplegar sensores, plataformas digitales y sistemas de supervisión que identifican fallas, desperdicios de energía y puntos críticos en la red en tiempo real. Esta detección temprana permite intervenciones preventivas o correctivas rápidas, lo que reduce la duración y frecuencia de interrupciones del servicio. Como resultado, la fiabilidad del suministro mejora progresivamente. Así, este bucle crea una realimentación positiva en la que la digitalización, apoyada por inversiones públicas y legitimada por un sistema confiable, mejora la eficiencia técnica, reduce pérdidas y consolida un sistema energético más robusto y estable, particularmente en contextos rurales o de difícil acceso.

Cada relación causal en este bucle se basa en la creciente evidencia de que la fiabilidad energética es un catalizador clave para la adopción de tecnologías digitales en infraestructura pública. Cuando un sistema eléctrico es confiable se reducen las pérdidas técnicas, los apagones no programados y los conflictos operativos, lo que genera un entorno favorable para atraer inversión pública local, especialmente en tecnologías emergentes. Estas inversiones en hardware (sensores, dispositivos IoT) y plataformas de software (algoritmos de análisis de datos, sistemas de alerta temprana) permiten monitorear en tiempo real variables críticas como el voltaje, las oscilaciones de carga y el estado de los activos. Como destaca Juanpera [25], estas tecnologías pueden reducir hasta un 40% las pérdidas operativas en sistemas eléctricos distribuidos. Además, la detección proactiva de fallas mejora la planificación del mantenimiento y evita interrupciones prolongadas, fortaleciendo aún más la fiabilidad del sistema. De este modo, se consolida un bucle de mejora continua en eficiencia y calidad del servicio.

Figura 16 Bucle 5. Calidad de la energía.



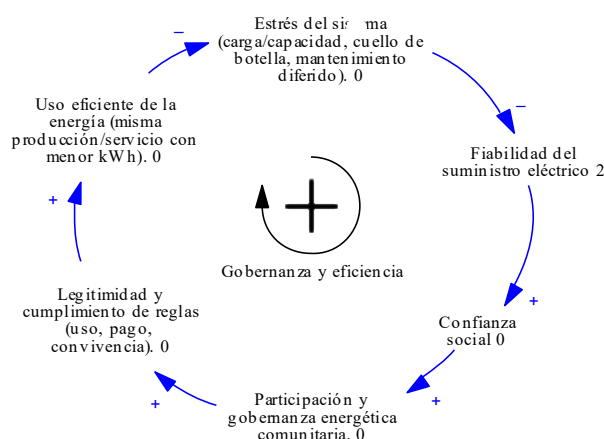
Fuente: elaboración propia.

## Bucle 6. Gobernanza y eficiencia.

Este bucle articula una lógica de realimentación positiva en torno a la dimensión socioinstitucional del sistema energético, centrada en la gobernanza comunitaria y en la eficiencia en el uso de la energía. La fiabilidad del suministro eléctrico genera confianza social, en tanto asegura un servicio constante y predecible. Esta confianza facilita la participación de las comunidades en los procesos de gobernanza energética, incluyendo decisiones sobre tarifas, mantenimiento, uso racional de la energía y expansión de redes. Una mayor participación fortalece la legitimidad de las normas y el cumplimiento de reglas locales relacionadas con el uso eficiente de la energía (por ejemplo, horarios de consumo, pago por servicio, reportes de fallas). Este comportamiento colectivo responsable reduce el estrés sobre el sistema eléctrico en casos como la sobrecarga, los cuellos de botella o el deterioro de equipos, y mejora su desempeño técnico. El resultado es una mayor fiabilidad del sistema, lo que cierra un bucle virtuoso de gobernanza participativa y eficiencia energética.

Las relaciones causales de este bucle ponen en evidencia que la estabilidad técnica de un sistema energético no puede entenderse sin considerar las variables sociales que lo sostienen. Cuando el sistema eléctrico es confiable, los usuarios perciben una correspondencia entre el pago del servicio y su calidad, lo que incrementa la confianza institucional. Esta percepción positiva promueve mayores niveles de participación comunitaria en espacios de toma de decisiones como comités de energía, cooperativas eléctricas o plataformas de consulta ciudadana. La gobernanza participativa genera legitimidad, es decir, aceptación activa de las normas, lo cual incentiva comportamientos de uso eficiente de la energía en casos como evitar consumos pico innecesarios o reportar rápidamente anomalías técnicas. Esta eficiencia reduce el estrés sobre la red eléctrica, mejorando su estabilidad. Bory et al. [31] subrayan cómo la interacción entre confianza social, gobernanza inclusiva y desempeño técnico es clave para sistemas energéticos robustos. Así, este bucle vincula técnica, cultura y organización social en una dinámica sinérgica de largo plazo.

Figura 17 Bucle 6. Gobernanza y eficiencia.



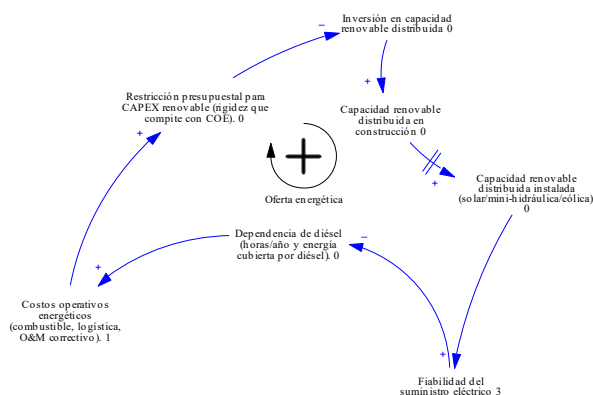
Fuente: elaboración propia.

## Bucle 7. Oferta energética.

Este bucle de refuerzo representa una dinámica estratégica en la transición hacia fuentes renovables, articulando la fiabilidad del suministro, la dependencia del diésel y la inversión en capacidad distribuida. Una mayor fiabilidad del sistema eléctrico reduce la dependencia de generación a diésel, lo que implica menores costos operativos asociados a combustible, logística y mantenimiento correctivo. Esta disminución en los costos libera recursos presupuestales que pueden ser redirigidos hacia inversiones de capital (capex) en energías renovables distribuidas como la solar, minihidráulica o eólica. A medida que se invierte en infraestructura renovable se incrementa la capacidad instalada y, en consecuencia, la fiabilidad del suministro mejora nuevamente. Este proceso desencadena un ciclo virtuoso en el que la estabilidad técnica inicial permite disminuir el uso de tecnologías costosas y contaminantes, promoviendo un cambio estructural hacia una matriz energética más limpia, autónoma y resiliente. Este bucle es particularmente relevante en territorios aislados, donde la autosuficiencia energética es una condición habilitante para el desarrollo.

Las relaciones causales de este bucle están sustentadas en la evidencia sobre los efectos de la transición energética en territorios con alta dependencia de combustibles fósiles importados. La fiabilidad del sistema eléctrico incide directamente en la necesidad de respaldo mediante grupos electrógenos a diésel. Cuando el sistema es estable, la cantidad de horas de operación de los generadores disminuye, lo cual implica menos consumo de diésel y, por tanto, menores costos asociados al abastecimiento y a la operación logística en contextos geográficos complejos. Esta reducción de costos operativos amplía el margen fiscal y permite redirigir recursos hacia inversiones de capital, específicamente en fuentes renovables con menor costo operativo a largo plazo. La inversión fortalece la capacidad instalada renovable, lo cual mejora la fiabilidad del suministro y refuerza el ciclo. Muh y Tabet [28] destacan que este tipo de transición mejora la estabilidad técnica y financiera de sistemas eléctricos en comunidades rurales, consolidando un cambio estructural que minimiza la exposición a la volatilidad de los precios del petróleo y a los riesgos logísticos.

Figura 18 Bucle 7. Oferta energética.



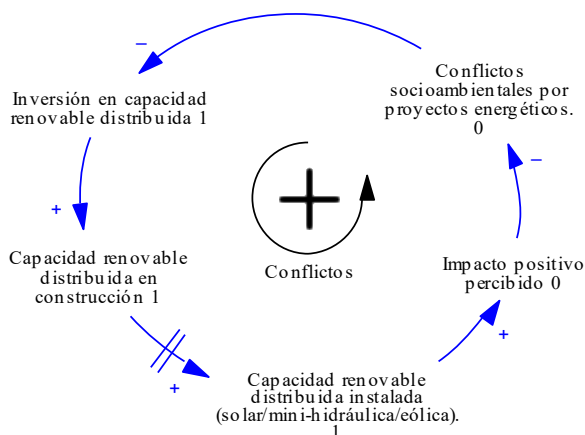
Fuente: elaboración propia.

## Bucle 8. Conflictos.

Este bucle de refuerzo aborda la interacción entre los impactos sociales de los proyectos energéticos y la capacidad de expansión de la infraestructura renovable. Los conflictos socioambientales derivados de proyectos energéticos, especialmente en contextos con baja participación comunitaria o ausencia de consulta previa, afectan negativamente la inversión en capacidad renovable distribuida. Al verse afectada, esta inversión retrasa o detiene la construcción de nueva infraestructura renovable. Una vez que se reduce el avance en construcción también se limita el volumen de capacidad instalada. En contraposición, cuando se logra avanzar en la instalación efectiva de infraestructura renovable, los impactos positivos percibidos por las comunidades —verbigracia, empleo local, mejora en servicios y menor contaminación— tienden a disminuir la intensidad de los conflictos. Esta reducción en los conflictos favorece nuevas inversiones, cerrando así un ciclo virtuoso donde la gestión adecuada de los impactos sociales permite ampliar la capacidad renovable instalada, lo cual es clave para garantizar una transición energética justa, inclusiva y eficiente.

Las relaciones que componen este bucle reflejan la relevancia de los factores sociales y ambientales en la viabilidad de las transiciones energéticas. Los conflictos socioambientales surgen cuando las comunidades perciben que los costos sociales, ambientales o culturales de los proyectos energéticos superan sus beneficios. Estos conflictos generan incertidumbre jurídica, bloqueos institucionales y resistencia social, lo cual impacta negativamente la decisión de inversión en capacidad renovable. En la medida en que las inversiones se frenan o reducen, también lo hace la construcción de infraestructura, afectando la capacidad instalada y, por consiguiente, la cobertura energética del sistema. Sin embargo, cuando la capacidad instalada se concreta con impactos positivos percibidos (por ejemplo, empleo local, electrificación rural o reducción de contaminación), se reduce la conflictividad y se facilita una nueva ola de inversiones. Wu et al. [16] subrayan que una gobernanza energética inclusiva y estructuralmente adaptativa permite integrar las preocupaciones de las comunidades en el diseño de proyectos, reduciendo riesgos y generando sinergias sociales y técnicas.

Figura 19 Bucle 8. Conflictos.



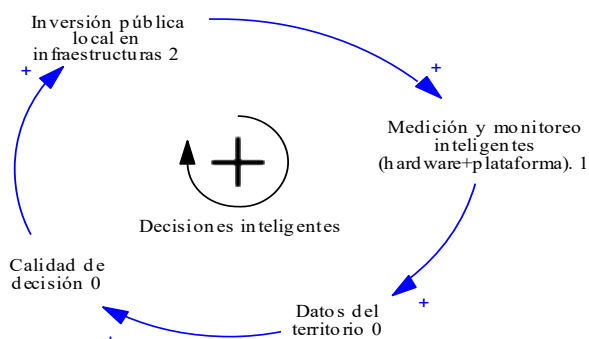
Fuente: elaboración propia.

### Bucle 9. Decisiones inteligentes.

Este bucle de refuerzo pone en el centro del análisis el papel de la digitalización y la inteligencia territorial como factores habilitantes para la mejora continua del sistema energético. Una mayor inversión pública local en infraestructura energética permite la instalación de sistemas de medición y monitoreo inteligente. Estos sistemas recolectan datos clave del territorio en tiempo real, lo cual mejora la calidad de la toma de decisiones en cuanto a mantenimiento, expansión y uso eficiente de recursos. Las decisiones mejor informadas aumentan la eficacia de las inversiones, priorizando puntos críticos del sistema eléctrico, optimizando costos y reduciendo fallas. Esta eficiencia técnica y financiera fortalece la confianza en el sistema, generando un entorno favorable para nuevas inversiones públicas. Así, se refuerza el ciclo de realimentación en el cual la inteligencia territorial, mediada por datos y tecnología, actúa como catalizador de un desarrollo energético local adaptativo, resiliente y escalable.

La cadena causal de este bucle parte de la premisa de que la calidad de las decisiones públicas depende en gran medida de la disponibilidad, precisión y oportunidad de la información territorial. La inversión en infraestructura permite incorporar sistemas de monitoreo inteligentes, los cuales integran hardware (sensores, redes de medición) y software (plataformas analíticas, sistemas de alarma temprana) capaces de detectar fallas incipientes y optimizar el uso del sistema. Esta digitalización genera datos que nutren la toma de decisiones estratégicas, mejorando la asignación de recursos y reduciendo la exposición a fallas críticas. Para Ceglia et al. [14], estos sistemas no solo previenen pérdidas, sino que fortalecen la legitimidad de las decisiones públicas, abriendo nuevas oportunidades de inversión descentralizada. En ese contexto, la inversión inicial se justifica ex post por su capacidad de activar dinámicas virtuosas, donde la inteligencia territorial basada en datos refuerza la eficiencia operativa y genera confianza institucional para nuevas asignaciones presupuestales.

Figura 20 Bucle 9. Decisiones inteligentes.



Fuente: elaboración propia.

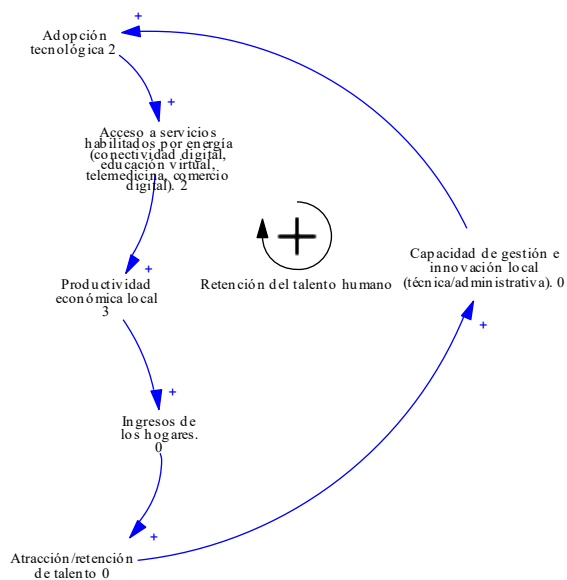
### Bucle 10. Retención del talento humano.

Este bucle de refuerzo articula la dimensión organizacional del sistema energético con el desarrollo del capital humano territorial. Una mayor capacidad de gestión e innovación local, tanto técnica como administrativa, promueve la adopción tecnológica en el sistema energético. Esta adopción permite el acceso a servicios digitales habilitados por energía como conectividad, educación virtual, telemedicina o comercio electrónico, los cuales mejoran la productividad económica local.

A su vez, una mayor productividad genera ingresos más estables para los hogares y las empresas, lo que mejora las condiciones de vida y de trabajo en el territorio. Estas mejoras hacen más atractiva la región para el talento humano, favoreciendo la retención y atracción de perfiles técnicos y profesionales. Este fortalecimiento del capital humano refuerza nuevamente la capacidad de gestión e innovación, cerrando así un ciclo virtuoso donde el desarrollo organizacional y el bienestar colectivo se realimentan positivamente, consolidando sistemas energéticos adaptativos, robustos y orientados al futuro.

Las relaciones de este bucle se basan en la premisa de que el desarrollo organizacional local es un factor estratégico para el equilibrio territorial. Una mayor capacidad técnica y administrativa permite gestionar eficazmente los sistemas energéticos, integrando tecnologías apropiadas, promoviendo mantenimientos preventivos y diseñando estrategias de largo plazo. Esta capacidad promueve la adopción tecnológica, la cual habilita servicios esenciales que amplifican las oportunidades productivas del territorio. A medida que la productividad aumenta, también lo hacen los ingresos de los hogares, reduciendo la emigración de talento y aumentando el atractivo para profesionales que buscan calidad de vida y estabilidad. La presencia de talento calificado refuerza nuevamente la capacidad de gestión local, alimentando un ciclo que favorece la modernización de la infraestructura, la innovación en servicios y la gobernanza energética. Wu et al. [16] y Juanpera [25] enfatizan en que estos factores (tecnología, inclusión digital, movilidad demográfica) son esenciales para alcanzar trayectorias viables a largo plazo en territorios periféricos o en transición.

Figura 21 Bucle 10. Retención del talento humano.



Fuente: elaboración propia.

#### 5.2.4 Dominancia de bucles

El análisis de la dominancia de bucles en los sistemas energéticos territoriales permite comprender la dinámica interna que gobierna la sostenibilidad y resiliencia de las comunidades energéticas. Cada bucle representa un conjunto de relaciones causales que, al reforzarse o equilibrarse, determinan la trayectoria adaptativa del sistema frente a variables como la demanda, la tecnología, la gobernanza o el cambio climático. Este enfoque, inspirado en la teoría de sistemas complejos [27], posibilita identificar puntos de apalancamiento que orientan las decisiones

estratégicas hacia una gestión más eficiente, inclusiva y resiliente de los recursos energéticos. En este contexto, el estudio de la dominancia de bucles no solo ofrece una herramienta de diagnóstico estructural, sino que también permite anticipar escenarios de saturación, realimentación negativa o sinergias positivas entre dimensiones técnicas, sociales y ambientales del sistema energético local.

- **Bucle 1. Demanda energética.**

A **corto plazo**, este bucle tiende a activarse en contextos donde la infraestructura energética ya está disponible pero subutilizada, lo que permite que pequeñas alzas en la demanda generen impactos significativos en la reducción del costo unitario. A **mediano plazo**, este bucle gana fuerza conforme se expande la adopción tecnológica y los servicios habilitados por energía multiplican su efecto sobre la productividad. Sin embargo, a **largo plazo** puede perder fuerza si no se acompaña de inversiones paralelas en capacidad energética, ya que una saturación del sistema limitaría el crecimiento de la demanda. Su dominancia depende de factores como la elasticidad de la demanda, la tasa de adopción tecnológica y la eficiencia del sistema. Interactúa positivamente con los bucles 10 (retención de talento) y 6 (gobernanza), pero puede ser inhibido si los bucles 2 y 3 generan restricciones operativas o presupuestarias. Su dominancia revela puntos de palanca en la gestión de costos y acceso tecnológico.

- **Bucle 2. Tecnología y productividad.**

Este bucle puede dominar a **corto plazo**, especialmente cuando la demanda de energía crece abruptamente sin una estrategia de eficiencia operativa. A medida que los costos operativos aumentan, también lo hace el costo unitario, reduciendo el acceso a tecnología. A **mediano plazo**, su efecto puede volverse negativo si no se controlan los gastos logísticos y de mantenimiento. Su dominancia estructural se activa cuando existen altas ineficiencias operativas y baja densidad de usuarios por unidad de infraestructura. Tiende a contrarrestar los efectos positivos de los bucles 1 y 10, actuando como un refuerzo de signo negativo que genera pobreza energética. Por ello, aunque sea un bucle de refuerzo, su dominancia puede tener implicaciones regresivas. El control de sus efectos implica actuar sobre costos variables y mejorar la eficiencia operativa del sistema.

- **Bucle 3. Desarrollo basado en capacidad energética.**

Este bucle presenta dominancia principalmente a **mediano y largo plazo**, dado que depende de procesos de inversión e instalación de infraestructura que requieren tiempos estructurales. Su activación depende de dos condiciones clave: i) la disponibilidad del capex para tecnologías renovables, y ii) la capacidad de evitar que los costos operativos absorban todo el presupuesto energético. Si estos factores se mantienen bajo control, el bucle puede ejercer una fuerte influencia positiva, habilitando un desarrollo sustentado en infraestructura confiable. Interactúa sinérgicamente con los bucles 4 y 7, que también giran en torno a la fiabilidad del sistema. Su dominancia genera impactos en productividad, estabilidad del suministro y reducción de conflictos sociales derivados de una baja calidad del servicio. Su punto de palanca más sensible es la inversión estratégica en energías renovables distribuibles.

- **Bucle 4. Cambio climático.**

Este bucle solo gana dominancia a **largo plazo**, especialmente si el sistema enfrenta eventos extremos (climáticos o de otra índole). Su estructura requiere tiempo para materializar beneficios: la inversión en infraestructura, la resiliencia mejorada y la reducción de vulnerabilidad operan con retardos temporales importantes. No obstante, cuando domina produce beneficios sistémicos altamente estabilizadores. Interactúa positivamente con los bucles 5 (calidad de energía) y 6 (gobernanza), ya que todos ellos refuerzan la confiabilidad del sistema desde distintos frentes. También tiene efectos protectores sobre los bucles 1 y 3, al disminuir la probabilidad de interrupciones energéticas. Su dominancia revela como punto de palanca la inversión preventiva en infraestructura resiliente, que permite romper ciclos de colapso inducidos por el cambio climático.

- **Bucle 5. Calidad de la energía.**

Este bucle puede dominar a **corto y mediano plazo**, particularmente cuando existen condiciones para la digitalización y los gobiernos locales cuentan con capacidad de inversión. Su activación depende de la fiabilidad previa del sistema, que legitima la adopción de tecnologías de medición y monitoreo inteligente. Interactúa positivamente con los bucles 4 (cambio climático) y 9 (decisiones inteligentes), ya que todos comparten una lógica de mejora de la eficiencia técnica. Su dominancia mejora la calidad del servicio y permite anticipar fallas, reduciendo las pérdidas no técnicas. Los efectos sistémicos de su dominancia se reflejan en mayor confianza institucional, menor tiempo medio de interrupción del servicio y una plataforma más robusta para decisiones operativas.

- **Bucle 6. Gobernanza y eficiencia.**

Este bucle puede emerger como dominante a **mediano plazo**, a medida que se consolidan procesos de participación comunitaria y gobernanza local del sistema energético. Su activación depende de la fiabilidad del sistema y de un entorno institucional que promueva la participación y legitimidad social. Cuando domina, actúa como estabilizador estructural del sistema, fortaleciendo normas de uso racional de la energía y reduciendo el estrés operativo. Interactúa sinérgicamente con los bucles 1, 5 y 10, generando beneficios cruzados entre eficiencia técnica, legitimidad institucional y atracción de talento. Su punto de palanca son los mecanismos de gobernanza inclusiva y formación ciudadana en gestión energética.

- **Bucle 7. Oferta energética.**

La dominancia de este bucle se observa principalmente a **mediano plazo**, en la medida en que el sistema logra reducir progresivamente su dependencia de diésel. Su activación depende de una combinación entre estabilidad del sistema, disponibilidad de capex para renovables y reducción de costos logísticos. Interactúa favorablemente con los bucles 3 y 4, ya que todos ellos convergen en la mejora de la fiabilidad del sistema mediante infraestructura renovable. Cuando domina, puede detonar una transición energética técnica y viable a largo plazo, reduciendo la exposición a perturbaciones externas como precios del petróleo o interrupciones de suministro. Su punto de palanca radica en los programas de transición energética territorial con fuentes renovables.

- **Bucle 8. Conflictos.**

Este bucle tiene una dominancia **estructural y de largo plazo**, y puede manifestarse como positivo o negativo dependiendo de cómo se gestionen los impactos socioambientales. Si los conflictos no se mitigan, el bucle refuerza la resistencia social y frena la inversión. Pero, si se logran beneficios percibidos por la comunidad, el bucle puede actuar como catalizador de inversiones. Interactúa directamente con los bucles 3 y 7, ya que ambos dependen de la expansión de capacidad renovable. Su dominancia revela puntos de palanca en la gestión social, la participación temprana y la distribución equitativa de beneficios en proyectos energéticos.

- **Bucle 9. Decisiones inteligentes.**

Este bucle puede volverse dominante a **corto y mediano plazo**, especialmente cuando existe inversión local y capacidad institucional para implementar sistemas de monitoreo inteligente. Su activación depende de la disponibilidad de datos del sistema energético y de una cultura organizacional basada en la toma de decisiones, teniendo en cuenta la evidencia. Se refuerza mutuamente con los bucles 5 y 10, y actúa como una capa cognitiva del sistema que facilita el aprendizaje institucional. Su dominancia genera impactos en eficiencia operativa, focalización del gasto y reducción de pérdidas, siendo clave para sistemas energéticos adaptativos.

- **Bucle 10. Retención del talento humano.**

Este bucle domina a **largo plazo**, dado que los procesos de atracción y consolidación del talento son progresivos y dependen de múltiples factores estructurales. Su activación se basa en una combinación de servicios habilitados por energía, condiciones de vida adecuadas y estabilidad económica. Interactúa positivamente con los bucles 1, 6 y 9, ya que se nutre de la fiabilidad técnica, la participación comunitaria y la innovación institucional. Su dominancia es

fundamental para sostener la innovación territorial y su punto de palanca está en políticas de desarrollo organizacional, formación profesional y movilidad del conocimiento.

**Tabla 4.** Dominancia de los bucles del sistema.

| Bucle                                        | Tipo     | Dominancia esperada                | Condición de activación                                  | Impacto sistémico principal                             |
|----------------------------------------------|----------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1. Demanda energética                        | Refuerzo | Corto y mediano plazo.             | Demanda creciente + infraestructura subutilizada.        | Expansión tecnológica y aumento de productividad.       |
| 2. Tecnología y productividad                | Refuerzo | Corto plazo (efecto regresivo).    | Altos costos operativos.                                 | Pobreza energética y limitación de acceso.              |
| 3. Desarrollo basado en capacidad energética | Refuerzo | Mediano y largo plazo.             | Disponibilidad d capex + control de costos operativos.   | Fortalecimiento estructural del sistema.                |
| 4. Cambio climático                          | Refuerzo | Largo plazo.                       | Inversión en resiliencia + clima extremo.                | Estabilidad ante eventos climáticos.                    |
| 5. Calidad de la energía                     | Refuerzo | Corto y mediano plazo.             | Fiabilidad previa + digitalización.                      | Mejora en calidad del servicio y reducción de pérdidas. |
| 6. Gobernanza y eficiencia                   | Refuerzo | Mediano plazo.                     | Gobernanza participativa + legitimidad.                  | Reducción del estrés sistémico y aumento de eficiencia. |
| 7. Oferta energética                         | Refuerzo | Mediano plazo.                     | Disminución del uso de diésel + inversión en renovables. | Transición energética inteligente y sostenible.         |
| 8. Conflictos                                | Refuerzo | Largo plazo (positivo o negativo). | Gestión de conflictos + percepción de beneficios.        | Condiciona expansión o bloqueo de capacidad renovable.  |
| 9. Decisiones inteligentes                   | Refuerzo | Corto y mediano plazo.             | Capacidad institucional + sistemas inteligentes.         | Eficiencia operativa y mejor toma de decisiones.        |
| 10. Retención del talento humano             | Refuerzo | Largo plazo.                       | Condiciones de vida + estabilidad técnica.               | Atracción de talento y fortalecimiento organizacional.  |

*Fuente: elaboración propia.*

En síntesis, el análisis de los bucles dominantes revela que la sostenibilidad de los sistemas energéticos descentralizados depende de la capacidad de equilibrar dinámicas de refuerzo y compensación en distintos horizontes temporales. Los bucles asociados a la demanda, la capacidad instalada y la gobernanza emergen como catalizadores

del desarrollo territorial cuando están articulados con estrategias de innovación y resiliencia frente al cambio climático. Por el contrario, la ausencia de coordinación entre estos bucles puede derivar en vulnerabilidades estructurales que perpetúan la pobreza energética y la dependencia de fuentes no renovables [28] [29]. En consecuencia, fortalecer la gobernanza local, promover la inversión en energías renovables distribuibles y fomentar la toma de decisiones basada en datos son condiciones esenciales para garantizar la estabilidad sistémica y la evolución sostenible e inteligente de las comunidades energéticas.

#### **5.2.5 Discusión integradora de los bucles.**

El análisis integrador de los bucles de realimentación del sistema energético territorial permite comprender la complejidad de su evolución, la jerarquía estructural de sus componentes y las interdependencias que configuran su dinámica a lo largo del tiempo. En este apartado, se abordan cuatro enfoques complementarios (temporal, estructural, sistémico y estratégico) que, al ser considerados de manera conjunta, ofrecen una lectura holística del comportamiento adaptativo del sistema. Esta aproximación reconoce que la transición hacia modelos energéticos inteligentes y sostenibles no responde únicamente a la introducción de tecnologías o a decisiones de inversión, sino al entrelazamiento de factores técnicos, institucionales y sociales que, mediante bucles de realimentación, definen trayectorias de desarrollo y resiliencia. Desde la eficiencia operativa inicial hasta la consolidación de estructuras institucionales de largo plazo, el estudio de la dominancia y la interacción de los bucles permite identificar los puntos de palanca críticos sobre los cuales las políticas públicas y las estrategias territoriales pueden intervenir de manera diferenciada para maximizar impactos y mitigar vulnerabilidades sistémicas.

- **Enfoque estructural: arquitectura del sistema y condicionantes internos.**

Desde el enfoque estructural, se observa que ciertos bucles actúan como estructuras base que condicionan el desempeño del resto del sistema. Este es el caso del bucle 4 (cambio climático), cuya acción de largo plazo estabiliza el sistema ante perturbaciones externas, o el bucle 10 (retención del talento), que fortalece la capacidad organizacional local. Estos bucles operan como pilares del sistema y, aunque no sean los primeros en activarse, son fundamentales para sostener su viabilidad en el tiempo. Así mismo, existen bucles como el 2 (tecnología y productividad) o el 8 (conflictos) que pueden actuar como estructuras inhibidoras, ya que, aunque son de tipo reforzador, sus efectos pueden bloquear dinámicas virtuosas si no se gestionan adecuadamente. A nivel estructural, también es importante destacar que la mayoría de los bucles están condicionados por la disponibilidad de inversión (capex), la calidad institucional y la confianza social. Por tanto, aunque el sistema parece contar con múltiples posibilidades de reforzamiento positivo, su arquitectura interna presenta cuellos de botella estructurales, como los altos costos operativos, la dependencia del diésel y los conflictos socioterritoriales, que deben ser atendidos para liberar el potencial sistémico.

- **Enfoque de interacción sistémica: sinergias y tensiones entre bucles.**

El enfoque de interacción sistémica permite identificar patrones de sinergia y tensión entre los bucles, revelando que su comportamiento no es aislado sino interdependiente. Para ilustrar esto, los bucles 1 (demanda energética), 6 (gobernanza) y 10 (talento humano) generan sinergias al combinar dinámicas tecnológicas, sociales y organizativas que se potencian mutuamente, constituyendo un núcleo virtuoso de transformación territorial. De manera similar, los bucles 3 (capacidad energética), 4 (cambio climático) y 7 (oferta energética) interactúan positivamente para reforzar la estabilidad técnica del sistema, conformando un subsistema centrado en la infraestructura resiliente. Sin embargo, existen tensiones significativas como la que se genera entre los bucles 2 (costos operativos) y 1 (demanda energética), en los que el aumento en los costos puede revertir los beneficios de la expansión tecnológica. También el bucle 8 (conflictos) puede tensionar negativamente los bucles de inversión si no se gestiona la percepción comunitaria. Esta lectura integrada muestra que las políticas deben considerar no solo el refuerzo de ciertos bucles, sino la articulación entre ellos, para evitar efectos adversos no deseados o cancelaciones internas.

- **Enfoque estratégico: trayectorias posibles y vulnerabilidades sistémicas.**

Desde una mirada estratégica, el análisis de dominancia de bucles permite identificar trayectorias de desarrollo sistémico y puntos de vulnerabilidad estructural. Una posible trayectoria virtuosa se basa en la activación secuencial de los bucles 5, 9 y 6 a corto y mediano plazo, consolidando así una plataforma técnica e institucional sólida que

luego habilita la expansión de la infraestructura renovable (bucles 3 y 7), fortaleciendo la resiliencia (bucle 4) y permitiendo la atracción de talento (bucle 10). Esta trayectoria depende críticamente del control de los bucles 2 y 8, que pueden representar riesgos latentes de bloqueo sistémico. Así mismo, la matriz de bucles sugiere que existen puntos de palanca estratégicos como la inversión inteligente, la digitalización operativa y la gobernanza comunitaria, que pueden activar cascadas de realimentación positiva.

De no atenderse estas condiciones, el sistema podría derivar en trayectorias regresivas, donde la pobreza energética, los conflictos sociales y la fuga de talento actúan como trampas estructurales. Por tanto, el diseño de políticas debe basarse en una lectura estratégica de los bucles dominantes, priorizando intervenciones con efectos multiplicadores y capacidad de activación sinérgica.

En síntesis, la discusión integradora de los bucles del sistema energético territorial evidencia que la sostenibilidad y la resiliencia no emergen de un único factor, sino del equilibrio dinámico entre tiempos de activación, estructuras subyacentes y sinergias entre componentes interdependientes. La lectura combinada de los enfoques temporal, estructural, sistémico y estratégico demuestra que las políticas de desarrollo energético deben adoptar una lógica adaptativa y multinivel, capaz de anticipar cambios en la dominancia de los bucles y de gestionar las tensiones derivadas de sus interacciones. Los resultados obtenidos confirman que una estrategia de intervención escalonada — basada en la activación progresiva de bucles virtuosos y en la contención de los regresivos — constituye el camino más eficaz para construir territorios energéticamente autosuficientes, institucionalmente robustos y socialmente equitativos. En última instancia, comprender y gestionar la arquitectura de realimentaciones del sistema se traduce en una capacidad ampliada para diseñar políticas energéticas coherentes con los principios de sostenibilidad, resiliencia y gobernanza participativa que orientan la transformación de los territorios inteligentes y sostenibles.

#### **5.2.6 Puntos de palanca.**

El análisis de los puntos de palanca constituye una fase crítica dentro del enfoque sistémico aplicado al estudio de la dinámica energética territorial. A partir de la observación de diez bucles de realimentación y sus interacciones, este apartado identifica las variables estructurales con mayor potencial para catalizar transformaciones dentro del sistema energético local. En consonancia con los principios de sostenibilidad y gobernanza multinivel propuestos[27], los puntos de palanca representan nodos estratégicos donde intervenciones específicas como la reducción de costos operativos, la inversión descentralizada o la digitalización del sistema, pueden amplificar los efectos positivos sobre la eficiencia, la resiliencia y la equidad energética. Este enfoque reconoce que las comunidades energéticas, al ser sistemas complejos autoorganizados, responden de forma no lineal a las políticas y acciones que se ejercen sobre sus componentes estructurales, de modo que el impacto transformador depende tanto del diseño técnico como de la articulación social y territorial que los sustenta.

A partir de la dinámica observada en los 10 bucles de refuerzo y sus interacciones, se identifican **cinco puntos de palanca estratégicos**. Cada uno constituye una variable o condición estructural que, al ser modificada o activada, puede generar impactos desproporcionadamente positivos sobre el sistema.

- **Punto de palanca 1. Reducción de costos operativos energéticos.**

Los altos costos operativos (combustibles, logística, mantenimiento) son una fuente de fricción sistémica que inhibe múltiples bucles (especialmente el 2 y el 3). Actuar sobre esta variable a través de eficiencia logística, transición energética y mantenimiento preventivo, permite liberar recursos fiscales, mejorar la competitividad del costo unitario y catalizar la adopción tecnológica.

- **Punto de palanca 2. Inversión descentralizada en infraestructura resiliente.**

La inversión pública local en infraestructura energética resiliente (renovables, almacenamiento, redes) constituye un habilitador fundamental para los bucles 3, 4, 5 y 7. Esta inversión no solo mejora la fiabilidad técnica, sino que reduce la vulnerabilidad climática y abre espacio para innovación social y organizacional. Es una palanca estructural de largo plazo.

- **Punto de palanca 3. Gobernanza energética comunitaria.**

El involucramiento de las comunidades en la gestión energética fortalece la legitimidad, la eficiencia en el uso de la energía y la viabilidad a largo plazo (bucle 6). Este punto de palanca opera a nivel sociocultural y requiere mecanismos inclusivos, educación energética y marcos de cogestión, capaces de alinear intereses técnicos y comunitarios.

- **Punto de palanca 4. Digitalización del sistema energético (medición, monitoreo, datos).**

La digitalización permite cerrar el ciclo entre datos, decisiones e inversión. Habilita la inteligencia territorial, reduce pérdidas, mejora la toma de decisiones públicas y crea sinergias entre los bucles 5, 9 y 6. Es un punto de palanca de activación rápida con alto efecto multiplicador, especialmente en territorios con capacidad técnica instalada.

- **Punto de palanca 5. Atracción y retención de talento local.**

El capital humano técnico-administrativo local es un motor de largo plazo para la sostenibilidad del sistema energético. Aumenta la capacidad de gestión, acelera la adopción tecnológica, mejora la productividad y refuerza la cohesión territorial (bucle 10). Políticas de formación, movilidad y reconocimiento del talento son claves para activar este punto de palanca.

En síntesis, los cinco puntos de palanca identificados actúan como ejes estratégicos para acelerar la transición hacia comunidades energéticas, resilientes, equitativas, inteligentes y sostenibles. La reducción de costos, la inversión en infraestructura resiliente, la gobernanza comunitaria, la digitalización y la gestión del talento local no solo mejoran la eficiencia del sistema, sino que también fortalecen su viabilidad social y ecológica a largo plazo. Desde una perspectiva de sostenibilidad sistémica, intervenir sobre estas variables implica reconocer las interdependencias entre lo técnico, lo institucional y lo cultural, orientando las políticas hacia la creación de entornos energéticos que se realimenten positivamente. De esta manera, los puntos de palanca no son simples variables de ajuste, sino verdaderos vectores de transformación estructural que, cuando se articulan de forma coherente, posibilitan un tránsito efectivo hacia modelos energéticos descentralizados, inclusivos y compatibles con los objetivos nacionales de sostenibilidad energética [15] [16].

### 5.2.7 Matriz de intervenciones sistémicas.

La matriz de intervenciones sistémicas constituye una herramienta analítica esencial para comprender las dinámicas de transformación estructural en el ámbito de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles. Por ello, en este apartado se presentan cinco puntos de palanca que articulan estrategias interdependientes orientadas a fortalecer la resiliencia, la eficiencia y la legitimidad de los sistemas energéticos locales. Estas intervenciones, concebidas desde un enfoque de complejidad y adaptabilidad territorial, abordan simultáneamente las dimensiones técnica, institucional y social de la transición energética. Su diseño busca activar bucles virtuosos que potencien la descentralización, la participación comunitaria y la innovación tecnológica, contribuyendo a un modelo energético más equitativo y autosuficiente en el tiempo. Así, la matriz se convierte en un mapa operativo que conecta escalas de acción y horizontes temporales con los efectos esperados en la reducción de costos, la consolidación de la gobernanza local y la atracción de capacidades endógenas.

**Tabla 5.** Matriz de intervenciones sistémicas.

| Punto de palanca                               | Intervención sistémica propuesta                                  | Escala de acción    | Horizonte temporal     | Bucles que activa o libera | Efecto esperado                             |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Reducción de costos operativos energéticos. | Estrategia de transición logística-energética: electrificación de | Local / subregional | Corto y mediano plazo. | 2, 3, 7                    | Disminución de fricción fiscal y aumento de |

|                                                  |                                                                                                     |                           |                        |            |                                                               |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                  | transporte, microrredes, mantenimiento predictivo                                                   |                           |                        |            | viabilidad técnica.                                           |
| 2. Inversión descentralizada en infraestructura. | Fondo territorial para infraestructura renovable distribuida, con participación comunitaria         | Subnacional / territorial | Mediano y largo plazo. | 3, 4, 5, 7 | Mejora de fiabilidad y reducción de vulnerabilidad climática. |
| 3. Gobernanza energética comunitaria.            | Creación de comités de energía locales con capacidad deliberativa y normativa                       | Local                     | Mediano plazo.         | 6, 10      | Mayor legitimidad, cumplimiento y uso racional del sistema.   |
| 4. Digitalización del sistema energético.        | Implementación de plataformas de monitoreo, sensores de red y <i>dashboards</i> de gestión pública. | Local / subregional       | Corto plazo.           | 5, 9, 6    | Mejora de eficiencia operativa y calidad del servicio.        |
| 5. Atracción y retención de talento local.       | Políticas de formación técnica, incentivos a retornos y redes de conocimiento locales.              | Territorial / regional    | Largo plazo.           | 1, 6, 10   | Fortalecimiento organizacional e innovación endógena.         |

*Fuente: elaboración propia.*

En conjunto, las intervenciones sistémicas descritas configuran un marco estratégico integral que trasciende las soluciones técnicas aisladas, proponiendo una transición energética con sentido territorial y social. La articulación de puntos de palanca en distintas escalas y horizontes temporales revela la importancia de un enfoque sinérgico entre digitalización, descentralización e inclusión comunitaria. Al activar y liberar bucles de realimentación positiva, estas acciones promueven un ecosistema energético dinámico, capaz de adaptarse a las contingencias del entorno y de generar valor colectivo de largo plazo. En este sentido, la matriz no solo orienta la implementación de políticas y proyectos, sino que también representa una guía de gobernanza adaptativa para alcanzar una energía más justa, eficiente y resiliente.

### 5.2.8 Conclusiones del análisis sistémico.

El análisis desarrollado en este capítulo permitió comprender que las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles constituyen sistemas sociotécnicos complejos cuya evolución depende de la interacción dinámica entre factores técnicos, institucionales, ambientales y sociales. A partir del enfoque de dinámica de sistemas [38], se identificaron diversos bucles interconectados que configuran la estructura subyacente de la transición energética comunitaria. Estos bucles demuestran que la madurez energética no se alcanza de manera lineal ni exclusivamente tecnológica, sino como resultado emergente de procesos de aprendizaje colectivo, cooperación interinstitucional y gestión solidaria de los recursos energéticos.

Los resultados obtenidos evidencian que los bucles de base estructural fortalecen la resiliencia energética y la autosuficiencia técnica de las comunidades; los bucles de expansión adaptativa impulsan la diversificación productiva y la innovación digital, y los bucles de cohesión y bienestar refuerzan la gobernanza participativa y la equidad social. En conjunto, estas dinámicas conforman un sistema de realimentaciones positivas que transforman la energía en un eje articulador del desarrollo territorial, dotando a los municipios de sexta categoría de una mayor capacidad para sostener su propio proceso de transición energética.

Así mismo, el análisis de dominancia temporal y estructural permitió reconocer las trayectorias de transformación y los puntos de vulnerabilidad sistémica. Se observó que la activación secuencial de bucles virtuosos particularmente aquellos vinculados con la inversión descentralizada, la digitalización de los procesos operativos y la consolidación de estructuras de gobernanza participativa representa la vía más efectiva para superar la pobreza energética y avanzar hacia escenarios de bienestar multidimensional sostenido [27] [36]. No obstante, la persistencia de bucles regresivos asociados con conflictos sociales, deficiencias institucionales o debilidades organizativas puede limitar la capacidad adaptativa del sistema e impedir la consolidación de sus avances.

En consecuencia, la transición energética comunitaria debe entenderse como un proceso evolutivo de reorganización social y territorial, en el que la energía deja de ser un insumo técnico para convertirse en un catalizador de innovación, cohesión y sostenibilidad. Esta perspectiva permite trascender los enfoques convencionales de la electrificación rural y situar la energía en el centro de la construcción de comunidades resilientes, capaces de autogestionar sus recursos y definir sus propias trayectorias de desarrollo.

Finalmente, el estudio concluye que la formulación de políticas públicas orientadas a fortalecer las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles requiere de un enfoque sistémico, adaptativo y multinivel, que reconozca la naturaleza dinámica de los bucles de realimentación y promueva la articulación efectiva entre los niveles local, regional y nacional. En este sentido, las comunidades energéticas no solo constituyen una herramienta de reducción de la pobreza energética, sino un pilar estratégico para avanzar hacia territorios más equitativos, resilientes y autónomos desde el punto de vista energético y social.

## **6. ANÁLISIS DE EQUILIBRIOS E INCENTIVOS: TEORÍA DE JUEGOS APLICADA AL DESARROLLO ENERGÉTICO Y TERRITORIAL**

El análisis de los resultados obtenidos en los capítulos previos reveló que, pese al notable potencial de recursos renovables en los municipios de sexta categoría de Colombia, la pobreza energética multidimensional persiste como una realidad estructural [36]. Esta situación refleja una paradoja: los territorios más ricos en fuentes locales (solar, hidro, biomasa o eólica) son también los más rezagados en acceso, calidad y fiabilidad del servicio energético. Esto obedece menos a limitaciones técnicas y más a fallas de coordinación estratégica entre los actores que conforman la gobernanza territorial del sector: el gobierno local, la empresa energética y la comunidad. En este contexto, la teoría de juegos emerge como una herramienta analítica de alto valor para comprender las interacciones estratégicas que configuran los equilibrios (cooperativos o no cooperativos) que determinan la estabilidad de los proyectos de transición energética.

El uso de modelos de teoría de juegos permite representar formalmente cómo las decisiones de los actores responden a incentivos, información y expectativas recíprocas. En el caso colombiano, este marco ofrece una lectura de la energía no solo como un bien económico, sino como un bien público territorial cuyo acceso y gestión compartida implican problemas de acción colectiva, coordinación y credibilidad institucional. Así, el presente capítulo busca responder a la pregunta orientadora que da sentido a esta sección: ¿cómo los incentivos y equilibrios estratégicos entre actores explican la sostenibilidad o el estancamiento de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles?

Para ello, se desarrolla un modelo analítico inspirado en la teoría de juegos no cooperativos repetidos, en el que se modelan tres jugadores: Gobierno local (G), Empresa energética (E) y Comunidad (C). Cada actor elige entre estrategias cooperativas y no cooperativas, generando diferentes configuraciones de equilibrio. La interpretación del modelo permite entender en qué condiciones emergen dinámicas y cuándo se perpetúan los equilibrios ineficientes.

Este resultado se enlaza directamente con los capítulos previos. El primer resultado sobre tipologías territoriales definió los distintos escenarios estructurales (dispersión poblacional, aislamiento energético, potencial productivo), donde las interacciones entre actores difieren. El segundo resultado sobre la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles mostró cómo las dinámicas de aprendizaje, reinversión y gobernanza pueden sostener o debilitar la cooperación a lo largo del tiempo. La teoría de juegos complementa este marco al revelar cómo las estrategias racionales en el corto plazo pueden producir trayectorias de largo plazo que consolidan o erosionan el desempeño energético territorial.

En consecuencia, el presente capítulo integra la dimensión micro (incentivos estratégicos) con la dimensión meso territorial (trayectorias institucionales), cerrando el ciclo analítico de los resultados de la investigación.

## 6.1 Enfoque teórico y metodológico

### 6.1.1 Teoría de juegos y desarrollo territorial

La teoría de juegos ha evolucionado de ser una herramienta puramente matemática, a convertirse en un marco interpretativo para analizar procesos de gobernanza y cooperación en entornos de recursos compartidos. En el campo del desarrollo territorial, su valor radica en explicar cómo actores racionales, con intereses divergentes pero interdependientes, pueden alcanzar resultados ineficientes si sus estrategias no logran internalizar los beneficios de la cooperación [16] [27].

En el contexto energético colombiano los juegos de cooperación se ven condicionados por asimetrías de información, baja confianza institucional y limitada capacidad de aplicación local, lo cual conduce a resultados subóptimos. La empresa energética busca maximizar rentabilidad; el gobierno local, estabilidad política y legitimidad, y la comunidad, el bienestar y el acceso. La falta de alineación de estos objetivos genera lo que Ostrom denomina dilemas sociales, en los que el equilibrio de Nash es estable pero socialmente ineficiente.

### 6.1.2 Estructura del juego

*Tabla 6. Estructura de Teoría de juegos*

| Componente del modelo     | Definición                                                                                          | Aplicación a comunidades energéticas inteligentes y sostenibles                                                                                                  |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Jugadores</b>          | Agentes que toman decisiones estratégicas y cuyos intereses pueden alinearse o entrar en conflicto. | Tres jugadores racionales: Gobierno local (G), Empresa energética (E) y Comunidad (C). Cada uno con incentivos distintos: legitimidad, rentabilidad y bienestar. |
| <b>Estrategias</b>        | Conjunto de acciones posibles para cada jugador.                                                    | - G: Apoyar (A) / No apoyar (N).<br>- E: Cooperar/Invertir (I) / No invertir/Extraer rentas (D).<br>- C: Participar (P) / Permanecer pasiva (Q).                 |
| <b>Pagos o utilidades</b> | Beneficios netos que recibe cada jugador según la combinación de estrategias.                       | Los pagos representan utilidades económicas, políticas y sociales, descontando costos de cooperación. Se formula la función de utilidad para cada jugador.       |
| <b>Matriz de pagos</b>    | Cuadro que expresa el resultado de cada combinación estratégica.                                    | Construida para las combinaciones (A/N, I/D, P/Q). Permite analizar equilibrio base, subsidios, corrupción, capacitación y monitoreo.                            |
| <b>Equilibrio de Nash</b> | Estado donde ningún jugador mejora su utilidad cambiando unilateralmente su estrategia.             | En la tesis, el equilibrio sin intervención suele ser no cooperativo debido a desconfianza, rent-seeking y baja capacidad institucional.                         |
| <b>Dilema social</b>      | Situación donde el interés individual conduce a un resultado colectivo ineficiente.                 | G evita costos, E extrae rentas, C reduce participación → convergencia a equilibrio ineficiente: fracaso del proyecto.                                           |
| <b>Juegos repetidos</b>   | Interacciones continuas que permiten aprendizaje, castigos y reputación.                            | Refleja ciclos energéticos reales: inversión, mantenimiento, reinversión. La cooperación es sostenible si los actores valoran el futuro ( $\delta$ alto).        |
| <b>Incentivos</b>         | Mecanismos que modifican las utilidades para promover cooperación.                                  | Incluyen subsidios, reducción de costos, capacitación, monitoreo, transparencia. Cada uno cambia los pagos de G, E y C en escenarios analíticos.                 |

|                                                  |                                                                             |                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Castigos / credibilidad del castigo</b>       | Penalizaciones que desincentivan desviarse de la cooperación.               | La tesis evalúa escenarios con castigo débil (corrupción) donde la empresa no coopera, y la impunidad conduce a equilibrios no cooperativos. |
| <b>Factor de descuento (<math>\delta</math>)</b> | Mide cuánto valoran los actores el futuro.                                  | Cooperación sostenible cuando $\delta$ es alto. En comunidades con capital social alto o acompañamiento institucional, $\delta$ aumenta.     |
| <b>Desviación o tentación para desertar</b>      | Incentivo individual para romper la cooperación.                            | E puede preferir extraer rentas (D) en vez de cooperar (I). C puede preferir no participar (Q). G puede evitar costos (N).                   |
| <b>Escenarios del juego</b>                      | Conjuntos de condiciones institucionales o políticas que cambian los pagos. | La tesis define cinco escenarios: base, subsidio, corrupción, capacitación, monitoreo. Cada uno altera utilidades y equilibrios.             |

*Fuente: elaboración propia*

Se consideran tres jugadores racionales:

- **Gobierno local (G):** puede elegir entre *apoyar* (A) o *no apoyar* (N) el desarrollo comunitario.
- **Empresa energética (E):** puede *invertir/cooperar* (I) o *no invertir/extraer rentas* (D).
- **Comunidad (C):** puede *participar activamente* (P) o *permanecer pasiva* (Q).

Cada combinación de estrategias genera una matriz de pagos. Los pagos representan utilidades esperadas derivadas de beneficios económicos, políticos y sociales, menos los costos de cooperación. Formalmente, la utilidad esperada de cada jugador puede expresarse como:

$$U_i = B_i(s) - C_i(s)$$

donde  $B_i(s)$  representa los beneficios de la estrategia conjunta  $s$ , y  $C_i(s)$  los costos asumidos por el jugador  $i$ .

El equilibrio de Nash se alcanza cuando ningún jugador puede mejorar su utilidad unilateralmente. Sin embargo, en contextos de recursos comunes este equilibrio suele coincidir con situaciones de no cooperación como, por ejemplo, la persistencia de sistemas diésel y el fracaso de proyectos comunitarios. El desafío consiste en identificar las condiciones bajo las cuales los actores pueden desplazarse hacia un equilibrio cooperativo de Pareto superior, en el que la suma de utilidades sea mayor para todos, aunque cada jugador individualmente tenga incentivos a desviarse.

### 5.3.2.3. Juegos repetidos y sostenibilidad

En los territorios rurales las interacciones entre actores no son únicas sino continuas. Los juegos se repiten en el tiempo a través de ciclos de inversión, mantenimiento y reinversión. En un juego repetido la ganancia esperada del jugador  $i$  se define como:

$$V_i = \sum \delta^t U_i(s_t)$$

donde  $\delta$  es el factor de descuento que mide la valoración del futuro. La cooperación se sostiene si el valor presente de cooperar supera el beneficio inmediato de desviarse. En este escenario, la estrategia cooperativa es sostenible si:

$$\frac{B_i - C_i}{1 - \delta} \geq D_i$$

donde  $D_i$  es el beneficio por desviarse. Cuanto mayor es  $\delta$  (es decir, cuanto más valoran los actores el futuro), más estable resulta la cooperación. Este resultado teórico explica por qué las comunidades con mayor capital social, gobernanza estable y acompañamiento institucional tienden a sostener acuerdos energéticos cooperativos [14].

#### 5.3.2.4. Metodología aplicada

El modelo propuesto se elaboró a partir de un análisis documental que integró artículos científicos y marcos normativos nacionales relacionados con comunidades energéticas y gobernanza territorial. Se revisaron estudios internacionales sobre teoría de juegos y sostenibilidad energética [14] [28] [29] [37]; Juanpera, 2021) junto con documentos oficiales del Ministerio de Minas y Energía [15] (2025) como Metodología General de la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas y el Informe de Pobreza Energética Multidimensional. A partir de esta revisión se construyeron cinco escenarios analíticos:

1. Escenario base (sin intervención).
2. Escenario con subsidio o incentivo fiscal.
3. Escenario con corrupción o castigo débil.
4. Escenario con capacitación y reducción de costos.
5. Escenario con monitoreo y transparencia.

*Tabla 7. Metodología*

| Escenario    | Parámetros clave                       | ¿Firma coopera? ( <i>one-shot</i> ) | Nash puro ( <i>one-shot</i> )                             | Pareto (social opt.) | Observación política                                    |
|--------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|
| Base         | $S = 2, C_F = 8, \pi_F^{pun} = 0$      | No (prefiere $N_F$ )                | (I, N, P)                                                 | (I, I, P)            | <i>Free-riding</i> de la empresa; ineficiencia.         |
| Subsidio     | $S = 6, C_G \uparrow$                  | Sí ( $13 > 12$ )                    | Probablemente (I, I, P) si $G$ sigue prefiriendo invertir | (I, I, P)            | Subsidio puede alinear a $F$ ; riesgo fiscal para $G$ . |
| Corrupción   | $\pi_F^{pun} \uparrow$ (castigo débil) | No ( $D_F$ pequeño)                 | (I, N, P)                                                 | (I, I, P)            | Impunidad mantiene el equilibrio ineficiente.           |
| Capacitación | $C_F \downarrow$ (6)                   | Sí ( $\pi_{coop}$ crece)            | (I, I, P)                                                 | (I, I, P)            | Efecto costo-eficiente.                                 |

|           |                          |                  |                                                           |           |                                           |
|-----------|--------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|
| Monitoreo | $\pi_G^{dev} \downarrow$ | Depende (F base) | Facilita que $G$ coopere $\rightarrow$ favorece (I, I, P) | (I, I, P) | Transparencia reduce incentivos a fingir. |
|-----------|--------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|

*Fuente: elaboración propia.*

Cada escenario representa un tipo de política pública o arreglo institucional. El análisis se centra en cómo las variaciones en los parámetros (costos, beneficios, credibilidad) modifican los equilibrios alcanzados.

## 6.2 Análisis de escenarios y resultados

### 6.2.1 Escenario base: equilibrio no cooperativo

En ausencia de intervención estatal o mecanismos de confianza, el juego converge a un equilibrio no cooperativo. Cada actor busca maximizar su beneficio inmediato: el gobierno evita costos políticos y financieros, la empresa busca rentas extractivas a corto plazo y la comunidad reduce su participación por desconfianza o falta de información.

Formalmente, si los beneficios individuales de la desviación son mayores que los beneficios compartidos ( $D_i > B_i - C_i$ ), la cooperación colapsa. Este equilibrio explica la persistencia de sistemas diésel obsoletos y el estancamiento de proyectos híbridos en ZNI, fenómeno también documentado en África occidental [24] y en los Andes peruanos [25]. En este contexto, los costos de transacción son elevados, los castigos institucionales débiles y la credibilidad del gobierno baja, lo que impide sostener un comportamiento cooperativo. La sostenibilidad territorial se ve entonces bloqueada por un equilibrio de Nash local pero ineficiente a nivel social.

### 6.2.2 Escenario con subsidio o incentivo

La introducción de subsidios puede alterar los pagos esperados, reduciendo los costos de cooperación ( $C_i$ ) para empresa y comunidad. Sin embargo, si los subsidios son temporales o mal focalizados se genera un efecto de dependencia: la cooperación se mantiene mientras exista el incentivo externo, pero no se internaliza el valor social del acuerdo.

El modelo muestra que, cuando los beneficios externos superan los costos de coordinación, los actores cooperan, pero el equilibrio es frágil:  $\delta$  bajo y alta sensibilidad a la retirada del subsidio. Este resultado coincide con hallazgos de proyectos híbridos en Camerún, donde la estabilidad del sistema desaparecía al finalizar el apoyo financiero [28].

Por tanto, el subsidio puede desplazar temporalmente el equilibrio, pero no garantiza la transición hacia un equilibrio de Pareto estable.

### 6.2.3 Escenario con corrupción o castigo débil

Si el Gobierno o la empresa perciben que las desviaciones no serán castigadas (por ejemplo, al incumplir compromisos sin sanción), los incentivos cooperativos se erosionan. El modelo introduce una variable de credibilidad institucional ( $\theta$ ) que reduce la efectividad del castigo esperado.

Cuando  $\theta \rightarrow 0$  el beneficio de la desviación se incrementa y el equilibrio cooperativo deja de ser sostenible, incluso si los beneficios sociales son altos. En municipios con baja capacidad institucional y limitada transparencia, la cooperación colapsa en pocos ciclos, generando trayectorias de desconfianza acumulativa [27].

Este escenario es especialmente crítico en territorios de tipo 1 y 2 (aislados o semiproductos), donde los proyectos energéticos dependen del control local y la fiscalización social es débil.

#### 6.2.4 Escenario con capacitación y reducción de costos

Aquí se introducen procesos de aprendizaje y fortalecimiento de capacidades, que reducen los costos de cooperación ( $C_i$ ) y aumentan los beneficios percibidos por los actores locales. La comunidad adquiere conocimiento técnico y gestión, la empresa disminuye costos de mantenimiento, y el gobierno mejora la eficiencia del gasto.

El modelo predice que, si la reducción de costos supera el umbral de rentabilidad de desviación, la cooperación se vuelve el equilibrio dominante. Es decir,  $(B_i - C_i) > D_i$  para todos los jugadores. Esto se refleja en experiencias exitosas de microhidroeléctricas comunitarias y sistemas híbridos de pequeña escala [29] [37].

La cooperación sostenida depende entonces no de subsidios externos sino del aprendizaje organizacional y la internalización de beneficios compartidos.

#### 6.2.5 Escenario con monitoreo y transparencia

Finalmente, el escenario de monitoreo introduce un sistema de rendición de cuentas mutua que incrementa la credibilidad del castigo y disminuye la información asimétrica. Matemáticamente, esto se traduce en un aumento de  $\theta$  y  $\delta$  simultáneamente, reforzando la estabilidad de la cooperación.

Cuando los actores perciben que la desviación será detectada y sancionada, el incentivo a cooperar se vuelve dominante. Este equilibrio representa el punto Pareto superior: máxima suma de utilidades y estabilidad a largo plazo.

Empíricamente, este patrón se observa en proyectos de microrredes comunitarias donde la gobernanza participativa y los sistemas de información abiertos fortalecen la confianza y la continuidad [14] [31].

El resultado central del modelo es que la credibilidad institucional ( $\theta$ ) y la valoración del futuro ( $\delta$ ) son las dos variables críticas que definen la sostenibilidad del equilibrio cooperativo. La política pública debe, por tanto, enfocarse en fortalecer estos parámetros mediante mecanismos de monitoreo, educación energética y transparencia comunitaria.

#### 6.2.6 Integración con los resultados previos

El modelo de teoría de juegos presentado no puede entenderse de manera aislada. Su interpretación adquiere sentido al conectarse con los dos resultados previos de la tesis: las tipologías territoriales y la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles. Estas dos dimensiones permiten contextualizar los equilibrios y explicar por qué los incentivos estratégicos varían de un territorio a otro, generando trayectorias diferenciadas de progreso o estancamiento.

En primer lugar, las tipologías territoriales actúan como el marco estructural donde se desarrollan los juegos estratégicos. En los territorios tipo 1, caracterizados por dispersión poblacional, aislamiento y alta privación energética, los costos de cooperación ( $C_i$ ) son elevados debido a la limitada infraestructura y la baja capacidad institucional. Aquí, el equilibrio más probable es el no cooperativo, pues el valor presente de la cooperación se percibe incierto. Este patrón coincide con los hallazgos de [25] en comunidades peruanas aisladas, donde la falta de mantenimiento y coordinación institucional provocó la caída temprana de proyectos microhidroeléctricos.

En los territorios tipo 2, con núcleos productivos rurales y demanda estable, las condiciones para la cooperación mejoran. La existencia de una base económica local y un liderazgo comunitario incipiente reduce los costos de coordinación, lo que aumenta la probabilidad de alcanzar equilibrios de Pareto eficientes. En estos contextos, la teoría de juegos muestra cómo pequeños incentivos o reducciones de costos pueden transformar el equilibrio estable de no cooperación en uno cooperativo duradero.

Los territorios tipo 3, zonas mixtas en transición, representan entornos intermedios donde coexisten actores cooperativos y oportunistas. La estrategia dominante depende de la credibilidad institucional y del factor de descuento  $\delta$ . Si las instituciones locales logran mantener procesos de rendición de cuentas, el equilibrio puede desplazarse hacia la cooperación, como evidencian los casos analizados por Ceglia et al. [14] sobre comunidades energéticas europeas con estructuras de gobernanza participativa.

Finalmente, los territorios tipo 4, con alta capacidad institucional y conectividad, tienden naturalmente a mantener equilibrios cooperativos. Aquí, la credibilidad del castigo es alta y los incentivos individuales están alineados con el bienestar colectivo. Estos municipios constituyen laboratorios de sostenibilidad territorial, en los que los mecanismos de monitoreo, transparencia y participación se institucionalizan, como lo sugiere el *Manual de Gestión de Comunidades Energéticas* [15].

En segundo lugar, la conexión con los bucles de refuerzo evidencia la dimensión temporal y dinámica del modelo. El primer bucle —entre acceso, productividad y reinversión— demuestra que, cuando el acceso energético incrementa la productividad local, se generan excedentes que alimentan la reinversión comunitaria. Este ciclo positivo refuerza la cooperación y eleva el valor del factor  $\delta$ , consolidando trayectorias de desarrollo sostenido. De modo opuesto, cuando el acceso no produce retornos productivos, el incentivo para mantener la cooperación se erosiona.

El segundo bucle —entre organización social y gobernanza— incide directamente sobre los costos de transacción y el parámetro de credibilidad institucional  $\theta$ . Un tejido social denso, con organizaciones de base y liderazgo local, reduce la incertidumbre y fortalece los mecanismos de control social, haciendo más probable el mantenimiento del equilibrio cooperativo. En cambio, en territorios con baja cohesión social, la falta de confianza alimenta estrategias oportunistas y el colapso de acuerdos.

En síntesis, la integración de estos tres resultados (tipologías, bucles y equilibrios) muestra que la sostenibilidad de las comunidades energéticas depende de la interacción entre la estructura territorial, la dinámica institucional y los incentivos estratégicos. Las decisiones iniciales de los actores cooperar o desviarse no solo determinan el resultado inmediato del juego, sino que generan trayectorias acumulativas de cooperación o conflicto que configuran el desarrollo energético territorial a largo plazo [27].

### **6.2.7 Ventajas y limitaciones del enfoque**

El enfoque de teoría de juegos ofrece ventajas analíticas significativas para comprender los dilemas de gobernanza energética en territorios rurales colombianos. En primer lugar, permite identificar las causas estructurales de los resultados ineficientes, mostrando por qué actores racionales pueden mantener equilibrios no cooperativos que perpetúan la pobreza energética, incluso cuando existen alternativas técnicamente viables [24]. En segundo lugar, este enfoque facilita reconocer palancas institucionales que pueden modificar los incentivos como subsidios inteligentes, mecanismos de transparencia o procesos de capacitación y orientar las intervenciones públicas hacia equilibrios sostenidos. Finalmente, el modelo permite predecir condiciones mínimas de viabilidad cooperativa, tales como la valoración del futuro ( $\delta$  alto), la credibilidad del castigo ( $\theta$  significativo) y la reducción progresiva de los costos de cooperación ( $C_i$ ).

Sin embargo, el enfoque también presenta limitaciones que deben ser reconocidas para no sobre interpretar sus alcances. La primera es el supuesto de racionalidad instrumental: los actores no siempre maximizan su utilidad en contextos rurales atravesados por desigualdades, tradiciones comunitarias y percepciones simbólicas de la energía [16]. En segundo lugar, la escasez de datos precisos sobre costos y beneficios reales en municipios no interconectados dificulta la estimación empírica de las funciones de pago. Tercero, el modelo simplifica la realidad territorial al considerar solo tres jugadores, cuando en la práctica intervienen otros agentes —cooperación internacional, ONG, empresas locales o juntas de acción comunal— que modifican la estructura del juego.

Asimismo, la debilidad institucional en varios municipios de sexta categoría limita la efectividad del castigo y del cumplimiento de acuerdos, haciendo que la transición hacia equilibrios cooperativos requiera intervenciones adicionales de acompañamiento estatal y comunitario [33]. Por último, la teoría de juegos tiende a representar decisiones discretas, mientras que en la práctica la cooperación es un continuo que fluctúa según la confianza y el aprendizaje.

Estas limitaciones no restan valor al modelo; más bien invitan a complementarlo con enfoques de economía del comportamiento, que integren factores de reciprocidad y confianza, así como con teorías de capital social y gobernanza multinivel, que reconozcan la complejidad institucional y cultural de los territorios rurales [27].

### 6.3 Conclusiones del análisis

El análisis de equilibrios e incentivos demuestra que la teoría de juegos es un instrumento potente para identificar las condiciones que permiten la transición desde un equilibrio no cooperativo caracterizado por desconfianza, dependencia de subsidios y baja eficiencia hacia un equilibrio cooperativo de Pareto superior, donde la cooperación voluntaria y la gobernanza participativa generan sostenibilidad a largo plazo.

Los resultados permiten concluir que la alineación de incentivos, la credibilidad institucional y la participación comunitaria son los tres ejes que determinan el éxito o el fracaso de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en Colombia. Cuando las instituciones logran sostener estos tres pilares, los actores perciben beneficios compartidos y el equilibrio cooperativo se vuelve estable incluso sin incentivos externos.

Este capítulo cierra la triada analítica de la tesis:

- Las **tipologías territoriales** definen los contextos estructurales y las restricciones iniciales del juego.
- La **estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles** explican las dinámicas temporales de aprendizaje y reinversión.
- La **teoría de juegos** revela los incentivos estratégicos que orientan las decisiones colectivas y la sostenibilidad del sistema.

En conjunto, estos resultados ofrecen una lectura integrada del desarrollo energético territorial como un proceso evolutivo de coordinación estratégica, donde la sostenibilidad no depende solo de la tecnología o la inversión, sino de la calidad de las interacciones entre actores y de la capacidad institucional para sostener la cooperación.

Finalmente, se reafirma que la construcción de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles requiere modelos participativos e iterativos, donde los actores locales co-construyan las reglas del juego, definan colectivamente los incentivos y fortalezcan la confianza mutua. Solo así será posible avanzar hacia una transición energética justa, descentralizada y territorialmente sostenible en los municipios rurales de Colombia.

## 7. RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA

El propósito de este capítulo es traducir los resultados analíticos de la investigación, basados en la identificación de tipologías territoriales, la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y los equilibrios estratégicos derivados de la teoría de juegos, en recomendaciones concretas de política pública y de gestión territorial aplicables a los municipios de sexta categoría en Colombia. Estos tres ejes de análisis constituyen un sistema integrado de conocimiento que articula la comprensión estructural, dinámica y estratégica de las comunidades energéticas, permitiendo que los resultados trasciendan el nivel descriptivo y se proyecten en instrumentos efectivos de política pública.

Las tipologías proporcionan una comprensión estructural de las condiciones territoriales y socioinstitucionales, lo cual permite identificar la capacidad de cada municipio para organizar procesos de autogeneración y gobernanza energética. La estructura sistémica, por su parte, explican la dinámica evolutiva del sistema, mostrando cómo la interacción entre actores, instituciones, inversión, aprendizaje y medioambiente produce trayectorias sostenibles o regresivas en función de su diseño. Finalmente, el análisis de equilibrios e incentivos basado en la teoría de juegos revela los mecanismos de cooperación y conflicto entre actores, ofreciendo criterios para el diseño de incentivos y marcos regulatorios adaptativos.

Desde esta perspectiva, las recomendaciones aquí formuladas buscan contribuir a la transición energética justa, al fortalecimiento de la gobernanza multinivel y al incremento de la autonomía comunitaria, elementos centrales de la *Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas* [15]. La energía se concibe así no sólo como un bien de consumo, sino como un vector de equidad territorial y bienestar multidimensional, alineado con los principios de la complejidad de la sostenibilidad y desarrollo inclusivo [16] [27].

## 7.1 Recomendaciones derivadas de las tipologías (Resultado 1)

El primer resultado de la investigación estableció cuatro **tipologías territoriales** que reflejan la diversidad de escenarios de transición energética local en los municipios de sexta categoría. Cada una requiere un enfoque diferenciado de política pública, considerando las capacidades técnicas, institucionales y socioeconómicas existentes [15].

- **Tipo 1. Territorios dispersos**

En los territorios rurales aislados y de baja densidad poblacional, donde predomina la condición de Zona No Interconectada (ZNI), las recomendaciones deben centrarse en el fortalecimiento de infraestructura energética básica mediante la expansión de microrredes híbridas renovables (solar, eólica, microhidráulica y biomasa). Se propone priorizar el acceso a fondos del *FAER*, *FAZNI* y *FENOGE*, bajo esquemas de propiedad y gestión comunitaria. Los municipios deben articular estos proyectos con los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes de Desarrollo Municipal, asegurando coherencia entre la planificación energética y el desarrollo rural integral. Además, se recomienda crear unidades técnicas municipales de energía, con apoyo de la UPME y el SENA, para fortalecer la capacidad de operación y mantenimiento local [24].

- **Tipo 2. Núcleos productivos rurales**

En los municipios donde existen concentraciones agroindustriales, se recomienda integrar la política energética con la estrategia de desarrollo económico local. Las comunidades deben beneficiarse de incentivos a la autogeneración colectiva y al uso productivo de la energía para fortalecer cadenas de valor agrícolas, agroforestales y turísticas. Los *Fondos Territoriales de Transición Energética* podrían financiar la electrificación de centros productivos mediante modelos cooperativos o asociaciones campesinas. A nivel normativo, la *Ley 2099 de 2021* [10] ofrece un marco favorable para la generación distribuida y la integración de FNCE, que debe adaptarse a escalas rurales descentralizadas [25].

- **Tipo 3. Territorios hídricos**

Para las comunidades localizadas en cuencas con alto potencial hidroeléctrico, las políticas deben integrar la gestión del recurso hídrico con la generación eléctrica local. Se recomienda crear *Consejos de Gobernanza del Agua y la Energía* en coordinación con las corporaciones autónomas regionales, que supervisen proyectos de microhidroeléctricas comunitarias y programas de restauración de ecosistemas estratégicos. La investigación ha mostrado que los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala son más sostenibles cuando incluyen mecanismos de cofinanciación local y participación ciudadana [31] [37].

- **Tipo 4. Cabeceras conectadas vulnerables**

En cabeceras municipales con acceso irregular al SIN, la prioridad debe ser el fortalecimiento de la eficiencia energética urbana, la digitalización del consumo y la creación de microrredes inteligentes locales. Se propone la implementación de programas de barrios solares y de edificaciones de energía positiva, en línea con los lineamientos del Conpes 4075 de 2022. La promoción de la electromovilidad comunitaria y los sistemas de monitoreo energético urbano puede reducir pérdidas técnicas y mejorar la resiliencia ante interrupciones [14].

## 7.2 Recomendaciones basadas en la estructura sistémica de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles (Resultado 2)

El segundo resultado identificó un conjunto de bucles de realimentación que determinan la evolución de las comunidades energéticas. Estos bucles evidencian que la sostenibilidad del sistema no depende de variables aisladas, sino de interacciones dinámicas entre capital social, capacidad institucional, innovación tecnológica y aprendizaje colectivo [27].

Para activar los bucles virtuosos y prevenir trayectorias regresivas, se proponen cinco puntos de palanca sistémicos:

- **Fortalecimiento institucional y gobernanza comunitaria:**  
Consolidar comités locales de energía, con representación de la comunidad, el municipio y actores privados. Estos comités deben utilizar los instrumentos del *Manual de Gestión de Comunidades Energéticas* [15] para garantizar procesos de participación y transparencia.
- **Digitalización e inteligencia territorial:**  
Promover plataformas digitales de monitoreo y control que faciliten el análisis en tiempo real del desempeño energético, integrando indicadores de sostenibilidad y pobreza energética [41].
- **Educación técnica y retención de talento local:**  
Incorporar programas de formación técnica en energías renovables dentro de la oferta educativa del SENA y universidades regionales. Se recomienda implementar un *Programa Nacional de Jóvenes Energéticos Rurales* que combine formación y empleo local.
- **Gestión ambiental adaptativa:**  
Vincular las estrategias energéticas a los *Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático (PIGCC)* y a los objetivos de restauración ecológica, asegurando coherencia entre las metas de mitigación y desarrollo territorial sostenible [16].

En términos temporales, estos puntos de palanca se distribuyen de forma escalonada: digitalización y fortalecimiento institucional en el corto plazo; educación en el mediano plazo; y consolidación de ecosistemas de innovación en el largo plazo.

### 7.3 Recomendaciones desde el análisis de equilibrios e incentivos (Resultado 3)

El análisis de teoría de juegos desarrollado en la investigación reveló que las condiciones de cooperación entre los actores —Estado, comunidad, empresa de energía— dependen críticamente de dos variables: la credibilidad institucional ( $\theta$ ) y la valoración del futuro ( $\delta$ ). En contextos de baja confianza y horizontes cortos, predominan equilibrios no cooperativos que erosionan la sostenibilidad; por el contrario, cuando las instituciones son estables y las recompensas se proyectan al largo plazo, emergen equilibrios de cooperación [28].

Para promover la cooperación sostenida, se plantean los siguientes mecanismos:

- **Incentivos fiscales y tarifarios diferenciados:** otorgar reducciones en tarifas o exenciones tributarias a comunidades que adopten modelos de generación colectiva y mecanismos de ahorro energético.
- **Mecanismos de gobernanza colaborativa:** promover acuerdos Estado–comunidad–empresa basados en beneficios compartidos y resultados verificables.
- **Regulación adaptativa:** ajustar los marcos regulatorios para permitir sistemas híbridos y microrredes mixtas bajo esquemas de propiedad comunitaria, como lo establecen el *Decreto 2236 de 2023* [13] y la *Resolución 40509 de 2024*.

Estos mecanismos incrementan la credibilidad institucional y la valoración del largo plazo, desplazando el sistema hacia equilibrios de cooperación estable y resiliencia territorial [24].

### 7.4 Articulación multinivel y hoja de ruta de implementación

La implementación de estas políticas exige una estructura de **gobernanza multinivel** que coordine los esfuerzos del nivel nacional, departamental, municipal y comunitario. Se propone el siguiente esquema:

- **Nivel nacional:** Ministerio de Minas y Energía, UPME y FENOGGE, responsables del diseño de políticas, financiamiento y regulación.

- **Nivel departamental:** creación de Consejos Departamentales de Energía para la coordinación de proyectos y priorización territorial.
- **Nivel municipal:** oficinas locales de energía encargadas de la ejecución, monitoreo y articulación comunitaria.
- **Nivel comunitario:** juntas energéticas locales encargadas de la gestión y mantenimiento de los sistemas, con acompañamiento técnico del SENA y universidades regionales.

## 7.5 Conclusión de las recomendaciones de política

Las recomendaciones presentadas constituyen una hoja de ruta para pasar de la investigación a la acción pública, estableciendo un marco de política energética territorial fundamentado en evidencia, participación y sostenibilidad. El enfoque sistémico adoptado demuestra que la transición energética en los municipios de sexta categoría no puede entenderse sólo como un proceso tecnológico, sino como una transformación social, institucional y cultural.

La consolidación de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles representa, por tanto, una oportunidad para redefinir la gobernanza territorial, fortalecer el tejido social y promover un modelo de desarrollo basado en la justicia energética. En última instancia, la energía se convierte en un vector de equidad territorial y bienestar multidimensional, capaz de articular la sostenibilidad ambiental con la dignidad humana y la prosperidad rural.

A la luz de este enfoque, las siguientes tres tablas detallan las recomendaciones específicas dirigidas a cada uno de los actores involucrados en la gobernanza energética territorial: Gobierno local, Empresa energética y Comunidad, organizadas por plazos de implementación y recursos necesarios. Estas matrices operacionalizan la hoja de ruta propuesta, traduciendo los hallazgos del análisis sistémico, territorial y estratégico en acciones concretas y viables que fortalecen las capacidades institucionales, técnicas y sociales. De esta manera, las recomendaciones no solo orientan la toma de decisiones, sino que también permiten articular la transición energética con procesos de construcción comunitaria, eficiencia operativa y fortalecimiento del capital social, consolidando las bases para comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en el largo plazo.

*Tabla 8. Recomendaciones para el Gobierno local*

| Actor                     | Recomendación de política pública                                                                                  | Plazo                    | Recursos necesarios                                              |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Gobierno local (G)</b> | Crear una <b>unidad municipal de comunidades energéticas</b> para coordinar actores, formulación y seguimiento.    | Corto (0–1 año)          | Personal técnico, oficina básica, presupuesto de funcionamiento. |
| <b>Gobierno local (G)</b> | Implementar <b>subsídios condicionados al desempeño</b> (mantenimiento, participación comunitaria, transparencia). | Corto–Mediano (1–2 años) | Recursos del municipio, Fonenergía, regalías.                    |
| <b>Gobierno local (G)</b> | Establecer <b>mesas de gobernanza energética</b> con comunidad y empresa.                                          | Corto                    | Facilitación, logística, actas, personal de participación.       |
| <b>Gobierno local (G)</b> | Formular <b>planes energéticos territoriales</b> alineados con el POT y las tipologías municipales.                | Mediano (2–3 años)       | Consultores, estudios técnicos, cartografía, SIG.                |
| <b>Gobierno local (G)</b> | Implementar un <b>sistema local de monitoreo y transparencia</b> (publicación de tarifas, avances, contratos).     | Mediano                  | Plataforma digital, capacitación, software abierto, datos.       |

|                           |                                                                                       |               |                                                          |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Gobierno local (G)</b> | Gestionar <b>convenios de asistencia técnica</b> con MME, UPME, IPSE o universidades. | Corto–Mediano | Tiempo administrativo, acuerdos interinstitucionales.    |
| <b>Gobierno local (G)</b> | Diseñar <b>acuerdos de beneficio compartido</b> entre actores.                        | Mediano       | Asesoría jurídica, talleres comunitarios, facilitadores. |

*Fuente: elaboración propia*

Las acciones del Gobierno local son determinantes para activar condiciones de cooperación y sostenibilidad institucional. Fortalecer la capacidad técnica, mejorar la transparencia y garantizar incentivos adecuados permite reducir los riesgos de desconfianza y dilemas sociales. Si el gobierno establece reglas claras y mecanismos de monitoreo, facilita la transición hacia equilibrios cooperativos y crea un entorno propicio para comunidades energéticas estables y alineadas con las necesidades del territorio.

*Tabla 9. Recomendaciones para la Empresa energética*

| <b>Actor</b>                  | <b>Recomendación</b>                                                                                        | <b>Plazo</b>  | <b>Recursos necesarios</b>                                          |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Empresa energética (E)</b> | Implementar <b>modelos de operación colaborativa</b> (O&M compartido, microfranquicias, esquemas híbridos). | Corto–Mediano | Equipo técnico, manuales de operación, protocolos.                  |
| <b>Empresa energética (E)</b> | Crear programas de <b>reducción de costos de mantenimiento</b> mediante capacitación comunitaria.           | Corto         | Técnicos formadores, materiales, herramientas.                      |
| <b>Empresa energética (E)</b> | Ofrecer <b>contratos de servicio por desempeño</b> (KPIs: continuidad, pérdidas, fallas).                   | Mediano       | Equipo de monitoreo, sistemas SCADA básicos, acuerdos regulatorios. |
| <b>Empresa energética (E)</b> | Desarrollar <b>planes de expansión de energía renovable</b> según tipologías territoriales.                 | Mediano–Largo | Estudios solares/hídricos, CAPEX en microrredes o paneles.          |
| <b>Empresa energética (E)</b> | Establecer <b>protocolos de transparencia tarifaria</b> y acceso a información.                             | Corto         | Sistema de comunicación, plataforma digital o módulos web.          |
| <b>Empresa energética (E)</b> | Participar en <b>comités permanentes de gobernanza energética</b> con la comunidad y el gobierno.           | Corto         | Horas de personal, espacios de participación.                       |

*Fuente: elaboración propia*

El rol de la empresa energética es crucial para asegurar viabilidad técnica y sostenibilidad operativa en la microrred o infraestructura comunitaria. La adopción de modelos colaborativos, transparencia tarifaria y mecanismos de desempeño fortalece la confianza comunitaria y reduce incentivos a comportamientos oportunistas. Cuando la empresa internaliza los beneficios de largo plazo, la cooperación se vuelve más atractiva y se consolidan sistemas energéticos eficientes y adaptados al contexto rural.

*Tabla 10. Recomendaciones para la Comunidad*

| <b>Actor</b>         | <b>Recomendación</b>                                                                                | <b>Plazo</b>  | <b>Recursos necesarios</b>                                 |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Comunidad (C)</b> | Crear <b>comités comunitarios de energía</b> (asambleas, voceros, roles claros).                    | Corto         | Espacios comunitarios, facilitadores, actas.               |
| <b>Comunidad (C)</b> | Implementar <b>escuelas energéticas comunitarias</b> (uso, mantenimiento, facturación).             | Corto–Mediano | Formación, materiales didácticos, apoyo municipal.         |
| <b>Comunidad (C)</b> | Establecer <b>acuerdos internos de corresponsabilidad</b> (aportes, vigilancia, mantenimiento).     | Corto         | Talleres, asistencia legal básica, mediación.              |
| <b>Comunidad (C)</b> | Participar en <b>mecanismos de monitoreo social</b> para evitar corrupción y asegurar cumplimiento. | Corto–Mediano | Capacitación, herramientas de auditoría ciudadana.         |
| <b>Comunidad (C)</b> | Organizar <b>fondos comunitarios de mantenimiento</b> (caja común, cuotas, recaudo).                | Mediano       | Reglamentos comunitarios, cuenta bancaria, tesorería.      |
| <b>Comunidad (C)</b> | Impulsar <b>proyectos productivos energizados</b> (frío, agrotransformación, emprendimiento).       | Mediano–Largo | Microcréditos, maquinaria básica, capacitación productiva. |

*Fuente: elaboración propia*

La comunidad es un actor central para sostener la cooperación en el tiempo. Su participación activa en comités, monitoreo y fondos de mantenimiento fortalece el capital social y eleva el valor del futuro ( $\delta$ ), condición clave para mantener equilibrios cooperativos en juegos repetidos. La organización comunitaria no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también incrementa la resiliencia frente a fallas, conflictos o cambios institucionales, garantizando la sostenibilidad de la comunidad energética.

Conforme a lo anterior, recomendaciones delinean un camino estratégico que trasciende las políticas energéticas convencionales y propone una visión integral de desarrollo territorial. La articulación de roles, plazos y recursos entre Gobierno local, Empresa energética y Comunidad evidencia que la sostenibilidad de las comunidades energéticas no depende de acciones aisladas, sino de la convergencia de capacidades y compromisos compartidos. Al integrar incentivos adecuados, fortalecer la gobernanza y promover la corresponsabilidad, estas medidas permiten avanzar hacia un modelo energético comunitario más justo, resiliente y adaptado a la diversidad de los municipios de sexta categoría. Con ello, la transición energética adquiere un carácter verdaderamente transformador, capaz de generar impactos duraderos tanto en la calidad de vida de las comunidades como en la cohesión institucional y el equilibrio socioambiental del territorio.

## 8. CONCLUSIONES

Este capítulo integra de manera coherente los principales hallazgos de la investigación, articulando las dimensiones estructural, dinámica y estratégica que explican el funcionamiento y la sostenibilidad de las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en los municipios rurales de sexta categoría en Colombia. A partir de un enfoque sistémico y multinivel, se construyó una visión holística que conecta la caracterización territorial con la dinámica de bucles de realimentación y con los incentivos que condicionan la cooperación entre actores, en alineación con las directrices nacionales de transición energética justa.

Esta integración permitió entender que las comunidades energéticas, lejos de ser únicamente proyectos tecnológicos, constituyen sistemas sociotécnicos complejos en los que interactúan factores institucionales, económicos, sociales, culturales y ambientales que determinan su viabilidad y permanencia.

El análisis territorial desarrollado permitió identificar una heterogeneidad profunda entre los municipios de sexta categoría con IPEM muy alto. Las tipologías creadas, municipios conectados, ZNI y mixtos, evidenciaron que cada territorio posee capacidades, limitaciones y trayectorias propias, lo que demanda estrategias diferenciadas para avanzar en la transición energética. Se demostró que la pobreza energética no es uniforme y que las soluciones deben adaptarse a la densidad poblacional, las condiciones geográficas, el nivel de aislamiento, la infraestructura disponible, la organización comunitaria y la capacidad institucional local.

Esta comprensión territorial permitió concluir que no existe un único modelo replicable en todos los municipios; por el contrario, cada tipología requiere rutas específicas: microrredes autónomas y sistemas híbridos en zonas aisladas; mejoras en gestión operativa y participación social en cabeceras conectadas; y estrategias integrales de gobernanza en territorios mixtos. Esta conclusión responde directamente al primer objetivo específico y establece uno de los pilares fundamentales de la tesis.

En la dimensión dinámica, la aplicación de modelos causales permitió comprender cómo las comunidades energéticas evolucionan en el tiempo mediante bucles de retroalimentación que pueden generar trayectorias de mejora o deterioro. Se identificaron bucles virtuosos impulsados por la capacitación, la apropiación tecnológica, la participación ciudadana y la reinversión en infraestructura, los cuales fortalecen el sistema energético y generan mejoras acumulativas.

De igual manera, se reconocieron bucles viciosos derivados de la desconfianza, el mantenimiento insuficiente, los conflictos socioambientales y los incentivos mal diseñados, que pueden llevar a la erosión de los beneficios y a la insostenibilidad del proyecto. Estos hallazgos permitieron concluir, en cumplimiento del segundo objetivo específico, que el éxito de una comunidad energética depende de la gestión adecuada de los puntos de apalancamiento sistémico, siendo la participación comunitaria, la gobernanza local, la estabilidad de reglas y la inversión continua factores determinantes para evitar ciclos de estancamiento y consolidar ciclos virtuosos de desarrollo energético.

El componente estratégico, basado en teoría de juegos, complementó esta visión dinámica al demostrar que la sostenibilidad de las comunidades energéticas depende de la alineación de incentivos entre los actores involucrados: Gobierno local, Empresa energética y Comunidad. Se observó que, cuando los incentivos están desalineados por ausencia de apoyo gubernamental, prácticas empresariales orientadas a la extracción de rentas o participación comunitaria débil, el sistema converge a equilibrios no cooperativos donde nadie contribuye plenamente y los beneficios colectivos se diluyen.

En contraste, los escenarios simulados mostraron que la cooperación entre actores puede estabilizarse cuando existen subsidios inteligentes, mecanismos de monitoreo creíbles, reglas claras, transparencia tarifaria, beneficios compartidos y capacitación adecuada. Esto permitió concluir, en relación con el tercer objetivo específico, que la gobernanza y la credibilidad de los incentivos son centrales para la sostenibilidad de las comunidades energéticas, y que la cooperación es posible solo si cada actor percibe que su mejor decisión individual es colaborar.

La integración de estos tres ejes analíticos permitió construir un modelo conceptual unificado que aporta una comprensión novedosa del sistema energético rural colombiano. Este modelo muestra cómo la estructura territorial condiciona la dinámica interna del sistema y cómo, a su vez, las dinámicas sistémicas determinan los incentivos necesarios para que los actores cooperen. La principal contribución teórica de esta investigación consiste en demostrar que la transición energética rural requiere una lectura simultánea del territorio, del comportamiento social y de las instituciones energéticas, articuladas en un marco sistémico y multinivel. Este enfoque no solo permite identificar sinergias, sino también tensiones y cuellos de botella que no serían visibles bajo un análisis fragmentado.

Desde el punto de vista metodológico, la tesis aporta una innovación sustancial al combinar herramientas de dinámica de sistemas y teoría de juegos, metodologías que suelen utilizarse por separado. Su convergencia permitió triangular hallazgos desde perspectivas complementarias, fortaleciendo la robustez del análisis y demostrando que la comprensión integral de las transiciones energéticas requiere enfoques interdisciplinarios capaces de capturar la complejidad de los sistemas rurales. Este aporte metodológico abre posibilidades para futuras investigaciones sobre gobernanza energética en territorios vulnerables.

En términos prácticos, la investigación ofrece insumos concretos para la formulación de políticas públicas, la planificación territorial y la gestión energética local. Las recomendaciones derivadas del análisis tipológico, los puntos de apalancamiento sistémico y la cooperación estratégica brindan una base sólida para diseñar programas de electrificación rural, mecanismos de financiación descentralizada, planes energéticos municipales y estrategias de fortalecimiento comunitario. Se propone institucionalizar las comunidades energéticas dentro del marco regulatorio nacional, promover esquemas de financiación descentralizados y sostenidos en el tiempo, integrar la dimensión energética en los POT y PIGCCT, crear escuelas energéticas rurales y estimular la innovación social en torno a la energía renovable.

No obstante, este estudio reconoce limitaciones importantes. La dependencia de fuentes secundarias y la ausencia de trabajo de campo generan márgenes de incertidumbre que podrían solventarse mediante investigaciones futuras con datos primarios y estudios de caso en profundidad. Además, los municipios rurales enfrentan barreras estructurales como escasez de recursos, debilidad institucional y desafíos socioculturales que pueden dificultar la implementación efectiva de comunidades energéticas. Estos elementos muestran la necesidad de acompañamiento técnico continuo y de políticas integrales que fortalezcan las capacidades locales.

Finalmente, los hallazgos permiten afirmar que las comunidades energéticas inteligentes y sostenibles constituyen una herramienta poderosa de justicia energética, resiliencia territorial y prosperidad rural. Su implementación adecuada puede democratizar el acceso a servicios energéticos limpios, confiables y asequibles, cerrar brechas entre el campo y la ciudad, fortalecer el tejido social y promover un modelo de desarrollo en el que la energía sea un derecho garantizado y no un privilegio.

Las comunidades energéticas no solo representan una solución tecnológica, sino un proyecto de transformación territorial donde la ciudadanía se convierte en protagonista de la transición energética. Convertir esta visión en realidad exigirá perseverancia, articulación multinivel y compromiso continuo, pero los beneficios potenciales justifican plenamente avanzar en su consolidación como pilar estratégico del futuro energético del país.

## **8.1 Trabajos futuros**

El desarrollo de comunidades energéticas inteligentes y sostenibles en municipios de sexta categoría abre múltiples líneas de investigación y acción que pueden fortalecerse en futuros trabajos.

En primer lugar, se recomienda avanzar hacia modelos cuantitativos de simulación dinámica que permitan proyectar escenarios de transición energética a 10, 20 y 30 años, integrando variables territoriales, climáticas, institucionales y económicas. Igualmente, se sugiere profundizar en metodologías de análisis espacial que permitan incorporar mayor detalle sobre geografía energética local, incluyendo restricciones ambientales, riesgos y potencial productivo.

Desde la dimensión estratégica, resulta pertinente desarrollar estudios comparativos entre comunidades energéticas reales en Colombia, a fin de validar y ajustar los equilibrios de cooperación identificados en esta tesis.

Finalmente, se recomienda explorar prototipos tecnológicos y estrategias de gobernanza basadas en plataformas digitales participativas, que permitan testear modelos de gestión comunitaria, mecanismos de transparencia y herramientas de monitoreo adaptadas a territorios rurales dispersos. Estos trabajos futuros permitirán robustecer la base metodológica y práctica necesaria para consolidar comunidades energéticas resilientes, inclusivas y sostenibles en contextos vulnerables del país

## REFERENCIAS

- [1] Departamento Administrativo de la Función Pública [DAFP]. (2012). *Diagnóstico de la capacidad institucional de municipios de sexta categoría* (Informe Plan CONFOR). <https://www.funcionpublica.gov.co/documents/418537/34088876/DIAGNOSTICO+DE+LA+CAPACIDAD+INSTI+TUCIONAL+DE+MUNICIPIOS+DE+SEXTA+CATEGORIA.++PLAN+CONFOR+%E2%80%93+INFORME+INTERVENCION+2012.pdf>
- [2] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2022). *Informe de Calidad del Servicio Eléctrico*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-de-Calidad-del-Servicio-de-Energia-2022.pdf>
- [3] J. Durán, J. Reina y C. Useche. (2025). Comunidades Energéticas en Colombia: Historias de éxito, desafíos y aprendizajes en el marco de la Transición Energética Justa. *World Resources Institute Colombia*. <https://es.wri.org/insights/comunidades-energeticas-en-colombia-historias-de-exito-desafios-y-aprendizajes-en-el-marco>
- [4] Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2024). *Hacia una sociedad movida por el sol y el viento: retos y avances de la Transición Energética Justa para la superación de las brechas energéticas*. <https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/transicion-energetica.aspx>
- [5] I. Puyana. (2024). *¿Qué ha pasado con la regulación de las comunidades energéticas en Colombia?* Fundación PARES – Línea Gobernanza, Transición Energética y Paz. <https://www.pares.com.co/que-ha-pasado-con-la-regulacion-de-las-comunidades-energeticas-en-colombia/>
- [6] Colombiacheck (2023). *¿Qué son las comunidades energéticas y qué tan ambiciosa es esta apuesta para la transición?* (Juanita Giraldo, entrevista). <https://colombiacheck.com/investigaciones/que-son-las-comunidades-energeticas-y-que-tan-ambiciosa-es-esta-apuesta-para-la-transicion>
- [7] El Tiempo. (2019). El mapa de 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en Colombia. *Diario El Tiempo, sección Otras Ciudades*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia-325892>
- [8] Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050: La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible*. [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2020-2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020-2050.pdf)
- [9] El Colombiano. (2019). *El Plan Energético Nacional*. <https://www.elcolombiano.com/opinion/editoriales/el-plan-energetico-nacional-OB12315568>
- [10] Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica, el fortalecimiento del servicio de energía eléctrica, entre otras*. DO 51.731. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- [11] Congreso de la República de Colombia, *Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, se modifican la Ley 1715 de 2014 y otras disposiciones*, Diario Oficial No. 51.734, Bogotá, Colombia, jul. 10, 2021
- [12] B. Urrutia. (2021). *Gobierno sanciona la ley de transición energética. Ley 2099 de 2021 (10 de julio de 2021)*. <https://www.bu.com.co/es/insights/noticias/gobierno-sanciona-la-ley-de-transicion-energetica>
- [13] Presidencia de la República de Colombia, *Decreto 2236 de 2023: “Por el cual se adiciona al Decreto 1073 de 2015 con el fin de reglamentar parcialmente el artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo*

2022-2026 en lo relacionado con las Comunidades Energéticas en el marco de la Transición Energética Justa en Colombia”, Bogotá, dic. 22 2023.

[14]. F. Ceglia, E. Marrasso, C. Roselli, C. y M. Sasso. (2021). Social acceptance and capital in renewable energy communities: A comparative analysis of case studies. *Sustainability*, 13(21). DOI: 10.3390/su132111810

[15] Ministerio de Minas y Energía (MME), *Metodología General – Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas*, Bogotá, Colombia, 2024. <https://www.minenergia.gov.co/documents/13312/Metodologia-General-Estrategia-Nacional-Comunidades-Energeticas-2024.pdf>

[16] J. Wu. (2013). Landscape Sustainability Science: Ecosystem Services and Human Well-being in Changing Landscapes. *Landscape Ecology*, 28, 999-1023. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9>

[17] D. Ramírez, I. Avendaño y A. Martínez. (2022). Transición energética en Colombia: ¿oportunidad de mercado o cambio estructural? *Revista de Economía Institucional*, 24(47), 127-148. DOI: 10.18601/01245996.vol24n47.06.

[18] A. Schilman et al., “Just and fair household energy transition in rural Latin American households,” *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 10, p. 105012, 2021. [https://justtransitionforall.com/wp-content/uploads/2022/10/Schilman\\_2021\\_Environ.\\_Res.\\_Lett.\\_16\\_105012-1.pdf](https://justtransitionforall.com/wp-content/uploads/2022/10/Schilman_2021_Environ._Res._Lett._16_105012-1.pdf).

[19] Ministerio de Minas y Energía [MME], *Informe sobre pobreza energética multidimensional en Colombia 2022–2023*, Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2022. <https://www.minenergia.gov.co>

[20] J. Stephens. (2019). Energy democracy: Redistributing power to the people through renewable transformation. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 61(2), 4-13. DOI: 10.1080/00139157.2019.1564212.

[21] S. Becker y M. Naumann. (2017). Energy democracy: Mapping the debate on energy alternatives. *Geography Compass*, 11(8). DOI: 10.1111/gec3.12321.

[22] F. Geels. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24-40. DOI: 10.1016/j.eist.2011.02.002

[23] M. Wahlund y J. Palm. (2022). The role of energy communities in the Swedish energy transition: Exploring key conditions for successful local energy initiatives. *Energy Research & Social Science*, 84, 102447. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102447.

[24] O. Odou, R. Bhandari y R. Adamou. (2019). *Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin*. *Renewable Energy*, 145, 1266-1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.032>

[25] M. Juanpera, A. Navarro y R. Santamaría. (2021). Hybrid Off-Grid Generation Systems in Remote Communities: Technical and Social Viability Analysis. *Renewable Energy*, 173, 1132–1148. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.057>

[26] J. Redondo y M. Becerra. (2025). *Ciudades y otros territorios inteligentes y sostenibles: teoría y métodos para la implementación con perspectiva de sistemas complejos*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=1012251>

[27] J. Giraldo. (2024). *Pobreza Energética: una lucha silenciosa para 9,6 millones en Colombia*. <https://afecolombia.org/pobreza-energetica-fundacion-promigas/>

[28] E. Muh y F. Tabet. (2019). Sustainability of solar mini grids in rural areas: The role of tariffs and subsidies. *Energy Policy*, 132, 210-219. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.05.020.

- [29] Y. López, H. Sepúlveda y C. Mattar. (2021). Off-grid hybrid electric generation systems in remote communities: Trends and characteristics in the literature (2002-2019). *Proceedings of International Conference on Renewable Energy 2020*. [Poster]. Universidad de Concepción, Chile.
- [30] M. Gizaw y G. Bekele. (2025). *Design of an eco-friendly hybrid energy supply system for non-electrified Lake Ziway Island in Ethiopia*. *Cogent Engineering*, 12(1), 2468073. <https://doi.org/10.1080/23311916.2025.2468073>
- [31] H. Bory, J. Martin, I. Martínez y L. Vázquez. (2021). Effect of Symmetrically Switched Rectifier Topologies on the Frequency Regulation of Standalone Micro Hydro Power Plants. *Energies*, 14(11), 3201. DOI: 10.3390/en14113201.
- [32] A. Irshad, G. Ludin, S. Ludi, M. Elkholy, S. Elias y T. Senjyu (2024). *Integration and performance analysis of optimal large-scale hybrid PV and pump hydro storage system based upon floating PV*. *Energy Conversion and Management: X*, 22, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100599>
- [33] Ministerio de Minas y Energía [MME]. (2024). *Informe y Documento metodológico – Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM)*. Bogotá, Colombia.
- [34] J. Elliot, J. Brown, N. Mlilo y L. Bowtell. (2025). *Global Trends in Community Energy Storage: A Comprehensive Analysis of the Current and Future Direction*. *Sustainability*, 17, 1975. <https://doi.org/10.3390/su17051975>
- [35] V. A. Martínez and O. L. Castillo, “Colombian energy planning—Neither for energy, nor for Colombia,” *Energy Policy*, vol. 129, pp. 1132–1142, Jun. 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.025> IDEAS/RePEc
- [36] Ministerio de Minas y Energía [MME]. (2025). *Informe y Documento metodológico – Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM)*. Bogotá, Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/documents/13468/Documento-metodologico-IPEM-MME-2025.pdf>
- [37] O. Paish. (2002). Small Hydro Power: Technology and Current Status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537-556. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0)
- [38] D. H. Meadows, *Leverage Points: Places to Intervene in a System*, The Sustainability Institute, Hartland, VT, USA, 1999. [donellameadows.org+2donellameadows.org+2](http://donellameadows.org+2donellameadows.org+2)
- [39] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Boston, MA, USA: Irwin McGraw-Hill, 2000.
- [40] T. Ma, H. Yang y L. Lu. (2014). *Feasibility study and economic analysis of pumped hydro storage and battery storage for a renewable energy powered island*. *Energy Conversion and Management*, 79, 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.047>
- [41] Marco para el desarrollo de una estrategia de digitalización,” Bogotá, Mar. 2022. [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Marco\\_de\\_estrategia\\_de\\_digitalizacion\\_VF.pdf?utm\\_source](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Marco_de_estrategia_de_digitalizacion_VF.pdf?utm_source)
- [42] M. Droubi, M. Castillo, E. Caamaño y J. Larrañeta. (2022). Energy communities for the energy transition: A review of operational and ownership structures, and the role of the legal framework in their empowerment. *Renewable Energy*, 189, 339-360, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.101.

[43] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2022). Minambiente propone descentralización energética y gobernanza comunitaria para bajar costos de los servicios públicos. *Boletín de Prensa*, 9 Sept 2022.

[44] O. Odou, R. Bhandari y R. Adamou, R. (2020). Hybrid Off-Grid Renewable Power System for Sustainable Rural Electrification in Sub-Saharan Africa. *Renewable Energy*, 145, 1266-1279.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.100>

[45] C. Vanegas. (2020). Hacia la democracia energética en Colombia: participación ciudadana en energías renovables. *Revista Energeia*, 18(2), 55-67.