

**Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC):  
Oportunidades en el Mercado Colombiano**

**Alison Julianna Morales Angulo**

**Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Negocios Globales e Innovación**

**Director**

**Freddy Alonso Aguillon Duarte**

**Magister en Gestión y Dirección de Proyectos**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Facultad de Negocios Internacionales**

**Especialización en Negocios Globales e Innovación**

**2025**

**Dedicatoria**

A Oscar Javier Valenzuela Díaz, mi pareja del conocimiento. Tu entusiasmo y apoyo incondicional por este proyecto que en un principio te era desconocido, han sido mi mayor motivación. Admiro tu capacidad para encontrar siempre una palabra de aliento y tu paciencia infinita. Gracias por creer en mí y celebrar cada uno de mis triunfos.

### **Agradecimientos**

Agradezco profundamente al señor Yesid Alfonso Anaconda Bolaños, Gerente General de AXON GROUP LTDA, quien más allá de ser mi jefe directo, ha sido un mentor y un gran motivador. Su creencia en mis capacidades y su inversión en mi desarrollo profesional han sido determinantes en este logro académico.

## Contenido

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                                  | 9  |
| 1. Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC): Oportunidades en el mercado colombiano..... | 11 |
| 1.1 Planteamiento del problema .....                                                                | 11 |
| 1.2 Justificación.....                                                                              | 11 |
| 1.3 Objetivos .....                                                                                 | 12 |
| 1.3.1 Objetivo general .....                                                                        | 12 |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                                                                    | 13 |
| 2. Marco referencial .....                                                                          | 13 |
| 2.1 Marco teórico .....                                                                             | 13 |
| 2.2 Marco legal.....                                                                                | 21 |
| 3. Método .....                                                                                     | 24 |
| 4. Resultados .....                                                                                 | 25 |
| 6. Conclusiones .....                                                                               | 32 |
| Referencias.....                                                                                    | 33 |

**Lista de tablas**

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Países con oportunidad de mercado para PMFCs.....</i>                                                             | 16 |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Departamentos con mayor aprovechamiento de biomasa en Colombia .....</i>                                          | 20 |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Competidores, productos y servicios que emplean tecnología PMFC en el mercado latinoamericano .....</i>           | 25 |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Sectores estratégicos con potencial para la aplicación de PMFC en Colombia .....</i>                              | 27 |
| <b>Tabla 5 .</b> <i>Análisis PESTEL de factores que facilitan u obstaculizan la adopción de la tecnología PMFC en Colombia .....</i> | 29 |
| <b>Tabla 6.</b> <i>Comparativa de tecnologías para FNCER vs PMFC.....</i>                                                            | 30 |

# **Lista de figuras**

**Figura 1.** *Construcción de celdas de combustible microbiana de plantas con separación natural*  
..... 14

**Figura 2.** *Participación de fuentes de energía en Colombia* ..... 18

### **Resumen**

La siguiente monografía analiza el potencial de las Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC) en el mercado colombiano, enfocándose en su capacidad para diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Esta investigación aborda las aplicaciones agrícolas, los desafíos tecnológicos y las barreras regulatorias que enfrenta esta tecnología en Colombia. Se empleó un enfoque metodológico basado en la recopilación y análisis de literatura científica y estudios de caso, destacando el uso de biomasa local y las ventajas de generación distribuida. Los resultados muestran que las PMFC tienen un alto potencial para contribuir al desarrollo sostenible, aunque su implementación requiere una estrategia integral que contemple incentivos, políticas públicas y desarrollo tecnológico.

*Palabras clave:* PMFC, bioelectricidad, electrodos, fitorremediación, innovación

### **Abstract**

The following monograph analyzes the potential of Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) in the Colombian market, focusing on their ability to diversify the country's energy matrix and reduce dependence on fossil fuels. This research addresses agricultural applications, technological challenges and regulatory barriers faced by this technology in Colombia. A methodological approach was used based on the compilation and analysis of scientific literature and case studies, highlighting the use of local biomass and the advantages of distributed generation. The results show that PMFCs have a high potential to contribute to sustainable development, although their implementation requires a comprehensive strategy that includes incentives, public policies and technological development.

*Keywords:* PMFC, bioelectricity, electrodes, phytoremediation, innovation

## **Introducción**

La creciente demanda energética, sumada a los efectos del cambio climático, plantea un desafío crítico para la sostenibilidad de los sistemas productivos en Colombia. En este contexto, las Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC) emergen como una tecnología innovadora que aprovecha procesos bioelectroquímicos para generar energía renovable de forma descentralizada. Estas tecnologías, que utilizan biomasa y microorganismos rizosféricos como base para la generación de electricidad, ofrecen una oportunidad única para diversificar la matriz energética nacional, reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover prácticas sostenibles en sectores estratégicos como la agricultura y el tratamiento de aguas residuales.

La presente monografía tiene como objetivo evaluar el potencial de las PMFC en el mercado colombiano, identificando oportunidades, barreras y estrategias para su implementación. En el marco de esta investigación, se analizaron configuraciones tecnológicas, aplicaciones globales y casos de éxito de empresas pioneras como Bioo, Alinti y Plant-e, destacando su relevancia en contextos con alta disponibilidad de biomasa y limitaciones de acceso a la electricidad.

Metodológicamente, el estudio se estructuró en tres fases: la recolección y análisis de información científica y técnica relevante, el desarrollo de un marco teórico centrado en los fundamentos y aplicaciones de las PMFC, y la identificación de barreras y oportunidades específicas para su adopción en Colombia. Se utilizaron técnicas de análisis multicriterio para evaluar factores como la densidad de potencia, las características de las especies vegetales y las condiciones socioeconómicas de regiones clave.

Los resultados muestran que Colombia, con su rica biodiversidad y abundancia de residuos orgánicos, tiene un alto potencial para implementar esta tecnología. Se identificaron regiones como

Vaupés, Chocó y San Andrés, donde las PMFC podrían transformar positivamente las condiciones energéticas y ambientales, fomentando la generación distribuida y mejorando la calidad de vida en comunidades rurales. Asimismo, se destacan posibles alianzas estratégicas con empresas internacionales como Bioo para acelerar la transferencia tecnológica y la implementación de proyectos piloto.

A pesar de los beneficios, las barreras actuales incluyen la falta de normativas específicas, altos costos iniciales y la necesidad de mayor sensibilización y capacitación. Por ello, esta investigación propone estrategias concretas que combinan políticas públicas, incentivos fiscales y alianzas entre academia, industria y gobierno para superar estas limitaciones.

La presente monografía busca posicionar a las PMFC como una solución energética innovadora en Colombia, contribuyendo no solo a los objetivos de transición energética, sino también a los de desarrollo sostenible. Al promover tecnologías como las PMFC, el país no solo avanzará hacia un sistema energético más resiliente y sostenible, sino que también fortalecerá su posición como líder en la adopción de tecnologías renovables en la región.

## **1. Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC): Oportunidades en el mercado colombiano**

### **1.1 Planteamiento del problema**

La creciente demanda energética en Colombia representa un desafío crítico para la sostenibilidad y competitividad del país, al generar una profunda dependencia de los combustibles fósiles. Esta dependencia eleva los costos operativos en diversos sectores productivos nacionales, impactando negativamente en su rentabilidad y contribuyendo significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Tal situación subraya la urgencia de implementar soluciones energéticas descentralizadas, resilientes y sostenibles que permitan mitigar estos riesgos económicos y ambientales, fortaleciendo la autonomía energética de los sectores estratégicos del país.

En este contexto, las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) emergen como una tecnología prometedora con el potencial de transformar la matriz energética colombiana. A diferencia de otras fuentes de energía renovable, las PMFC ofrecen la singular ventaja de generar electricidad directamente de los procesos metabólicos de las plantas y los microorganismos del suelo. Esto permite una producción energética distribuida, de bajo impacto ambiental y con un alto grado de integración biológica, lo que sugiere su aplicabilidad en diversos entornos productivos donde la biomasa vegetal y los suelos son predominantes.

### **1.2 Justificación**

La creciente demanda energética mundial y la necesidad de reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles, han impulsado la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y

sostenibles. En este contexto, las Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC) emergen como una tecnología prometedora que aprovecha procesos biológicos para generar electricidad, ofreciendo ventajas significativas como la baja emisión de gases contaminantes y la utilización de recursos no renovables.

Colombia, con su rica biodiversidad, representa un escenario ideal para explorar el potencial de las PMFC. La integración de esta tecnología en la matriz energética nacional podría contribuir a la diversificación de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), la reducción de la huella de carbono y el desarrollo de un sector energético más sostenible.

Sin embargo, a pesar de las ventajas que ofrecen las PMFC, su adopción en el mercado colombiano aún es limitada. Existe una necesidad de comprender a fondo las oportunidades y desafíos que enfrenta la implementación de esta tecnología en diferentes sectores, como la agricultura, la industria y el sector residencial. Además, es fundamental analizar el marco regulatorio y las políticas públicas existentes para identificar las barreras y los incentivos que podrían influir en su desarrollo.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar el potencial de mercado de las Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC) en Colombia, identificando los factores clave que influyen en su adopción en sectores estratégicos del país.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Investigar a los principales competidores, productos y servicios que emplean tecnología PMFC en el mercado latinoamericano y colombiano.

Identificar los sectores estratégicos con mayor potencial para la aplicación de PMFC en Colombia, considerando sus necesidades energéticas y su capacidad de adopción tecnológica.

Analizar los factores que facilitan u obstaculizan la adopción de la tecnología PMFC en Colombia, incluyendo aspectos tecnológicos, económicos, regulatorios y sociales.

## **2. Marco referencial**

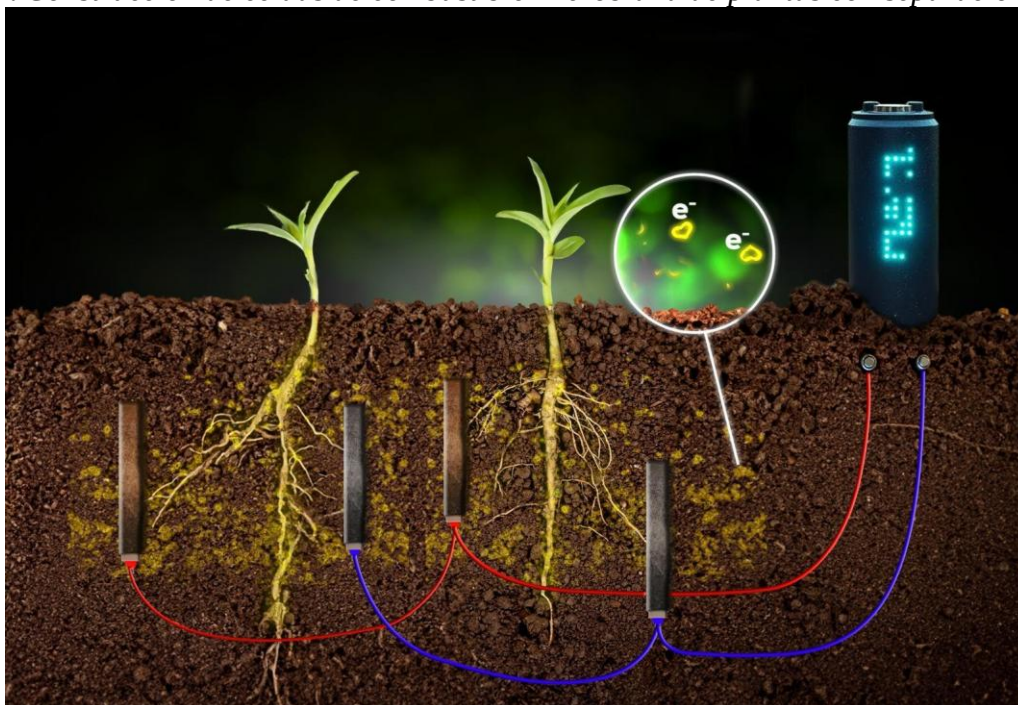
### **2.1 Marco teórico**

Las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) son dispositivos bioelectroquímicos que aprovechan la actividad de las raíces de las plantas y de las bacterias electroquímicamente activas (EAB) o cianobacterias a su alrededor para generar electricidad. Las plantas, a través de la excreción de exudados radiculares en su proceso fotosintético, proporcionan un sustrato orgánico que las EAB utilizan como fuente de energía y a su vez mediante procesos metabólicos transfieren electrones extracelulares (EET) creando así un flujo de corriente eléctrica que puede ser captado por un sistema de electrodos (Nitisoravut y Regmi, 2017). La disposición de estos electrodos es vital desde la perspectiva de la eficiencia y el costo. Por lo tanto, se han desarrollado diferentes tipos de MFC con y sin plantas para mejorar la potencia de salida. Entre ellos se encuentran los de cámara doble que consisten en compartimentos anódicos y catódicos separados por una membrana y los de cámara simple o única en donde se conecta el cátodo con el aire dejando una sola cámara para el ánodo y no requiere membrana. Adicionalmente, la

configuración o conexión física de estos electrodos puede darse circularmente en serie o en paralelo apilando varias PMFCs en donde en algunos estudios se ha analizado que la configuración en paralelo produce una corriente alta y el apilamiento en serie produce un alto voltaje (Saad Saleem, 2023).

A continuación, en la figura 1 se aprecian las partes de una PMFC compuesta por un ánodo que interactúa con los microbios y posee propiedades de conductividad y biocompatibilidad, que son estables con el sustrato y un cátodo que consolida los electrones y protones que interactúan con el oxígeno y lo convierten en agua. Esta configuración en paralelo no contempla membranas físicas, sino que emplea a las plantas como un separador natural de sus electrodos y que a su vez permite tomar muestras de voltaje con un multímetro convencional (Morales, 2020).

**Figura 1.** *Construcción de celdas de combustible microbiana de plantas con separación natural*



Esta tecnología presenta diversas ventajas, como su sostenibilidad, bajo impacto ambiental y la posibilidad de generar energía a partir de residuos orgánicos. Las PMFC han sido implementadas en una variedad de entornos, incluyendo arrozales, humedales, techos verdes y cuerpos de agua flotantes. Además, existe un gran potencial para su integración en sistemas agrícolas, sin afectar la producción de alimentos, así como en entornos urbanos, como techos verdes y jardines verticales. Asimismo, entre las diferentes aplicaciones reportadas principalmente por países como México, Perú, España y China de las PMFC incluyen su capacidad para funcionar como sensores biológicos, producir biocombustibles, tratar aguas residuales y alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo, demostrando su potencial en diversos entornos (Wang, 2019).

Sin embargo, la eficiencia de las PMFC y por ende su potencia eléctrica generada, también se ve influenciada por una compleja interacción de factores, entre los que destacan la intensidad lumínica, la concentración de dióxido de carbono, la temperatura, la selección de especies vegetales, la composición de la flora microbiana en la rizosfera, la naturaleza del material de los electrodos y a su vez la resistencia interna del circuito formado (Maddalwar, 2021). Otro concepto que podría utilizarse de manera eficaz para evaluar el rendimiento de la tecnología PMFC es el "tiempo de recuperación de la inversión" (PBT), que significa el período de tiempo necesario para generar energía de valor igual al valor de la energía requerida para su construcción y la vida útil de las piezas materiales utilizadas para hacer el ensamblaje de PMFC; que si bien es difícil dar una cifra exacta para las, las tendencias actuales sugieren que el PBT de las PMFC está disminuyendo a medida que la tecnología avanza (Maddalwar y Nayak, 2021).

Con una eficiencia de conversión de potencia máxima teórica del 0,92%, las PMFC son pequeñas e incomparables con otras fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) o

energías alternativas implementadas en América Latina como la solar o la eólica, cuya eficiencia oscila entre el 15% y el 50% respectivamente. Aunque la energía solar y eólica para el 2023 ya ocupaban un 14% de la matriz energética, las PMFC presentan características atractivas como el precio, la simplicidad de instalación, la autosostenibilidad e incluso el funcionamiento continuo tanto en el día como durante la noche (Limbergen, 2022).

El mercado de pilas de combustible microbianas presenta tendencias regionales distintivas, condicionadas por la madurez económica, el enfoque industrial y el avance tecnológico. Norteamérica se erige como un líder clave del mercado, gracias a su avanzada infraestructura, su sólida base de consumidores y sus importantes inversiones en investigación y desarrollo. La región se beneficia de la adopción temprana de tecnologías innovadoras y de un ecosistema comercial consolidado. Europa le sigue como un importante contribuyente, impulsada por rigurosos estándares regulatorios, objetivos de sostenibilidad ambiental y un alto nivel de automatización industrial. Países como Alemania, Francia y el Reino Unido desempeñan un papel crucial en la dinámica del mercado regional. En contraste, se proyecta que la región Asia-Pacífico experimente la mayor tasa de crecimiento, con países como China, India y Corea del Sur liderando la expansión mediante la urbanización, la transformación digital y la escalabilidad de la fabricación. Mientras tanto, América Latina y Oriente Medio y África están emergiendo con un progreso constante. Estos mercados se ven impulsados por la modernización de la infraestructura, los cambios demográficos y el aumento de la inversión extranjera directa, lo que los hace atractivos para oportunidades a largo plazo en el mercado de las pilas de combustible microbianas (Grow, 2025).

**Tabla 1.** Países con oportunidad de mercado para PMFCs

| País   | Aspectos clave del mercado PMFC                                                                                                                                                                                 |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italia | El mercado de pilas de combustible microbianas en Italia se caracteriza por una sólida infraestructura industrial, una cultura de innovación y una creciente conformidad normativa con las directivas de la UE. |

| <i>País</i>    | <i>Aspectos clave del mercado PMFC</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Países bajos   | Los Países Bajos cuentan con un próspero mercado de pilas de combustible microbianas gracias a su economía tecnológicamente avanzada, su sólida infraestructura logística y sus políticas impulsadas por la innovación.                                                                                                           |
| España         | El mercado español de pilas de combustible microbianas está evolucionando rápidamente, impulsado por la adopción digital, la modernización del sector público y el aumento de la inversión en I+D.                                                                                                                                |
| Brasil         | El mercado brasileño de celdas de combustible microbianas se erige como un motor clave en Latinoamérica, caracterizado por una amplia base de consumidores, diversidad industrial y una creciente presencia digital.                                                                                                              |
| México         | El mercado mexicano de celdas de combustible microbianas se beneficia de su ubicación estratégica, mano de obra calificada y profundos vínculos comerciales con Norteamérica. El país integra cada vez más la tecnología en sectores clave como la manufactura, el comercio minorista, la logística y los servicios financieros.  |
| Argentina      | El mercado argentino de celdas de combustible microbianas se sustenta en su economía del conocimiento, altos niveles de educación y una sólida cultura de innovación. Los sectores clave en crecimiento incluyen la tecnología agrícola, la salud, el desarrollo de software y la tecnología financiera.                          |
| Arabia Saudita | El mercado de pilas de combustible microbianas de Arabia Saudita está experimentando una transformación significativa, impulsada por su iniciativa Visión 2030. El país está pasando de una economía dependiente del petróleo a un modelo diversificado que incluye turismo, entretenimiento, bienes raíces e innovación digital. |
| Sudáfrica      | Sudáfrica es una puerta de entrada líder al mercado de pilas de combustible microbianas del África subsahariana, ofreciendo infraestructura avanzada, una economía diversificada y un creciente segmento de consumidores.                                                                                                         |
| Malasia        | El mercado de pilas de combustible microbianas de Malasia se está consolidando como un centro regional de investigación en el Sudeste Asiático, impulsado por sólidas políticas gubernamentales, la creciente adopción de tecnología y una base económica diversa.                                                                |

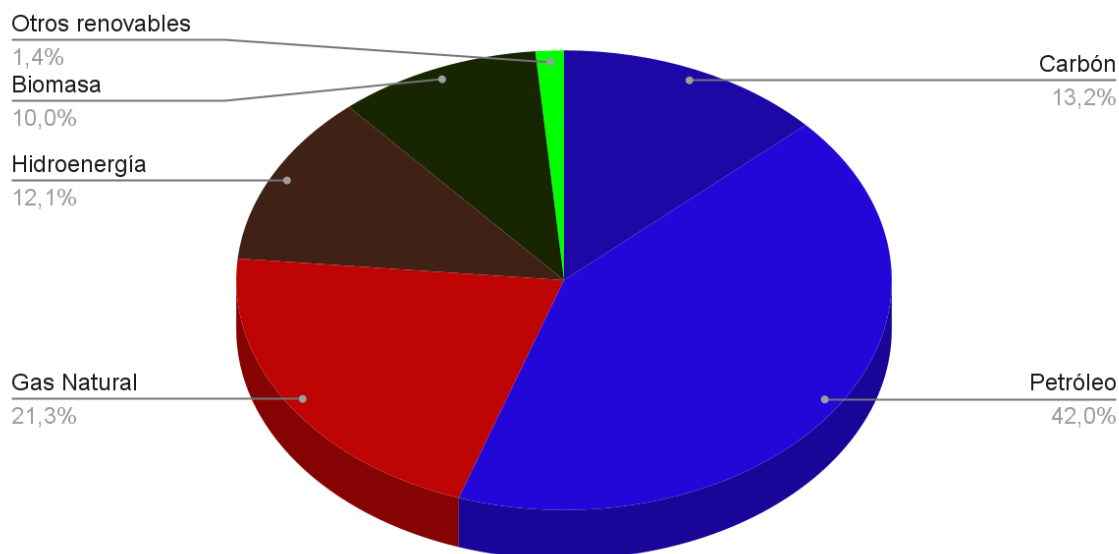
El mercado de pilas de combustible microbianas presenta tendencias regionales distintivas, condicionadas por la madurez económica, el enfoque industrial y el avance tecnológico. Norteamérica se erige como un líder clave del mercado, gracias a su avanzada infraestructura, su sólida base de consumidores y sus importantes inversiones en investigación y desarrollo. La región se beneficia de la adopción temprana de tecnologías innovadoras y de un ecosistema comercial consolidado. Europa le sigue como un importante contribuyente, impulsada por rigurosos estándares regulatorios, objetivos de sostenibilidad ambiental y un alto nivel de automatización industrial. Países como Alemania, Francia y el Reino Unido desempeñan un papel crucial en la dinámica del mercado regional.

En contraste, se proyecta que la región Asia-Pacífico experimente la mayor tasa de crecimiento, con países como China, India y Corea del Sur liderando la expansión mediante la

urbanización, la transformación digital y la escalabilidad de la fabricación. Mientras tanto, América Latina y Oriente Medio y África están emergiendo con un progreso constante. Estos mercados se ven impulsados por la modernización de la infraestructura, los cambios demográficos y el aumento de la inversión extranjera directa, lo que los hace atractivos para oportunidades a largo plazo en el mercado de las pilas de combustible microbianas (Grow, 2025).

Colombia por otra parte, se evidencia en la figura 2 la estructura energética primaria se basa también en gran medida en combustibles fósiles, lo que genera una alta dependencia económica del sector minero-energético y limita la generación de valor agregado y productividad en otros sectores. Para superar esta situación, el país requiere implementar una transición energética gradual y articulada, promoviendo la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en sectores estratégicos. (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2023).

**Figura 2.** Participación de fuentes de energía en Colombia



En cuanto a “Otros renovables” se incluyen las contribuciones de la energía solar y eólica, las cuales han experimentado un crecimiento exponencial debido a factores como la disminución de los costos de las tecnologías, las políticas gubernamentales y el aumento de la capacidad instalada tanto del sistema interconectado nacional (SNI) como de las zonas no interconectadas del país (ZNI) (IPSE, 2023).

Lo anterior ha incrementado la confianza en estas tecnologías y ha abierto nuevas oportunidades de mercado que apuntan a los objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 7 y el ODS 13, que resaltan el papel crucial de las energías renovables en la mitigación del cambio climático y el acceso universal a energía sostenible. En este contexto de transición energética, las Celdas de Combustible Microbianas de Plantas (PMFC) surgen como una tecnología innovadora con un gran potencial para contribuir a la generación distribuida de energía, especialmente en regiones con recursos limitados (Martinez, 2025).

Las zonas más propicias para la implementación de PMFC en Colombia, deben contemplar regiones con alta producción agrícola, ganadera o industrial que generen grandes cantidades de residuos orgánicos o biomasa, que puedan servir como sustrato para las PMFC.

La biomasa en Colombia representa alrededor del 17% de las fuentes disponibles para producir energía. Aprovechar este recurso representa ventajas para el país como la disminución de la contaminación y el aprovechamiento de tierras abandonadas para evitar la erosión y degradación de los suelos, aprovechamiento de los residuos de diferentes industrias, fomentando la creación de empleo en áreas rurales y disminuir los costos de la energía (Manos Verdes, 2020).

A continuación, en la tabla 2, se presentan algunas regiones de Colombia que presentan un potencial para la implementación de PMFC. Estas regiones, aunque presentan aislamiento geográfico y una creciente demanda energética, son ricas en biodiversidad, numerosos humedales

y generación de materia orgánica, hacen que esta tecnología sea una alternativa atractiva y sostenible (IPSE, 2024).

**Tabla 2.** *Departamentos con mayor aprovechamiento de biomasa en Colombia*

| <i>Región</i> | <i>Habitantes</i> | <i>Usuarios con acceso a energía</i> | <i>Consumo de energía [KWh]</i> | <i>Capacidad instalada FN CER y Biomasa [KW]</i> |
|---------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| Vaupés        | 32,793            | 11,820                               | 1,606,179                       | 2,000                                            |
| Chocó         | 4,863             | 2,750                                | 908,362                         | 1,875                                            |
| San Andrés    | 56,333            | 22,384                               | 19,029,216                      | 1,000                                            |

De la tabla anterior es posible observar que entre el 40% y el 50% de los habitantes no cuentan con acceso a energía eléctrica convencional, lo que impacta significativamente su calidad de vida y el medio ambiente. En el Vaupés, la dependencia de la leña para cocinar y calentar ocasiona deforestación y problemas respiratorios (GLOBAL FOREST WATCH, 2023). En el Chocó, la minería artesanal genera residuos que contaminan los ríos (El espectador, 2024), y en San Andrés, el turismo, motor de la economía, demanda energía para hoteles y restaurantes, mientras que la escasez de agua dulce requiere soluciones innovadoras (Álvarez, 2024). En todas estas regiones, las PMFCs ofrecen una alternativa sostenible, al permitir generar energía a partir de recursos locales, tratar aguas residuales y apoyar actividades económicas como la agricultura y el turismo, mejorando así la calidad de vida de las comunidades y protegiendo el medio ambiente.

Sin embargo, por más prometedor que sea es difícil implementar esta solución en un principio a gran escala por eso es necesario contemplar barreras de Entrada como el costo inicial de implementación de las PMFCs, su desarrollo requiere una mayor investigación y adaptación, se requiere de capacitación y conocimiento especializado para el diseño, instalación y mantenimiento de estos sistemas. Pero si se conectan estas iniciativas con políticas gubernamentales como Incentivos fiscales, programas de apoyo y alianzas entre investigadores,

agricultores y empresas podrían impulsar la adopción de las PMFCs acelerar la transferencia tecnológica y finalmente su comercialización (MINCIENCIAS, 2020).

Algunas políticas públicas existentes que pueden apoyar esta tecnología es la “Política de Crecimiento Verde”, que tiene como propósito impulsar el aumento de la productividad y la competitividad económica del país, asegurando el uso sostenible de la riqueza natural y la inclusión social, de manera compatible con el cambio climático (Departamento nacional de planeación, 2018); la política de “economía circular”, que tiene como objetivo implementar un modelo de gestión de la información en la prestación de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales con el fin de garantizar la oferta y cobertura de agua en el largo plazo en condiciones de calidad y continuidad (Santander Competitivo, 2020); y por último entidades administrativas como el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Trabajo, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Ministerio de Educación Nacional, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONPES, 2020).

## **2.2 Marco legal**

La innovación es el motor que impulsa el progreso tecnológico y social. En un mundo cada vez más competitivo, la capacidad de desarrollar y comercializar productos novedosos se ha convertido en un factor clave para el éxito empresarial.

A continuación, en la tabla 2, se busca destacar, analizar y comparar los productos más innovadores del mercado que aplican la tecnología PMFC que ya se encuentran disponibles comercialmente. Con ello, se busca identificar las tendencias más relevantes, las tecnologías emergentes y los desafíos que enfrentan los desarrolladores de estos nuevos productos.

**Tabla 3.** *Aplicaciones comerciales de la tecnología PMFC*

| <i>Nombre</i>  | <i>Aplicaciones e impacto</i>                                                                                                                                                 | <i>Referente</i>                       |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Bioo Panel     | Generación de energía 15 Wh/día (7x7 metros).<br>Absorción anual de CO <sub>2</sub> 8Kg/m <sup>2</sup> .                                                                      | Biootech - Barcelona (Biootech, n.d.)  |
| Bioo Switch    | Activación de luces, pantallas, sonido y música.                                                                                                                              | Biootech - Barcelona (Biootech, n.d.)  |
| Bioo Lumina    | Generación de bioluminiscencia natural en las noches.                                                                                                                         | Biootech - Barcelona (Biootech, n.d.)  |
| Alinti e-POT   | Alimentación de dispositivos de 10W (Cargadores de teléfonos móviles, Bombillas led).<br>Absorción anual de CO <sub>2</sub> 1,8 Kg.<br>Liberación de 27 gr de oxígeno al día. | Alinti - Perú (ALINTI, n.d.)           |
| Alinti e-GRASS | Iluminación eficiente de 25W para calles y parques.<br>Absorción anual de CO <sub>2</sub> 210,24 Kg.                                                                          | Alinti - Perú (ALINTI, n.d.)           |
| SensorStick    | Fuente de energía, sensor de temperatura, sensor de nivel de agua y sistema de transmisión por satélite.                                                                      | Plant-e - Países Bajos (PLANT-E, n.d.) |

Otras aplicaciones que aún no son comerciales han demostrado la viabilidad de generar bioelectricidad a partir de aguas residuales domésticas y de destilerías utilizando sistemas de macrófitas flotantes y PMFC. Estos sistemas no solo lograron una notable eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) y los ácidos grasos volátiles (AGV), sino que también produjeron una densidad de corriente considerable (224.93 mA/m<sup>2</sup>) (Mohan, 2011).

Investigaciones recientes también han demostrado que es posible obtener densidades de corriente significativas al emplear PMFC alimentadas con aguas residuales porcinas logrando densidades máximas de potencia de 5.5 mW/m<sup>2</sup>. Estos sistemas aprovechan la actividad metabólica de las bacterias para descomponer la materia orgánica y generar electrones convirtiéndose en digestores anaerobios óptimos para biocombustibles como bioetanol o biodiesel (Baltazar, n.d.). La investigación en este campo continúa avanzando, buscando optimizar los sistemas de PMFC para mejorar la eficiencia de la generación de energía y ampliar sus aplicaciones. A largo plazo, esta tecnología podría convertirse en una herramienta valiosa para la

gestión sostenible de las aguas residuales porcinas y la producción de energía renovable en zonas rurales.

Además de la generación de energía, las PMFC han mostrado potencial de hacer fitorremediación para limpiar suelos, aguas y aire contaminados y así mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero al ser instaladas en humedales y arrozales, característicos de hábitats frescos (C3) pero se continúan haciendo investigaciones con plantas de hábitats cálidos y secos (C4 y CAM) (Khan Academy, n.d.). Además, se analiza la producción de hidrógeno, biocombustibles y productos bioquímicos como subproductos que pueden almacenarse y utilizarse para otros fines industriales (Saad Saleem, 2023).

A continuación, en la tabla 3, se presenta un compendio de especies vegetales colombianas que han sido objeto de estudio en investigaciones previas relacionadas con celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) (Mendoza y Muñoz, 2020). Esta recopilación, evidencia el interés creciente en explorar el potencial de la flora nacional para generar energía limpia y sostenible en diversas regiones del país.

**Tabla 4.** *Plantas Colombianas Evaluadas en Investigaciones de PMFC*

| <i>Especie de plantas</i> | <i>Distribución</i>                                                                                                          | <i>Densidad de potencia máxima</i> |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Arroz                     | Cultivado en casi todas las regiones de Colombia, especialmente en las llanuras del Pacífico y el Orinoco.                   | 12.17 mW/cm <sup>2</sup>           |
| Caña                      | Común en humedales y zonas pantanosas a lo largo de ríos y lagos.                                                            | 18 mW/m <sup>2</sup>               |
| Canna indica              | Ampliamente cultivada como ornamental en jardines y parques.                                                                 | 18 mW/cm <sup>2</sup>              |
| Totorá                    | Presente en humedales y cuerpos de agua dulce en muchas regiones, incluyendo los Andes.                                      | 93 mW/m <sup>3</sup>               |
| Brassica juncea           | Es una especie de mostaza que se cultiva en Colombia, principalmente para la producción de aceite vegetal.                   | 69.32 mW/m <sup>2</sup>            |
| Trigonella foenum-graecum | Conocida como alholva, se cultiva en algunas regiones de Colombia, principalmente para uso medicinal y como condimento.      | 80.26 mW/m <sup>2</sup>            |
| Epipremnum aureum         | Conocida como potos, es una planta trepadora muy común en Colombia, tanto en ambientes naturales como en jardines y hogares. | 15.38 mW/m <sup>2</sup>            |

| <i>Especie de plantas</i> | <i>Distribución</i>                                                                          | <i>Densidad de potencia máxima</i> |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Maiz                      | Es uno de los cultivos más importantes de Colombia, cultivado en diversas regiones del país. | 80 mW/cm <sup>2</sup>              |

Entre las especies presentadas, la totora se destaca como la que más ha presentado mayor densidad de potencia, lo que la posiciona como una candidata prometedora para la implementación de PMFC en humedales y zonas costeras. Además, los resultados obtenidos con cultivos como el arroz y el maíz abren nuevas posibilidades para la valorización de residuos agrícolas y la generación de energía distribuida en zonas rurales.

### 3. Método

La presente investigación se estructuró en cuatro fases adoptando un enfoque cualitativo de tipo exploratorio y descriptivo, diseñado para identificar, analizar y evaluar el potencial de las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) en el contexto colombiano.

En la primera fase se tiene la recopilación y selección de información. Esta fase se centró en la recopilación de información de fuentes secundarias, incluyendo literatura científica, informes técnicos, documentos de políticas y análisis del mercado colombiano. Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos académicas y se consultaron informes técnicos y regulatorios relacionados con energías renovables y desarrollo tecnológico. Se priorizaron fuentes publicadas en los últimos cinco años (2020-2025) para asegurar la pertinencia y la vigencia de la información.

En la primera fase se tiene el análisis del marco teórico y estado del arte. En esta fase, la información recopilada fue sometida a un análisis para establecer el fundamento conceptual y contextualizar el avance de las PMFC a nivel global y su posible adaptación al entorno colombiano. Además, se identificaron y documentaron las aplicaciones comerciales y experimentales destacadas de PMFC a nivel mundial.

En la tercera fase se tiene el procesamiento y análisis de la información. Esta fase se dedicó a la organización de la información para dar respuesta a los objetivos específicos. Los datos recopilados y analizados en las fases previas fueron categorizados y organizados en tablas estructuradas, facilitando la identificación de competidores y tecnologías energéticas existentes en el mercado colombiano que podrían coexistir con las PMFC.

Adicionalmente se determinaron los sectores estratégicos en Colombia con alto potencial de adopción de PMFC, basándose en sus necesidades energéticas; y se detallaron las barreras tecnológicas, económicas, regulatorias y sociales que actualmente obstaculizan la adopción y escalabilidad de las PMFC en el contexto colombiano.

Finalmente, en la cuarta fase se tiene la validación de resultados y propuestas. Esta fase final consistió en la síntesis de los hallazgos y la formulación de recomendaciones concretas. Como parte del enfoque propositivo de la monografía, se plantearon recomendaciones específicas y estratégicas para superar las barreras identificadas.

Esta metodología permitió generar un análisis integral que no solo evalúa el estado actual y el potencial de las PMFC en Colombia, sino que también propone estrategias concretas y justificadas para su adopción y desarrollo en el contexto local.

#### 4. Resultados

A continuación, en la tabla 4 se presentan los competidores, celadores o sustitutos que han realizado pilotos con tecnología PMFC.

**Tabla 3.** *Competidores, productos y servicios que emplean tecnología PMFC en el mercado latinoamericano*

| <i>País</i> | <i>Competidores</i>         | <i>Productos y servicios</i>   | <i>Estado de innovación</i> |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Argentina   | Universidad de Buenos Aires | Tratamiento sintético de aguas | Investigación y             |

| <i>País</i> | <i>Competidores</i>                                 | <i>Productos y servicios</i>                                                                                                                                                            | <i>Estado de innovación</i>     |
|-------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
|             | Argentina                                           | residuales                                                                                                                                                                              | prototipado                     |
| Bolivia     | Revista boliviana de química                        | Tratamiento de aguas residuales                                                                                                                                                         | Investigación y prototipado     |
| Brasil      | Universidad estadual paulista                       | Tratamiento de aguas residuales.                                                                                                                                                        | Investigación y prototipado     |
|             | Universidad tecnológica federal do paraná           | Tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos.                                                                                                                         |                                 |
|             | Universidad Federal de Viçosa                       | Tratamiento de aguas residuales sanitarias para humedales artificiales.                                                                                                                 |                                 |
|             | Universidad federal de santa catarina               | Generación de bioelectricidad y desalinización.                                                                                                                                         |                                 |
| Chile       | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Cuba        | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Colombia    | Universidad Católica                                | Caracterización de variables eléctricas.                                                                                                                                                | Investigación y prototipado     |
|             | Universidad del cauca                               | Generación no convencional de energía.                                                                                                                                                  |                                 |
|             | Universidad de la Salle                             | Generación de electricidad en cultivos.                                                                                                                                                 |                                 |
|             | Universidad Nacional                                | Prototipo “Terrabatt” lámpara led.                                                                                                                                                      |                                 |
| Costa Rica  | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Ecuador     | Universidad Nacional de Loja                        | Prototipo de lámpara LED.                                                                                                                                                               | Investigación y prototipado     |
| Guatemala   | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Honduras    | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| México      | Universidad Nacional Autónoma de México             | Bio combustibles a partir de aguas residuales.                                                                                                                                          | Investigación y prototipado     |
|             | Instituto tecnológico superior de san andrés tuxtla | Bio-electricidad y tratamiento de aguas residuales mediante mesocosmos de humedales ingenieriles                                                                                        |                                 |
| Nicaragua   | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Panamá      | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Perú        | AlintiGroup                                         | Alinti e-POT para alimentación de dispositivos de iluminación de 10W y ALINTI e-GRASS para alimentación de dispositivos móviles y de iluminación de 25W además de purificación de aire. | Lanzamiento (Alintigroup, n.d.) |
| Uruguay     | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |
| Venezuela   | 0                                                   | 0                                                                                                                                                                                       | 0                               |

Como se puede observar, la mayoría de los proyectos de PMFC en Latinoamérica se encuentran en una etapa inicial de investigación y prototipado, y aún son necesarios mayores esfuerzos para llevar estas tecnologías al mercado y promover su adopción a gran escala. Sin embargo, empresas peruanas como Alinti que cuenta con 2 productos actualmente en lanzamiento

al mercado demuestra el potencial de llevar la tecnología PMFC especialmente en las comunidades rurales que carecen de acceso a la electricidad, aprovechando la biodiversidad de estos lugares, permitiendo iluminar espacios interiores y exteriores, sustituyendo a las lámparas y velas. Además, han presentado prototipos para la carga de teléfonos celulares y otros dispositivos electrónicos de bajo consumo. Estos desarrollos validan la funcionalidad de las PMFC más allá del laboratorio, lo que es crucial para su futura adopción.

A continuación, en la tabla 5 se presenta una visión general de los principales sectores productivos en Colombia, considerando factores como el crecimiento de la demanda energética (En 2024, La Demanda De Energía En Colombia Aumentó 2.3% En Comparación Con El año Anterior, 2025), su participación en la matriz energética total, la disponibilidad de biomasa y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (DANE, 2023).

**Tabla 4.** Sectores estratégicos con potencial para la aplicación de PMFC en Colombia

| Sectores productivos | Crecimiento demanda energética | Participación en la matriz energética | Disponibilidad de biomasa | Emisiones de CO <sub>2</sub> eq |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Manufactura          | -1,67%                         | 39,39%                                | 20% a 30%                 | 20% a 25%                       |
| Agricultura          | 1,23%                          | 3,77%                                 | 50% o más                 | 10% a 15%                       |
| Minería              | -0,16%                         | 30,23%                                | <10%                      | 5% a 10%                        |
| Comercio y logística | -1,20                          | 5,19%                                 | <5%                       | 15% a 20%                       |
| Hotelería y turismo  | -15,11                         | 6,85%                                 | <5%                       | 5% a 10%                        |

El análisis de la tabla revela que el sector agrícola presenta el mayor potencial para la implementación de tecnologías de celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) en Colombia. Su alta disponibilidad de biomasa, proveniente de residuos agrícolas, lo posiciona como el sector más adecuado para aprovechar esta tecnología. Además, la capacidad de las PMFC para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la agricultura, como el metano, representa una ventaja significativa. En contraste, sectores como la minería y el comercio, aunque

demandan grandes cantidades de energía, presentan una menor disponibilidad de biomasa y, por tanto, un potencial más limitado para la aplicación de PMFC. El sector manufacturero podría explorar opciones de bioenergía, pero la competencia con otras tecnologías y la necesidad de adaptar los procesos industriales podrían representar desafíos. y finalmente, el sector hotelero y turístico, presenta un potencial más limitado debido a la menor disponibilidad de biomasa y a la naturaleza dispersa de sus operaciones, aunque podría ser de valor como atractivo turístico.

Entre los beneficios detectados para el sector agrícola se tienen que la tecnología PMFC podría aportar a:

Reducción de la dependencia de combustibles fósiles: Disminuyendo los costos de operación y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Generación de energía renovable no convencional: Produciendo electricidad de manera sostenible a partir de recursos locales, fortaleciendo la autonomía energética en zonas rurales

Aplicaciones versátiles: Permitiendo alimentar equipos de baja potencia como bombas de riego, sistemas de iluminación, sistemas de calefacción, sensores de monitoreo de parámetros ambientales como la humedad, temperatura, pH del suelo; y equipos de fertirrigación.

Sostenibilidad: Contribuyendo a la construcción de sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes.

Economía local: Generando oportunidades de empleo en la producción, instalación, mantenimiento y operación de estos sistemas.

Innovación y desarrollo tecnológico: Fomentando la investigación y el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptadas a las condiciones locales.

Como se puede observar, la versatilidad de las PMFC para alimentar equipos de baja potencia refuerza su pertinencia en el sector agrícola, ofreciendo una vía para reducir la

dependencia de combustibles fósiles, generar energía renovable no convencional y promover la sostenibilidad y la economía local. Aunque otros sectores como la manufactura, minería, comercio y hotelería también tienen demanda energética, su menor disponibilidad de biomasa o las particularidades de sus operaciones limitan su potencial de adopción.

A Continuación, en la tabla 6 se realiza un análisis PESTEL que permite identificar los factores Político, Económico, Sociocultural, Tecnológico, Ecológico y Legal que podrían generar debilidades o fortalezas a la implementación de la tecnología PMFC.

**Tabla 5 . Análisis PESTEL de factores que facilitan u obstaculizan la adopción de la tecnología PMFC en Colombia**

| <i>Factor</i> | <i>Estructura</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <i>Justificación</i>                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Político      | Políticas orientadas a la competitividad y la inclusión social (Plan Nacional de TIC, Plan Nacional de Desarrollo, la Política Nacional de Competitividad, el Plan de Ciencia y Tecnología y el Programa Estratégico de Uso de Medios y Tecnologías de la Información y Comunicaciones (MTIC) en la Educación) | Reducción de las brechas económica, social, digital y de oportunidades. Además de niveles de servicio de clase mundial, a precios asequibles, de acuerdo con su nivel socioeconómico.                                                      |
| Económico     | Tarifa de energía (300 a 1000 (\$/kWh) entre los estratos 1 a 6                                                                                                                                                                                                                                                | Inflación de precios al consumidor 11,7%.                                                                                                                                                                                                  |
|               | Tasa de desempleo 58%                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Riesgo de pobreza 36,6%.                                                                                                                                                                                                                   |
|               | Crecimiento del PIB 0,6%                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Colombia ocupa el puesto 87 del ranking de percepción de corrupción formado por 180 países.                                                                                                                                                |
|               | (ENEL, 2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                            |
| Social        | Demografía colombiana (Población total 52 millones) (Banco Mundial, 2025) (IPSE, 2023)                                                                                                                                                                                                                         | Las redes del sistema interconectado nacional contemplan el 48% de la población mientras que las Zonas no interconectadas corresponden al 52% del territorio nacional, donde se asienta el 79% de la población de carácter rural del país. |
| Tecnológico   | Indices de tecnología (Networked Readiness Index (NRI), Growth Competitiveness Index (GCI) - Technology Index (TI))                                                                                                                                                                                            | Colombia se ubica en la posición 69 entre 127 países, con una calificación de 3,71 sobre un máximo de 7,0 (Ministerio de comunicaciones, 2018)                                                                                             |
| Ecológico     | Políticas medio ambientales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)                                                                                                                                                                                                                                   | Producción de electricidad a partir de fuentes renovables 3%                                                                                                                                                                               |
| Legal         | Marco normativo para la aplicación de los beneficios o incentivos tributarios para los proyectos de energía con fuentes no convencionales de energías renovable (FNCER)                                                                                                                                        | Pueden acceder a estos incentivos las personas naturales o jurídicas que realicen inversiones directas en actividades tales como                                                                                                           |

(Abogados&Asociados, 2021)

investigación y desarrollo  
tecnológico en el ámbito de la  
producción de energía con fuentes  
no convencionales de energía -  
FNCE.

Con base en estos datos, es notable que el gobierno colombiano ha mostrado interés en promover el desarrollo de energías renovables, lo cual crea un entorno favorable para la implementación de PMFC. Además, las altas tarifas de energía y la gran proporción de población rural que requiere de este insumo para escuelas y hospitales pueden hacer que las PMFC sean una alternativa más económica a largo plazo. Sin embargo, la alta tasa de desempleo y el bajo crecimiento económico pueden limitar la capacidad de inversión en nuevas tecnologías. Además, existen desafíos en la aplicación de las políticas, incentivos y la coordinación entre diferentes niveles de gobierno, por lo tanto, es necesario fortalecer la investigación y el desarrollo en el área de las energías renovables para analizar y comparar su eficiencia y sus costos.

Si bien se realizó una investigación exhaustiva de los factores que influyen en la implementación de PMFC en Colombia, una de las limitaciones de esta monografía radica en la dificultad de obtener datos precisos sobre los costos de instalación y mantenimiento. Los costos de las PMFC son altamente variables y dependen de factores como el tipo de configuración de electrodos, materiales de los mismos, ubicación geográfica por temas meteorológicos y disponibilidad de otros recursos. Lo cual en comparación con otras energías alternativas no convencionales aún no presenta una viabilidad económica calculable para Colombia. Sin embargo, a continuación, en la tabla 7, se presenta una tabla comparativa de aspectos clave de esta tecnología con otras fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) para comprobarlo.

**Tabla 6.** *Comparativa de tecnologías para FNCER vs PMFC*

| <i>Aspecto</i>      | <i>Celdas de Combustible Microbiano de Plantas</i>  | <i>Celdas Solares</i>                              | <i>Turbinas eólicas</i>                         |
|---------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Fuente de Energía   | Plantas / Vegetación                                | Radiación solar                                    | Viento                                          |
| Disponibilidad      | Continua                                            | Intermitente                                       | Intermitente                                    |
| Eficiencia          | En investigación                                    | Aprox. 15%                                         | Aprox. 50%                                      |
| Costos              | Variables                                           | Bajos                                              | Altos                                           |
| Impacto ambiental   | Bajo                                                | Moderado                                           | Alto                                            |
| Madurez Tecnológica | En desarrollo (investigación y desarrollo continuo) | Madura (ampliamente comercializada y utilizada)    | Madura (ampliamente comercializada y utilizada) |
| Aplicaciones        | Generación de electricidad a pequeña escala         | Generación de electricidad a pequeña y gran escala | Generación de electricidad a gran escala        |

Es evidente que las PMFC se encuentran en una fase de madurez tecnológica significativamente inferior en comparación con las tecnologías solares y eólicas, que son soluciones ampliamente consolidadas y con un alto grado de desarrollo e implementación a nivel global. A pesar de esta menor madurez y de la variabilidad en los costos iniciales, la tabla 7 señala que las PMFC poseen características únicas, como su capacidad de generación continua y su integración con ecosistemas biológicos, lo que las distingue de las FNCER tradicionales que dependen de condiciones climáticas específicas.

Si bien las PMFC no buscan competir directamente en grandes proyectos energéticos con tecnologías maduras, sí representan una alternativa prometedora para nichos de mercado específicos, como la generación distribuida en áreas rurales o aplicaciones donde la sostenibilidad y la integración con procesos biológicos son prioritarias.

## 6. Conclusiones

Las PMFC pueden desempeñar un papel crucial en regiones rurales con limitaciones de acceso a la electricidad, mejorando la calidad de vida y fomentando la sostenibilidad.

La colaboración entre la academia, el gobierno y la industria es determinante para superar los desafíos tecnológicos, fomentar la transferencia de conocimiento, optimizar la eficiencia de las PMFC y ampliar sus aplicaciones en diferentes sectores estratégicos de la economía colombiana como la agricultura hasta llevarlas hacia la comercialización.

A partir del análisis de las aplicaciones comerciales existentes, establecer un diálogo con empresas como Bioo en España o Alinti en Perú, podría traducirse en beneficios mutuos, como la validación de sus tecnologías en un contexto de alta biodiversidad como el colombiano y el acceso a soluciones energéticas de vanguardia en zonas no interconectadas.

Las investigaciones revisadas evidencian que muchos de los materiales necesarios para la fabricación de electrodos, como el cobre, aluminio, grafito y membranas, están ampliamente disponibles en Colombia. Esto presenta una oportunidad para reducir costos mediante el aprovechamiento de recursos locales y la reutilización de materiales.

Al ser una tecnología en desarrollo existe una falta de estandarización en los términos para referirse a las celdas de combustible microbiana de plantas (PMFC, MFC plant, MFC vegetal) dificulta la búsqueda de información específica en los diferentes países de Latinoamérica.

### Referencias

- Abogados&Asociados. (2021, septiembre). Incentivos tributarios de energías renovables en Colombia. <https://www.andi.com.co/Uploads/CARTILLA-INCENTIVOS-TRIBUTARIOS-ENERGI%CC%81A-RENOVABLE.pdf>
- Aguado Álvarez, J. P. (2024, diciembre 12). El agua en las islas: el caso de San Andrés. Revista Credencial.
- ALINTI. (n.d.). Generamos electricidad a partir de la fotosíntesis de las plantas. alintigroup. <https://alintigroup.com>
- Alintigroup. (n.d.). Alinti Abro. <https://alintigroup.com/landing-page-alinti-abro/>
- Banco Mundial. (2025). Indicadores del desarrollo mundial. <https://datos.bancomundial.org/pais/colombia>
- Biootech. (n.d.). Bioo Panel. Biootech. Retrieved 2024, from <https://www.biootech.com/es/panel>
- DANE. (2023, octubre 6). Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales de emisiones al aire (CAEFM-EA). <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CAEFM-EA/bol-CAEFM-EA-2021p.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). Política de crecimiento verde. <https://2022.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Pol%C3%ADtica%20CONPES%203934/Resumen%20Pol%C3%ADtica%20de%20Crecimiento%20Verde%20-%20diagramaci%C3%B3n%20FINAL.pdf>
- Documento CONPES. (2020, marzo 31). Colombia potencia bioceánica sostenible 2030. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3990.pdf>
- Edson Baltazar. (n.d.). Generación de energía eléctrica directa a partir de aguas residuales provenientes de granjas porcinas por la tecnología emergente de celdas de combustible

- microbianas de una sola cámara. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Retrieved 2024, from <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/08/22-energias-renovables.pdf>
- Elespectador. (2024, mayo 18). Detrás de la minería artesanal en Chocó. <https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/detras-de-la-mineria-artesanal-en-choco/>
- En 2024, la demanda de energía en Colombia aumentó 2.3% en comparación con el año anterior. (2025, enero 22). XM. Retrieved febrero 13, 2025, from <https://www.xm.com.co/noticias/7504-en-2024-la-demanda-de-energia-en-colombia-aumento-23-en-comparacion-con-el-ano>
- Enel. (2025). Tarifa de energía regulada por la CREG. [https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp/C3%B1ol/personas/1-17-1/2025/Pliego%20Tarifario%20Enel%20ENERO\\_2025\\_15%2021,5x30%20\(1\).pdf](https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp/C3%B1ol/personas/1-17-1/2025/Pliego%20Tarifario%20Enel%20ENERO_2025_15%2021,5x30%20(1).pdf)
- Global Forest Watch. (2023). Pérdida del bosque primario en Mitú, Vaupés, Colombia. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/COL/31/2>
- IPSE. (2023). Caracterización energética de las ZNI. <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>
- IPSE. (2024, abril). Boletín Datos IPSE. <https://ipse.gov.co/wp-content/uploads/2024/04/Boletin-Datos-IPSE-Abril-2024.pdf>
- Jolly Grow. (2025, julio 24). Mercado de pilas de combustible microbianas: Italia | Malasia | Sudáfrica | Argentina | Países Bajos | Arabia Saudí | Brasil | España | México. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/microbial-fuel-cell-market-italy-malaysia-south-africa-argentina-05sef/>

- Khan Academy. (n.d.). Khan Academy. Retrieved diciembre 26, 2024, from <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/photorespiration--c3-c4-cam-plants/a/c3-c4-and-cam-plants-agriculture>
- Limbergen, T. V. (2022). Plant microbial fuel cells from the perspective of photovoltaics: Efficiency, power, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 169. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122008346>
- Maddalwar, S. (2021). Plant microbial fuel cell: Opportunities, challenges, and prospects. *Bioresource Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421011135>
- Manos Verdes. (2020, febrero 19). Biomasa en Colombia: oportunidad para generar energía sostenible. <https://www.manosverdes.co/biomasa-en-colombia-para-energia-sostenible/>
- Mendoza Yauri, E. M., & Valeriano Muñoz, D. E. (2020). Revisión sistemática: Clasificación de los sistemas de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.
- Minciencias. (2020). Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa. [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/bioeconomia\\_para\\_un\\_crecimiento\\_sostenible-qm\\_print.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/bioeconomia_para_un_crecimiento_sostenible-qm_print.pdf)
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2023, diciembre 13). Misión transición energética. [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo\\_10.\\_politica\\_nacional\\_de\\_ciencia\\_tecnologia\\_e\\_innovacion\\_piiom\\_para\\_la\\_mision\\_de\\_transicion\\_energetica.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_10._politica_nacional_de_ciencia_tecnologia_e_innovacion_piiom_para_la_mision_de_transicion_energetica.pdf)

- Ministerio de Comunicaciones. (2018, mayo). Plan nacional de tecnologías de la información y las comunicaciones. [https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-125156\\_recurso\\_00.pdf](https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-125156_recurso_00.pdf)
- Morales, A. (2020). Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos. Ciencia Unisalle. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1603&context=ing\\_electrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1603&context=ing_electrica)
- Nitorisravut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81-89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117303805>
- Plant-E. (n.d.). Fuente de alimentación para sensores inalámbricos. Retrieved 2024, from <https://plant-e.com/sensores/>
- Rodriguez Martinez, R. D. (2025, octubre 5). Plant-microbial fuel cell for electrical generation through living plants: An internal resistance insight into the plant species used. Oxford Academy. <https://academic.oup.com/ce/article/8/5/45/7697438>
- Saad Saleem. (2023, noviembre 6). Revisión de la celda de combustible microbiana desde una perspectiva tecnoeconómica. Sage Journal, 42. <https://journals-sagepub-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/doi/full/10.1177/01445987231208510>
- Santander Competitivo. (2020, septiembre 30). CONPES 4004 - Economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales. <https://santandercompetitivo.org/biblioteca-de-documentos/competitividad-en-colombia/conpes-4004-economia-circular-en-la-gestin-de-los-servicios-de-agua-potable-y-manejo-de-aguas-residua/>

- Shrirang Maddalwar, & Kush Kumar Nayak. (2021, diciembre). Celda de combustible microbiana vegetal: oportunidades, desafíos y perspectivas. *Tecnología de biorrecursos*, 341.
- Venkata Mohan, S. (2011). Generación de energía sostenible a partir de un microambiente ecológico basado en macrófitos flotantes mediante celdas de combustible integradas junto con el tratamiento simultáneo de aguas residuales. *Bioresource Technology*, 102, 7036-7042. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241100527X>
- Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119303223>