

Artículos de revisión bibliográfica

# Transición Energética Y Desarrollo Productivo En Bolivia:

## Viabilidad Tecno-Económica de Sistemas Híbridos Solar-Biogás en el Sector Productivo

Energy Transition and Productive Development in Bolivia:

Techno-Economic Feasibility of Solar-Biogas Hybrid Systems in the Productive Sector

 J. Villarroel-Schneider<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Investigador. Centro Universitario de Investigaciones en Energías – CUIE, Universidad Mayor de San Simón – UMSS. Cochabamba, Bolivia. [jh.villarroel@umss.edu](mailto:jh.villarroel@umss.edu)

### RESUMEN

Bolivia se encuentra en una encrucijada energética y de desarrollo. Con variados recursos renovables, especialmente solares y de biomasa, el país tiene la oportunidad de transformar su matriz energética, actualmente dependiente de combustibles fósiles, hacia un modelo más sostenible, resiliente e inclusivo. Esta transición no es solamente una necesidad ambiental global, sino una palanca estratégica para dinamizar el desarrollo productivo nacional, particularmente en el sector agropecuario, que es clave para la economía y el sustento de gran parte de la población. Este artículo analiza en profundidad las sinergias potenciales entre la adopción de energías renovables distribuidas, como la solar fotovoltaica y el biogás a partir de residuos orgánicos, y el fortalecimiento de las capacidades productivas locales. Se examinan las oportunidades para mejorar la eficiencia, la competitividad y la sostenibilidad de las unidades productivas, tomando como caso de estudio las granjas lecheras a través de la evaluación de la viabilidad técnica y económica de los sistemas híbridos solar-biogás y poligeneración. Asimismo, se identifican y discuten las barreras técnicas, financieras y regulatorias que obstaculizan su implementación. Los resultados confirman la superioridad económica y ambiental de estas soluciones. Se concluye que la superación de las barreras financieras y regulatorias existentes es imperativa y debe abordarse con un enfoque socio-técnico, participativo y adaptado al contexto boliviano para que la Transición Energética impulse un verdadero Desarrollo Productivo Sostenible.

**Palabras clave:** Transición Energética. Desarrollo Productivo. Energías Renovables. Bolivia. Desarrollo Sostenible.

### ABSTRACT

Bolivia is at a crucial turning point regarding its energy use and development. With varied renewable resources, especially solar and biomass, the country has the opportunity to transform its energy matrix—currently dependent on fossil fuels—towards a more sustainable, resilient, and inclusive model. This transition is not only a global environmental necessity but a strategic lever to boost national productive development, particularly in the agricultural sector,

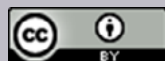
**Citar como:** Villarroel-Schneider, J. Transición energética y desarrollo productivo en Bolivia: viabilidad tecno-económica de sistemas híbridos solar-biogás en el sector productivo. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 75-87 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1386>

**Recepción:** 16/07/2025

**Aceptado:** 7/11/2025

**Publicado:** 30/12/2025

**Declaración:** Derechos de autor 2025 Villarroel-Schneider, J. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



which is key to the economy and the livelihood of a large part of the population. This article provides an in-depth analysis of the potential synergies between the adoption of distributed renewable energy, such as solar photovoltaic and biogas from organic waste, and the strengthening of local productive capacities. It examines the opportunities to improve the efficiency, competitiveness, and sustainability of productive units, taking dairy farms as a case study through the evaluation of the technical and economic viability of solar-biogas hybrid and polygeneration systems. Furthermore, it identifies and discusses the technical, financial, and regulatory barriers that hinder their implementation. The results confirm the economic and environmental superiority of these solutions. It concludes that overcoming the existing financial and regulatory barriers is imperative and must be addressed with a socio-technical, participatory approach adapted to the Bolivian context so that the Energy Transition drives true Sustainable Productive Development.

**Keywords:** Energy Transition. Productive Development. Renewable Energies. Bolivia. Sustainable Development.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 La Encrucijada Boliviana en el Contexto de la Transición Energética Global

El desafío global de la Transición Energética (TE), impulsado por la urgencia de mitigar el cambio climático y cumplir los objetivos del Acuerdo de París, hace necesario redefinir las políticas y las estrategias de desarrollo de las regiones y países de todo el mundo. Para países en desarrollo como Bolivia, la TE no puede ser vista únicamente como una responsabilidad ambiental; sino también como una ventana de oportunidad estratégica para reconfigurar el modelo de desarrollo, históricamente dependiente de los hidrocarburos, hacia uno basado en los abundantes recursos renovables que Bolivia posee (Jimenez Zabalaga *et al.*, 2025; IEA, 2023).

La posición de Bolivia es paradójica, su matriz energética histórica se ha basado en el gas natural, que ha generado una dependencia significativa y subsidios internos que distorsionan el mercado energético nacional. La generación eléctrica se basa predominantemente en gas natural, con una participación que oscila entre el 60% y el 70%. Esta dependencia crea una vulnerabilidad sistémica, principalmente por el agotamiento de las reservas probadas. Frente a esto, Bolivia es un gigante dormido en recursos renovables. La radiación solar media global horizontal (GHI) en el Altiplano boliviano se encuentra entre las más altas del planeta, superando consistentemente los 6 kWh/m<sup>2</sup>/día. Bolivia también tiene una significativa disponibilidad de biomasa proveniente de las regiones tropicales, su sector agropecuario y residuos urbanos (Morato *et al.*, 2020) mientras que la biomasa residual, proveniente del sector agropecuario, es un recurso energético subutilizado (PNUD, 2021; Jimenez Zabalaga *et al.*, 2025). Por otra parte, la gestión inadecuada de los residuos orgánicos, como el estiércol generado por la ganadería no solo provoca contaminación, sino que es una fuente importante de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>), un gas de efecto invernadero (GEI) con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO<sub>2</sub> a un horizonte de 100 años (IPCC, 2021). La TE, por tanto, emerge como una necesidad estratégica para la seguridad energética futura

que priorice los aspectos medioambientales mientras se impulsa un Desarrollo Productivo (DP) más robusto, sostenible y descentralizado.

### **1.2 Articulación Estratégica: Transición Energética como Palanca del Desarrollo Productivo**

El concepto de Desarrollo Productivo (DP), en el marco de la TE, no sólo promueve crecimiento económico implica también fortalecer las capacidades productivas locales, mejorar la competitividad y promover la inclusión social y económica. La electrificación rural y el acceso a energía limpia y asequible (ODS 7) son precursores directos del DP (Terrapon-Pfaff *et al.*, 2018). En este contexto, el sector agropecuario, pilar fundamental de la economía boliviana y fuente de sustento para una gran parte de la población rural, se presenta como un ámbito prioritario donde la sinergia entre energía renovable y DP puede ser particularmente transformadora.

Por otra parte, varias actividades productivas generan residuos orgánicos (estiércol, residuos de cosecha), cuyo manejo adecuado mediante la digestión anaeróbica para producir biogás ofrece, no solo una fuente de energía limpia y versátil, sino que también soluciona problemas ambientales y sanitarios locales (Villarroel-Schneider *et al.*, 2020). Combinado con la energía Solar Fotovoltaica (PV), el biogás puede permitir la implementación de soluciones energéticas híbridas y de poligeneración que satisfagan múltiples necesidades energéticas (electricidad, calor, y frío), además de biofertilizantes en las mismas unidades productivas, incrementando su autosuficiencia y resiliencia mientras se promueve un ecosistema basado en la economía circular (Villarroel-Schneider *et al.*, 2019; Villarroel-Schneider *et al.*, 2023).

### **1.3 El Potencial del Biogás y la Energía Solar en el Sector Productivo**

Dentro del abanico de energías renovables, el biogás y la energía solar destacan por su aplicabilidad descentralizada y su sinergia directa con las actividades productivas, especialmente en el ámbito rural, agropecuario y agroindustrial.

#### ***Biogás, del residuo al recurso energético:***

El sector agropecuario boliviano, particularmente la ganadería lechera y de engorde, así como la avicultura y porcicultura, son fuentes concentradas de residuos orgánicos. Como presenta Villarroel-Schneider *et al.* (2020) en su estudio de caso para granjas lecheras bolivianas, el estiércol generado representa no solo un problema de gestión ambiental (contaminación, olores, vectores de enfermedades, emisiones de metano), sino una materia prima valiosa para la producción de biogás mediante el uso de digestores anaeróbicos. El proceso es relativamente simple: en ausencia de oxígeno se descompone la materia orgánica, produciendo una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) denominada biogás, además de un efluente semi líquido llamado digestato o biol.

*Usos del Biogás:* El biogás puede ser purificado (eliminando dióxido de carbono, azufre y otras impurezas) para obtener biometano, con calidad similar al gas natural, utilizable en vehículos o inyectable a la red de gas natural convencional. Sin embargo, su uso más directo y común en entornos productivos puede ser para:

- Cocción y Calefacción: Reemplazando leña (reduciendo deforestación y contaminación intradomiciliaria) o GLP (generando ahorros económicos).
- Generación Eléctrica: Mediante motores de combustión interna o microturbinas. Esto es vital en zonas sin red eléctrica o con suministro inestable.
- Cogeneración (CHP - Combined Heat and Power): Aprovechando los gases de combustión del generador eléctrico basado en biogás para procesos que requieren calor (agua caliente, calefacción de instalaciones, secado de productos, etc.).
- Trigeneración (CCHP - Combined Cooling, Heat and Power): Añadiendo al CHP un sistema de refrigeración por absorción que utiliza el calor recuperado para producir frío, esencial para la conservación de productos y alimentos como leche, frutas, carnes procesadas, etc. (Villarroel-Schneider et al., 2019).

*Beneficios del Digestato o Biol:* El Biol es un fertilizante orgánico rico en nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio) y materia orgánica estabilizada. Su aplicación mejora la estructura del suelo, reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos (costosos y con alta huella de carbono) y cierra el ciclo de nutrientes en las plantaciones (Villarroel-Schneider, 2023).

*Escalabilidad:* Los sistemas de biogás son escalables, desde pequeños biodigestores familiares hasta plantas comunitarias o industriales que procesan residuos orgánicos de múltiples fuentes.

### ***Energía Solar Fotovoltaica (PV):***

*Electricidad Limpia y Descentralizada:* La abundancia de sol en Bolivia hace de la energía solar fotovoltaica PV una opción atractiva y cada vez más competitiva económicamente.

*Aplicaciones Productivas:* La electricidad generada con el sol puede alimentar directamente:

Bombas de agua para riego o suministro de agua para el ganado.

Sistemas de iluminación para extender jornadas laborales o mejorar seguridad.

Equipos de procesamiento (ordeñadoras, molinos, peladoras, secadoras, etc.).

Sistemas de refrigeración (complementarios o alternativos que contribuyan a la reducción del consumo de energía).

Equipos de comunicación, monitoreo y gestión.

*Modalidades:* Puede implementarse como sistemas aislados o desconectados de la red (*off-grid*) en zonas remotas, sistemas conectados a la red (*on-grid*) con posibilidad de vender excedentes (si la regulación lo permite), o sistemas híbridos en combinación con otras fuentes de energía.

*Hibridación Solar-Biogás:* La combinación de energía solar PV y sistemas de biogás (especialmente con generación eléctrica) es particularmente interesante. La energía solar es intermitente (depende del sol), mientras que el biogás puede almacenarse y usarse para generar energía de forma continua o bajo demanda, proveyendo una fuente de energía más estable y confiable (Wegener et al., 2021). Villarroel-Schneider et al. (2023) demostraron mediante un modelo de

optimización tecno-económica para una asociación de lecheros en Bolivia que un sistema híbrido solar-biogás puede ser una solución óptima para cubrir las demandas energéticas (electricidad, calor, frío) de forma más rentable y sostenible que soluciones basadas únicamente en una fuente o en la red convencional (cuando está disponible y considerando costos reales).

El contexto presentado previamente y el panorama particular de Bolivia da lugar a esta pregunta de investigación: ¿Cómo puede la adopción de sistemas de energía renovable distribuida, específicamente la hibridación solar fotovoltaica y biogás a partir de residuos orgánicos, permitir el Desarrollo Productivo Sostenible en el sector agropecuario boliviano, demostrando su viabilidad técnica y económica frente a las fuentes convencionales?

Para responder a la pregunta planteada este artículo pretende analizar la interrelación entre la Transición Energética y el Desarrollo Productivo, presentando una metodología de evaluación de la viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos de energía solar fotovoltaica y biogás aplicados al sector agropecuario, e identificando las barreras y las estrategias de política pública necesarias para su implementación a escala en Bolivia.

## 2. ANÁLISIS Y REFLEXIÓN

### 2.1 Metodología de Evaluación: El Enfoque Técnico-Estratégico y Socio-Técnico

El presente estudio plantea un enfoque de análisis técnico-estratégico, combinando la revisión del contexto energético y regulatorio nacional con la aplicación de modelos de evaluación de ingeniería y economía. Este enfoque permite ir más allá del análisis descriptivo, proporcionando evidencia cuantitativa sobre la competitividad y viabilidad de las soluciones renovables. El marco conceptual para este análisis también reconoce la naturaleza socio-técnica del cambio, ya que la implementación no solo es tecnológica; requiere cambios en las prácticas de gestión de residuos, una fuerte organización comunitaria cuando corresponda, acceso a financiamiento y un capital humano capacitado (Villarroel-Schneider, 2023).

### 2.2 Modelado y Optimización Tecno-Económica de las Soluciones Energéticas

El análisis integral requerido para la implementación de las soluciones energéticas propuestas tiene como pilar fundamental la aplicación de un modelo de optimización tecno-económica. La función objetivo de este modelo es minimizar el Valor Presente Neto de los costos de inversión, operación y mantenimiento de las soluciones, considerando el volumen de los servicios energéticos a ser provistos durante la vida útil del sistema. También se toma en cuenta, en una base horaria, la disponibilidad de los recursos energéticos, las demandas energéticas, la operación y la interconexión de diversas tecnologías para reducir el costo final de los servicios demandados, manteniendo la fiabilidad y continuidad del suministro de los mismos (Villarroel-Schneider *et al.*, 2023). Cabe mencionar que estas soluciones son replicables para diferentes sectores productivos siendo, en este artículo, el sector de las granjas lecheras el caso de estudio seleccionado del cual se describe a continuación las principales características y conceptos a tomar en cuenta:

- Sistema Modelado (Caso de Estudio): Una planta de Poligeneración/Trigeneración (CCHP) diseñada para atender la demanda de una asociación de productores lecheros en Bolivia central. Se consideraron demandas de Electricidad, Calor (agua caliente para fines sanitarios) y Frío (refrigeración para la conservación de la leche ordeñada).
- Fuentes Energéticas de Entrada: Solar Fotovoltaica (PV) y Biogás (producido por la digestión anaeróbica del estiércol bovino). La cuantificación del recurso principal se basa en la carga animal real (disponibilidad de estiércol) y el rendimiento de metano específico, mientras que para el recurso solar se requiere el potencial de irradiación solar horaria (para un año) del sitio de implementación de la solución energética.
- Métricas de Viabilidad (KPIs): Las soluciones propuestas se comparan con soluciones convencionales utilizando:
  - Costo Nivelado de Electricidad (LCOE): El costo por unidad de energía eléctrica generada (USD/kWh).
  - Costo Nivelado de Refrigeración (LCOC): El costo de la unidad de energía térmica para frío (USD/kWh-frío), para evaluar la competitividad de la trigeneración.
  - Análogamente se puede determinar el costo nivelado del biogás en términos de su potencial energético. Por otro lado, el calor recuperado del sistema es un recurso que se utiliza para la producción de refrigeración y agua caliente y al cual se puede, o no, asignar un valor monetario, dependiendo del tipo de evaluación económica. Finalmente, el digestato, que es un fertilizante orgánico de alto valor nutricional, debe ser considerado un producto adicional del sistema que puede ser monetizado.
  - Reducción de GEI y Autosuficiencia: Cuantificación del impacto ambiental (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero), por el desplazamiento del uso de soluciones convencionales basadas en combustibles fósiles, y verificación de cobertura de los servicios energéticos requeridos en la unidad productiva.

### 2.3 Viabilidad Tecno-económica de la Trigeneración Híbrida Solar-Biogás

Los resultados del modelado tecno-económico confirman que la adopción de sistemas híbridos solar-biogás en unidades productivas es una solución óptima, rentable y sostenible para el caso específico de las granjas lecheras estudiadas en Bolivia (Villarroel-Schneider *et al.*, 2023).

### 2.4 Eficiencia Energética y Rentabilidad Económica

La autogeneración de servicios energéticos a partir de recursos disponibles localmente reduce la dependencia de combustibles fósiles (diésel, GLP).

- Competitividad del LCOE: Los sistemas de Trigeneración híbridos Solar-Biogás, óptimamente dimensionados, pueden alcanzar Costos Nivelados de Electricidad (LCOE) competitivos, incluso en el escenario actual boliviano donde los combustibles fósiles son subsidiados, o con precios preferenciales, para la generación eléctrica. Esto quiere decir que en un escenario con precios reales de los combustibles fósiles la competitividad de estos sistemas aumentaría aún más (Villarroel-Schneider, 2023). El cálculo del LCOE, al

internalizar la materia prima (estiércol) y el subproducto de valor (digestato), refleja el verdadero costo socio-ambiental de la energía.

- El Valor de la Trigeneración: El verdadero diferencial de los sistemas híbridos de trigeneración reside en su capacidad de generar frío para la refrigeración inmediata de los productos resultantes de las actividades productivas. Esta capacidad es vital para mantener la calidad e inocuidad alimentaria, lo que permite a los productores procesar alimentos, acceder a mercados mejor remunerados, impulsando directamente la competitividad. En el caso específico, considerado en este artículo, este producto es la leche recién ordeñada. El costo de producir refrigeración (LCOC) con un refrigerador por absorción puede ser igual o inferior al costo de producir frío mediante los sistemas de refrigeración convencional, ya que el sistema requiere calor para su funcionamiento, este recurso es recuperado de gases de combustión, por lo tanto, se puede asumir un costo nulo. Aunque el costo de inversión de los equipos puede ser todavía una limitante, se ha evidenciado que, a lo largo de la vida útil, el sistema puede ser económicamente competitivo (Villarroel-Schneider et al., 2020).

## 2.5 Impacto Ambiental y Mitigación Climática

Desde una perspectiva ambiental, la implementación de este tipo de soluciones genera una mitigación sustancial de GEI.

- Captura de Metano: El beneficio ambiental más significativo proviene de la captura del metano (CH<sub>4</sub>) del estiércol. Al ser capturado y utilizado para la producción de electricidad y calor, se reduce la emisión de un GEI con un alto potencial de calentamiento. Se estima que una planta de biogás puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en una granja lechera hasta en un 80% (Villarroel-Schneider et al., 2022).
- Economía Circular y Biofertilizantes: Todas las unidades productivas con demandas energéticas de electricidad, calor y frío, y que a su vez generan residuos orgánicos tienen el potencial de adoptar este tipo de soluciones en el marco de una economía circular, aprovechando los residuos para la producción de biogás y la provisión de los servicios energéticos requeridos. Por otra parte, el digestato (biol), es un biofertilizante que se puede utilizar para mejorar la productividad agrícola, reduciendo y desplazando la necesidad de utilizar fertilizantes químicos y por ende la generación de GEI, cerrando el ciclo de nutrientes y minimizando la huella de carbono de la unidad productiva.

En la Figura N°1 se resume de manera gráfica los diferentes factores y los aspectos más importantes que se presentaron y que deben ser considerados en el análisis de implementación de las soluciones propuestas. A continuación, en la Figura N°2, se presenta la metodología práctica y sistemática esencial para el diseño y evaluación de las soluciones energéticas propuestas, haciendo un enfoque en los factores técnicos únicamente. Este diagrama de flujo, puede convertirse en una guía para la transformación de la matriz energética en el sector agropecuario y otras unidades productivas, la misma abarca la recopilación de datos técnicos y de demanda para dimensionar componentes y optimizar los costos de producción y el despacho de los servicios energéticos. Paralelamente, integra datos económicos para la optimización de costos y considera, también, la estimación de las reducciones de CO<sub>2</sub>. Este enfoque práctico y reproducible es fundamental para



determinar la viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos solar-biogás y de poligeneración en diversas unidades productivas, reforzando la competitividad económica y viabilidad ambiental de estas soluciones para un desarrollo productivo sostenible, además que proporciona una estructura clara para analizar las sinergias y superar las barreras identificadas.



**Figura N° 1:** Factores y aspectos a ser considerados para la implementación de Soluciones Energéticas Híbridas. Fuente: Elaboración propia, 2025.





**Figura N° 2:** Proceso para el análisis y optimización de Soluciones Energéticas Híbridas.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

### 3. REFLEXIÓN CRÍTICA: LA SUPERACIÓN DE LAS BARRERAS SOCIO-TÉCNICAS

A pesar de la sólida viabilidad técnica y económica demostrada en diversos estudios y aplicaciones, la implementación a escala de este tipo de soluciones enfrenta obstáculos significativos que deben ser abordados estratégicamente. La transición de la escala piloto a la escala masiva en Bolivia requiere un cambio profundo en el ecosistema habilitador.

#### 3.1 Barreras Financieras y la Distorsión de Precios

La principal barrera práctica es el alto Costo de Inversión Inicial (CAPEX) de los sistemas híbridos, el cual resulta prohibitivo para pequeños y medianos productores.

- **Subsidios a los Combustibles Fósiles:** La política de subsidios generalizados al diésel, la gasolina y el precio preferencial del gas natural para la generación de electricidad, es un freno directo a la inversión y el desarrollo de las energías renovables. Estos subsidios reducen artificialmente el costo operativo de la alternativa fósil, lo que desincentiva la inversión en soluciones limpias, a pesar de su mejor rendimiento a largo plazo (Gómez-Arias, 2018). Es imperativo revisar y reorientar estos subsidios hacia la innovación y la capitalización de proyectos renovables.
- **Falta de Financiamiento Especial:** Los bancos carecen de la experiencia y los productos financieros adecuados (crédito “verdes” a largo plazo, tasas de interés preferenciales) para proyectos de biogás, y soluciones energéticas no convencionales, percibidos como de alto riesgo. Se necesitan mecanismos de financiamiento mixto (blended finance) y apoyo del gobierno que genere garantías para mitigar este riesgo inicial.

### 3.2 Barreras Regulatorias y de Gobierno

El marco regulatorio actual en Bolivia está diseñado principalmente para un sistema energético centralizado. Sin embargo, los Decretos Supremos 4477 y 5167, ya establecen las condiciones, normas y lineamientos para impulsar el uso de energías renovables y el cambio de la matriz energética del país a través de los sistemas de Generación Distribuida (AETN, 2024). A pesar de esos esfuerzos, todavía quedan ciertos aspectos a ser considerados de manera integral:

- **Incertidumbre en la Interconexión:** Las normativas existentes para la inyección de excedentes de electricidad a la red han sido ajustadas recientemente (2024), buscando incentivar la adopción de estos sistemas. Sin embargo, no se ha conseguido una adopción masiva. Tampoco se considera una retribución monetaria en caso de que el balance energético sea a favor del productor de energía, es decir que este haya inyectado más energía a la red de la que consume. Se debe garantizar un precio de compra justo para incentivar la instalación de estos sistemas y así maximizar la producción.
- **Falta de Política de Biogás:** El biogás, a pesar de sus múltiples beneficios, carece de una política nacional clara y con objetivos de capacidad instalada definidos. Debido a los combustibles fósiles subsidiados, la producción de biogás no es atractiva. A esto se suma la falta de coordinación interinstitucional entre los ministerios de Hidrocarburos y Energía, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Economía que frena su desarrollo.
- **Generación Distribuida con Sistemas Híbridos complejos:** El reducido marco legal existente en el país sobre este tema se centra en la producción de electricidad, no se contemplan soluciones híbridas complejas que podrían producir no solo este servicio, sino también biogás y servicios térmicos, por ejemplo. El biogás excedente tratado para aumentar su composición de metano (biometano) es equiparable al gas natural por lo que puede distribuirse para diversos usos (domiciliario, comercial, industrial y transporte). Esto requeriría un marco regulatorio dedicado especial.

### 3.3 Barreras Socio-Técnicas y de Capital Humano

La implementación exitosa requiere capacidades técnicas y organizacionales.

- **Déficit de Capital Humano:** Existe una escasez de técnicos y profesionales capacitados en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de biodigestores, generadores de biogás y sistemas energéticos complejos, especialmente en zonas rurales (Villarroel-Schneider, 2019). Los proyectos fracasan no sólo por fallas tecnológicas, sino por la falta de mantenimiento preventivo o la inadecuada gestión de los procesos involucrados.
- **Organización Social y Gobernanza:** Los sistemas híbridos a escala asociativa (como los de la asociación de productores de leche) o comunitaria exigen una fuerte organización social y mecanismos de gobernanza efectivos. La gestión de los residuos y el uso compartido del biogás y digestato requieren acuerdos claros sobre la propiedad, los costos de operación y los beneficios, haciendo del componente social un elemento definitorio para la sostenibilidad operativa a largo plazo (Martí-Herrero et al., 2013; Garfi et al., 2016; Villarroel-Schneider et al., 2020).

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La reflexión y el análisis técnico-económico demuestran que la viabilidad técnica y económica de los sistemas híbridos solar-biogás/poligeneración es sólida y representa una de las vías más prometedoras para impulsar simultáneamente la Transición Energética y el Desarrollo Productivo Sostenible en el sector agropecuario y otros sectores productivos de Bolivia. La hibridación mediante el aprovechamiento de los recursos energéticos locales no solo ofrece energía limpia y resiliente, sino que tiene el potencial de generar beneficios productivos directos y ambientales que la convierten en una solución integral de triple resultado final (*Triple Bottom Line*).

Por lo tanto, el desafío ya no es técnico, sino institucional y financiero. Para que la evidencia cuantitativa se traduzca en implementación a una escala que pueda producir un impacto real, es imperativo superar las barreras estructurales de precios (subsidios a combustibles fósiles) y regulación (generación distribuida) mediante una acción coordinada y visionaria.

### 4.1 Recomendaciones Estratégicas y de Política Pública

Para materializar la viabilidad demostrada en la investigación y asegurar que la Transición Energética se traduzca en un desarrollo tangible, se proponen las siguientes acciones estratégicas:

#### *I Marco Regulatorio Habilitador y Eliminación de Distorsiones*

1. Desarrollo de una Ley de Generación Distribuida Clara: Implementar con urgencia un marco legal y tarifario que facilite la interconexión y la remuneración justa de los excedentes de electricidad de la Generación Distribuida, incluyendo un esquema de pagos o tarifas preferenciales para la generación híbrida biogás-solar, por ejemplo.
2. Revisión y Reorientación de Subsidios a Combustibles Fósiles: Revisar y reformar adecuada y transparentemente los subsidios a los combustibles fósiles, reorientando esos recursos hacia el fomento y promoción de la eficiencia energética y la capitalización de proyectos de soluciones renovables distribuidas.
3. Política Nacional de Biogás: Crear una Política Nacional de Biogás que reconozca explícitamente el biogás como una fuente de energía estratégica y un eje de la economía circular, estableciendo objetivos de capacidad instalada y simplificando los permisos ambientales. Esto considerando que la producción de biogás aborda, por otra parte, el problema de tratamiento y manejo de residuos orgánicos.

#### *II Mecanismos Financieros Innovadores y Accesibles*

1. Fondo de Capitalización Verde: Crear fondos verdes o líneas de crédito específicas para proyectos de energía renovable productiva, con tasas de interés bajas, plazos largos (15 a 20 años) y garantías adaptadas a los ciclos productivos.

2. Esquemas de Financiamiento por Desempeño: Implementar programas de subsidios directos o garantías parciales de crédito para reducir la barrera del alto costo de inversión inicial, atrayendo financiamiento climático internacional mediante mecanismos de pago por resultado (ej. pagos basados en la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente mitigada), valorizando la captura de metano como un servicio ambiental.

### *III Fortalecimiento de Capacidades y Enfoque Socio-Técnico*

1. Inversión en Capital Humano: Invertir en programas de formación técnica y profesional especializados para crear una base de diseñadores, instaladores, operadores y mantenedores locales de sistemas energéticos híbridos y de trigeneración.
2. Promoción de Modelos Asociativos Exitosos: Apoyar el fortalecimiento de asociaciones y cooperativas para facilitar la gestión colectiva, la gobernanza y la apropiación local de los sistemas, reconociendo que el éxito a largo plazo se basa en la capacidad de la comunidad para operar y mantener la tecnología.

Con este análisis reflexivo y las recomendaciones establecidas se puede concluir que la acción decidida y coordinada de los actores involucrados es indispensable para convertir el potencial de las energías renovables de Bolivia, aprovechados eficazmente por los sectores productivos, en un motor de desarrollo sostenible, resiliente, duradero y equitativo.

### **REFERENCIAS**

AETN (Autoridad de Electricidad y Tecnología Nuclear). (2024). *Generación Distribuida en Bolivia*. <https://www.aetn.gob.bo/web/main?mid=1&cid=217>

Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>

Gómez-Arias, J. (2018). *Políticas de subsidios a los combustibles fósiles en América Latina y el Caribe: impactos económicos, sociales y ambientales*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44122-politicas-subsidios-combustibles-fosiles-america-latina-caribe-impactos-economicos>

IEA (International Energy Agency). (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Jimenez Zabalaga, P., Limpens, G., Meyer, S., Thiran, P., Villarroel-Schneider, J., Cardozo, E., & Jeanmart, H. (2025). Towards a sustainable Bolivian energy system in 2050: The pathway for decarbonization under high renewable potential. *Energy*, 337, 138335. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138335>

- Martí-Herrero, J., et al. (2013). *Biogas en América Latina*. Editorial Universitaria. [https://redbiolac.org/wp-content/uploads/2016/06/LibroBiogas\\_RedBioLAC.pdf](https://redbiolac.org/wp-content/uploads/2016/06/LibroBiogas_RedBioLAC.pdf)
- Morato, T., Vaezi, M., & Kumar, A. (2020). Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110311>
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2021). *Energía solar en Bolivia: Guía de recursos y oportunidades*. <https://www.undp.org/es/bolivia/publicaciones/energ%25C3%25ADa-solar-en-bolivia-gu%25C3%25ADa-de-recursos-y-oportunidades>
- Terrapon-Pfaff, J., Gröne, M.-C., Dienst, C., & Ortiz, W. (2018). Productive use of energy – Pathway to development? Reviewing the outcomes and impacts of small-scale energy projects in the global south. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.016>
- Villarroel-Schneider, J. (2023). *Combined Energy Solutions Applied to Dairy Farming in Bolivia and Latin America* (PhD dissertation, KTH Royal Institute of Technology). <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-323374>
- Villarroel-Schneider, J., Balderrama, S., Sanchez, C., Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2023). Open-source model applied for techno-economic optimization of a hybrid solar PV biogas-based polygeneration plant: the case of a dairy farmers' association in central Bolivia. *Energy Conversion and Management*, 291, 117223. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117223>
- Villarroel-Schneider, J., Höglund-Isaksson, L., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2022). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, 261, 115670. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>
- Villarroel-Schneider, J., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Malmquist, A., Martin, A., & Alejo, L. (2020). Biogas based polygeneration plant options utilizing dairy farm waste: A Bolivian Case. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100571. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100571>
- Villarroel-Schneider, J., Malmquist, A., Araoz, J. A., Martí-Herrero, J., & Martin, A. (2019). Performance Analysis of a Small-Scale Biogas-Based Trigeneration Plant: An Absorption Refrigeration System Integrated to an Externally Fired Microturbine. *Energies*, 12(20), 3830. <https://doi.org/10.3390/en12203830>
- Wegener, M., Villarroel-Schneider, J., Malmquist, A., Isalgue, A., Martin, A., & Martin, V. (2021). Techno-economic optimization model for polygeneration hybrid energy storage systems using biogas and batteries. *Energy*, 218, 119544. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119544>