

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE
SUSTANCIAS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS DE COMBUSTIBLE**

Paola Roxanna Cruz Chivatá y Yaritza María Escruceria Quiñones

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 15 de mayo del 2019

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUSTANCIAS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

Paola Roxanna Cruz Chivatá y Yaritza María Escruceria Quiñones

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:
José Francisco Ibla Gordillo

Línea de Investigación:
Salud ambiental - Gestión ambiental

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1066

El día **13 MAYO 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUSTANCIAS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS DE COMBUSTIBLE**, escrito por **PAOLA ROXANNA CRUZ CHIVATÁ, CÉDULA 1032481628** y **YARITZA MARIA ESCRUCERIA QUIÑONES, CÉDULA 1020799261**, bajo la dirección de **JOSE FRANCISCO IBLA GORDILLO, CÉDULA 80241303**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **LILIAM TERESITA MANRIQUE DELGADO CÉDULA 1.026.256.011** y **OSCAR EDUARDO RODRIGUEZ AGUIRRE CÉDULA 19473917**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad.

Por lo tanto, el trabajo es: **Aprobado**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C. **13 MAYO 2019**


KENNETH OCHOA VARGAS
Director
Programa de Ingeniería Ambiental




GERMÁN AGUDELO ASCENCIO
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería



Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

William Cruz Pinilla, Q.E.P.D, dedico de manera especial a mi padre, por su esfuerzo, apoyo y dedicación en mi proceso de formación como persona y profesional. Javier Huertas Martínez, por su motivación, confianza y apoyo incondicional.

A mis padres Jairo Escruceria y Rosario Quiñones, por su amor, apoyo y dedicación. Por ser los pilares en mi formación como una persona respetuosa y capaz de lograr lo que se proponga. A mis hermanos Dayana Escruceria y Jairo Escruceria, por siempre estar en los momentos que más los necesitaba, por su cariño y amor que siempre me brindan. Elkin Andrés Zuluaga, por su apoyo incondicional y la motivación a terminar este proyecto, por creer en mí y ayudarme cuando más lo necesitaba.

Agradecimientos

José Francisco Ibla, agradecemos a nuestro director, por su esfuerzo, dedicación y completo apoyo en el proceso de aprendizaje para la investigación y construcción del trabajo, con el fin de aportar en el campo de las energías renovables en el país.

Hommy Copete, gracias por la confianza que depositó en nosotras, por el profesionalismo que nos llevó a realizar con el presente documento propuestos en el proyecto de grado I, así como su forma de guiarnos y apoyarnos para desarrollar y poder seguir con este.

Universidad El Bosque, agradecemos a la universidad por las bases de información que nos brinda, por sus capacitaciones para la búsqueda, selección y aplicación de criterios, puesto que son de gran ayuda para optimizar el tiempo de consulta y promover el desarrollo académico y profesional de nuestro proyecto.

1. Tabla de Contenido

5. Resumen	4
6. Abstract	5
7. Introducción	6
8. Planteamiento del problema	8
9. Justificación	10
10. Objetivos general y específicos	11
11. Marco de referencia	12
Marco Teórico	18
Marco Normativo	20
Marco Institucional	24
12. Metodología	26
13. Plan de trabajo	29
14. Resultados	32
15. Análisis y discusión de resultados	55
16. Conclusiones	57
17. Recomendaciones	58
18. Referencias Bibliográficas	59

2. Listado de Tablas

Tabla 1 tipos de celdas de combustibles y características principales	15
Tabla 2 Fracción de hidrógeno y densidad energética de los combustibles	19
Tabla 3 Bases de datos de acuerdo al área de investigación	27
Tabla 4 Conectores utilizados en la revisión bibliográfica	28
Tabla 5 Thesaurus utilizados en la revisión bibliográfica	28
Tabla 6 Relación de objetivos, actividades y resultados de acuerdo al plan de trabajo	29
Tabla 7 Matriz de información – Año, fuente, bases de datos, objetivos y aportes a la revisión bibliográfica	33
Tabla 8 Clasificación de los documentos según los criterios	50
Tabla 9 Tipos de celdas de combustible, temperatura de operación y aplicación.	52
Tabla 10 Propiedades físicas y químicas de las sustancias alternativas aplicadas en celdas de combustible	52

3. Listado de Figuras

Figura 1 Árbol de problemas	9
Figura 2 Principio de operación de una celda de combustible	14
Figura 3 Marco institucional del sector energético en Colombia	25
Figura 4 Objetivos de la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía – CIURE	25
Figura 5 Entradas y salidas de una celda de combustible	50
Figura 6 Componentes de una celda de combustible	51

4. Listado Anexos

Anexo 1 Cronograma general del trabajo.....	66
Anexo 2 Diseño metodológico para la revisión y evaluación comparativa de las propiedades físicas y químicas de sustancias con potencial de aplicación en celdas de combustible.....	67

5. Resumen

Actualmente, el consumo energético mundial aumenta con mucha rapidez impulsado tanto por el crecimiento socioeconómico, el industrial y el crecimiento de la población, siendo la energía un elemento necesario para cualquier actividad, desde un servicio esencial en el hogar hasta para hacer posible el correcto funcionamiento de establecimientos médicos, empresariales y educativos. Siendo esta fuente tan necesaria para la vida, cerca de 1000 millones de personas, según informes del Banco Mundial, viven sin electricidad y cientos de millones no cuentan con suministros suficientes o confiables de esta. Sin embargo, están en proceso proyectos y se han visto notables avances en los mismos para la solución a este problema teniendo como principal objetivo los países en desarrollo, mediante transformación y energía renovable que además de tener unos bajos costos son fuentes modernas, seguras y eficientes, tales como las celdas de combustible. (BIRF, 2018) En este trabajo se presentan las propiedades físicas y químicas de diferentes sustancias, mediante una matriz, con el objetivo de establecer a través de una revisión bibliográfica los requerimientos funcionales de dichas sustancias como alternativa sostenible en celdas de combustible. En los últimos años, se ha generado la necesidad de buscar nuevas opciones para producir energía eléctrica, sin comprometer los recursos naturales disponibles en el planeta, es por ello por lo que en esta revisión se muestra a partir del funcionamiento de la celda de combustible, los tipos de celda y la variedad de sustancias que pueden ser utilizadas para transformar energía química en eléctrica. En la revisión bibliográfica, se investigó sobre la historia y el estado actual de las celdas de combustible, identificando las sustancias y los parámetros que condicionan su uso para realizar el proceso de óxido-reducción y generar energía eléctrica.

Palabras clave: Celda de combustible, transferencia iónica, hidrógeno, energía, electrólisis, oxidación y reducción.

6. Abstract

Currently, the world's energy consumption increases very fast, boost by socioeconomic growth, industry growth and population growth, with energy being a necessary element for any activity, from an essential service in the home to making possible the correct functioning of medical, business and educational establishments. Being this one the most needed source for life, close to 1 billion people is living without electricity and hundreds of millions do not have enough or reliable supplies of electricity, according to World Bank reports,. However, projects are underway and notable progress has been made in solving the problem with the main objective of developing countries, through transformation and the renewable energy that, in addition to having low costs, are modern, safe and efficient sources, such as fuel cells. (BIRF, 2018). In this work, the physical and chemical properties and the different substances are presented, through a matrix, the objective of establishing a bibliographic revision. In recent years, the need has arisen to look for new options to produce electricity, without compromising the natural resources available on the planet, which is why in this review it is shown in the operation of the fuel cell, the types of the cell and the variety of substances that can be used to transform chemical energy into electricity. In the present bibliographic review, the history and status of the fuel cells were researched, identifying the substances and the parameters that condition their use to carry out the oxide-reduction process and generate electrical energy.

Keywords: Fuel cell, ionic transfer, hydrogen, energy, electrolysis, oxidation and reduction.

7. Introducción

Entendemos por celda de combustible “Dispositivo que convierte continuamente la energía química en energía eléctrica mediante un proceso modificado de oxidación. El proceso también produce desprendimiento de calor, agua, y dióxido de carbón dependiendo de combustible utilizado. Subproductos perjudiciales como óxidos nitrosos se mantienen a un mínimo a causas de las bajas temperaturas de reacción. Las celdas de combustible pueden, teóricamente, crear electricidad a mayores eficiencias que los sistemas mecánicos ya que aquellos no tienen movimiento de partes y no están limitadas por el ciclo de Carnot. (Vargas et all, 2000, p. 39).

El presente trabajo pretende establecer mediante una revisión bibliográfica los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de diferentes sustancias como alternativa sostenible en celdas de combustible. Por lo dicho anteriormente, se identificaron los criterios de funcionalidad, los diferentes tipos, sus posibles aplicaciones y los beneficios de la implementación de esta tecnología.

La aplicación de tecnologías innovadoras tiene un papel importante cuando se habla de energías no convencionales como lo son las celdas de combustible que generan energía eléctrica a partir de la extracción del hidrógeno, las cuales están basadas en modelos teóricos de las ciencias básicas, como la física y la química. Vargas (2000) afirma. “Esto ha permitido implementar un modelo prototipo de un sistema de generación de energía eléctrica, que garantiza un suministro de energía constante, sin producir elementos contaminantes y gastos adicionales por costo de mantenimiento; el cual a largo plazo y logrando nuevos desarrollos puede entregar energía a un menor costo por kilovatio, con un aprovechamiento de una fuente permanente de energía como la luz solar”.

Las ventajas y desventajas del hidrógeno derivan de sus propiedades físicas y químicas básicas. La molécula del hidrógeno es la más ligera, la menor y está entre las moléculas más simples, además, es relativamente estable el hidrógeno tiene más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible, esto es, almacena 3 veces más energía También permite la combustión a altas relaciones de compresión y altas eficiencias en máquinas de combustión interna (Vargas et all, 2000, p. 25).

Los procesos de producción de hidrógeno que se emplean en la actualidad están caracterizados por la ineficiencia y los altos costos, por lo que la utilización de este vector energético está limitada a muy pocas aplicaciones. Las investigaciones en este tema están dedicadas a procesos que ofrecen ventajas considerables en términos de eficiencia. Entre los más estudiados se encuentran los procesos electroquímicos, específicamente el iodo-azufre y el cloro-cobre, y la electrólisis del agua a alta temperatura o electrólisis de vapor. Este proceso de separación directa de la molécula de agua tiene lugar en celdas electrolíticas de óxido sólido (SOEC, por sus siglas en inglés) que requieren temperaturas de operación superior a 850 K y se distinguen por su alta eficiencia. La principal ventaja de la electrólisis de vapor con respecto a la electrólisis del agua es que, a alta temperatura, aunque se consume energía en forma de calor, se requiere una menor cantidad de potencia eléctrica, logrando un incremento de la eficiencia. (De la Torre Valdés, 2016, p. 230).

Existen celdas de temperatura baja, media y alta. Las que mayores ventajas ofrecen en cuanto a la eficiencia del proceso de generación de electricidad son las de baja temperatura, que se plantean principalmente para su utilización en el sector del transporte, y las de alta temperatura en aplicaciones

estacionarias. Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés) son las que operan a mayores valores de los parámetros termodinámicos y ofrecen ventajas con respecto a otros tipos de celdas por la posibilidad de emplear hidrocarburos ligeros como combustible y alcanzar eficiencias que pueden superar el 70% en sistemas híbridos con cogeneración de calor (De la Torre Valdés, 2016, p. 230).

8. Planteamiento del problema

“El desarrollo de la sociedad humana se ha basado en el aprovechamiento de fuentes energéticas primarias de tipo fósil. Producto de su uso indiscriminado se ha generado un deterioro ambiental global que puede llegar a niveles insoportables si no se toman correctivos oportunos.” (Posso, F, 2002).

Uno de los objetivos de desarrollo sostenible plantea el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, ya que el crecimiento de la sociedad ha aumentado la demanda energética, en cifras el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, nos indica que, el 13% de la población mundial aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad, 3.000 millones de personas dependen de la madera, el carbón, el carbón vegetal o los desechos de origen animal para cocinar y calentar la comida, la energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático y representa alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire en locales cerrados debido al uso de combustibles para la energía doméstica causó 4,3 millones de muertes en 2012, 6 de cada 10 de estas fueron mujeres y niñas, en 2015 y el 17,5% del consumo final de energía es de energías renovables (ODS, 2015).

La complejidad de los mercados internacionales de energía y los muchos problemas relacionados con la energía, incluido el cambio climático y las emisiones de dióxido de carbono de la combustión se basan en los balances energéticos de la IEA causadas principalmente por la combustión del carbón, aceite y gas natural (IEA, 2018).

La energía alternativa es un término global que comprende todas aquellas energías de origen no fósil y que no han participado significativamente en el mercado mundial de la energía (Posso, F, 2002), tal como las celdas de combustible, siendo dispositivos electroquímicos que poseen electrodos positivos y negativos y un electrolito, que, a diferencia de otras fuentes de energía, tienen la capacidad de producir energía eléctrica ilimitadamente mientras se abastezca de combustible. Los combustibles más utilizados en las celdas de combustible son el hidrógeno, el gas natural, hidrocarburos ligeros, entre otros; sin embargo, el hidrógeno es el elemento con mayor contenido de energía por unidad de peso y en caso de accidente se dispersa rápidamente (Acuña, 2001)

La investigación sobre las celdas de combustible y las sustancias alternativas con potencial de aplicación surge de la carencia de información técnico científica que existe en la actualidad sobre el diseño, construcción e implementación de las celdas de combustible y el empleo de nuevas sustancias para su uso, dentro de las desventajas que presenta ésta nueva tecnología es que cuenta con factores que alteran la eficiencia de la celda, tales como, el área de la superficie de interface en los electrodos, la concentración del producto, la difusión de especies químicas en la superficie del electrodo, impedancias eléctricas en la celda de combustible, reacciones adicionales y misceláneos que resultan de la filtración. Por otro lado, es una tecnología que se encuentra en desarrollo, incrementando los costos de producción y de su utilización (Acuña Garrido, 2011).

Actualmente de acuerdo a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico -OCDE Colombia busca el uso eficiente de los recursos para la generación de energía, manejo adecuado sobre los recursos naturales, para así mejorar la calidad de vida de sus habitantes, afirman que el consumo de energía ha aumentado en todos los sectores productivos del país, sin embargo, las fuentes de energía renovables representaron el 25% de la oferta total de energía primaria en 2011 (OCDE, 2014).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS ha identificado algunas prioridades de eco innovación, que comprenden la utilización sostenible de la biodiversidad y la implementación de fuentes de energía alternativas, para generar estrategias que lleven a la eficiencia energética en el país, disminuyendo los impactos ambientales que acarrea la explotación de los recursos naturales (MADS, 2012).

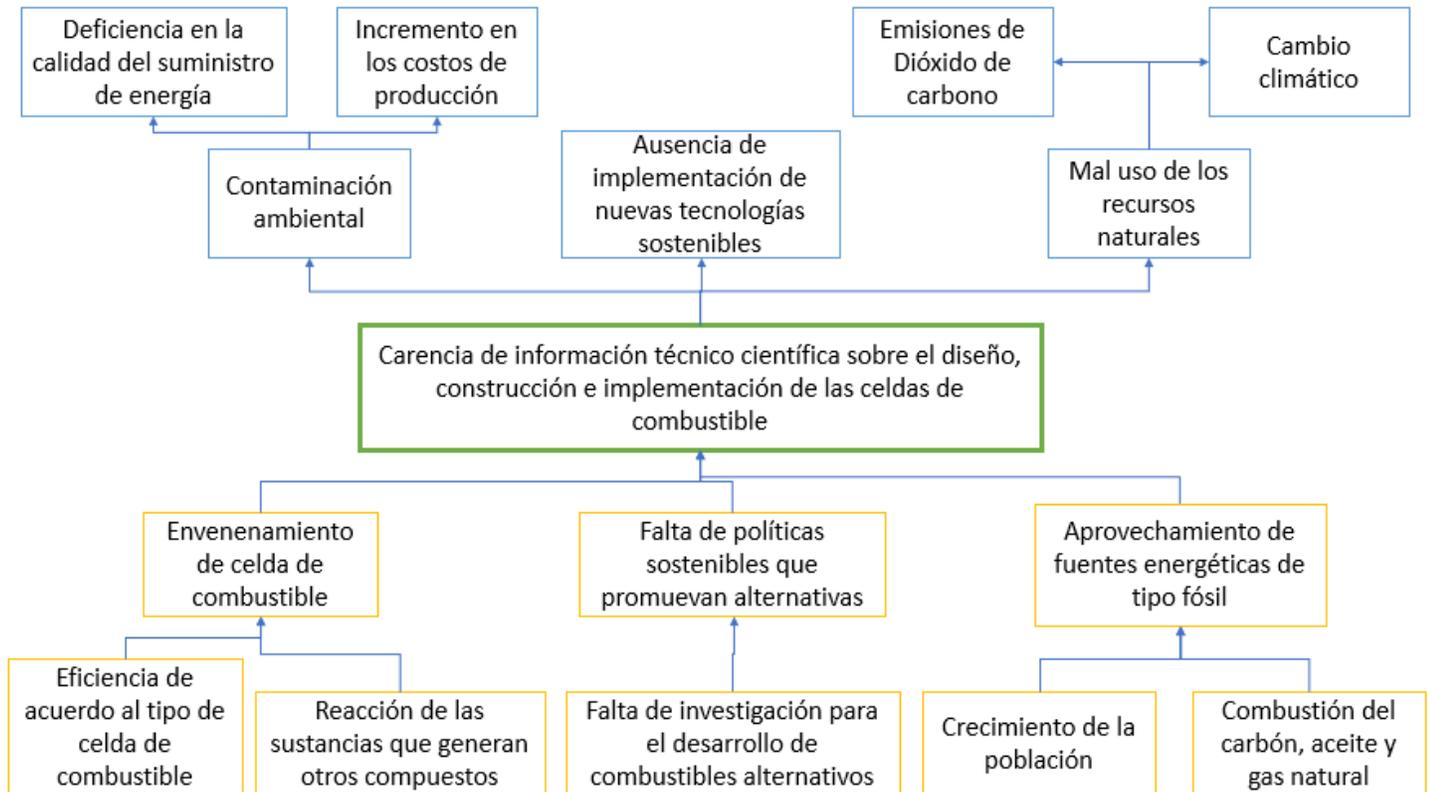


Figura 1 Árbol de problemas

Fuente: Autores

9. Justificación

Las energías renovables se plantean como la solución a la crisis medioambiental generada por el consumo excesivo de combustibles fósiles. Dentro de las alternativas existentes para reducir el impacto de las actividades del ser humano sobre el medio ambiente, se destacan las celdas de combustible (Hooshyari et al., 2014; Franco et al., 2010), además que presentan alta eficiencia, operan silenciosamente y son amigables con el medio ambiente (Lim et al., 2014) a diferencia de otras fuentes de energía eléctrica.

Por lo dicho anteriormente, la finalidad de este proyecto que consiste en analizar mediante una revisión bibliográfica las propiedades químicas y físicas de diferentes sustancias como alternativas en la aplicación de celdas de combustible es aportar al campo de las energías renovables y de igual manera generar interés sobre la importancia de los recursos naturales en nuestro entorno. Se pretende correlacionar los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de una sustancia como alternativa sostenible en celdas de combustible para la generación de energía eléctrica.

Las celdas de combustible tienen ventajas sobre la producción combinada de potencia y calor para aplicaciones residenciales, industriales y comerciales a gran escala. También como baterías portátiles y sensores. Por otro lado, el hidrógeno se presenta actualmente como una alternativa en el campo de la energía y gracias a sus ventajas a nivel ambiental, puede llegar a sustituir gran parte de los combustibles convencionales solucionando los problemas medioambientales que presenta el uso indiscriminado de los combustibles fósiles como lo es el calentamiento global.

El uso de los combustibles ha sido muy diverso, desde la madera y el carbón, hasta el petróleo y el gas natural, debido a ésto, las sociedades del siglo XX son llamadas correctamente “sociedades de hidrocarburos” utilizando diez veces más energía que en el siglo XIX (Dunn, 2002). Los combustibles fósiles además de ser no renovables generan durante su combustión gases nocivos para el ambiente y la salud humana, como son NO_x, SO_x y CO_x, por mencionar algunos (Das y Vezirolu, 2001; Yue et al., 2001). Si su uso continuo aumenta, los problemas de contaminación del aire en las grandes ciudades lo harán también, es por esto que se realiza una revisión bibliográfica, valorando la información referente a las energías no convencionales como lo son las celdas de combustible.

La contribución en la consolidación de la información para el diseño y manejo de la celda de combustible es relevante en dos sentidos, primero, invita a proponer nuevos diseños y alternativas de aplicación en celdas de combustible, asimismo, busca facilitar la implementación de nuevas tecnologías que disminuyan los impactos ambientales. El trabajo se realiza mediante una revisión bibliográfica y el levantamiento de información técnica del funcionamiento de las celdas, lo cual permite proponer nuevas sustancias para diseños de celdas de combustible que puedan ser implementadas con mayor facilidad, por ejemplo disminuyendo el costo del hidrógeno, y promoviendo nuevas sustancias que optimicen el funcionamiento de la celda.

10. Objetivos general y específicos

General:

Establecer a través de una revisión bibliográfica los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de una sustancia como alternativa sostenible en celdas de combustible.

Específicos:

- Realizar una matriz de información a partir de una revisión bibliográfica sobre las propiedades químicas y físicas de diferentes sustancias como alternativa en celdas de combustible.
- Correlacionar las propiedades físicas y químicas de las sustancias con los requerimientos de funcionalidad de las celdas de combustible con posible aplicación.

11. Marco de referencia

Antecedentes

En 1987 James Jansen, un científico de la NASA, quien expuso que el aumento de la concentración de dióxido de carbono y de otros gases en la atmósfera podría provocar un calentamiento superficial de la tierra, recogiendo la idea ya propuesta por Arrhenius a finales del siglo XIX. En este mismo año las Naciones Unidas creó el Comité Intergubernamental sobre el Cambio Climático promovido, con el fin de monitorear el aumento de la temperatura a través de los años. (Sapiña, 2006)

En el 2000, un artículo sobre la infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible definen los componentes básicos de una celda de combustible tipo PEM pueden ser resumidos como: dos electrodos impregnados con electro catalizador (típicamente platino), la membrana conductora de protones y finalmente las placas colectoras de corriente. (Cano, 2000)

En 2001 Francisco Acuña Garrido publicó un artículo sobre la utilización en un futuro próximo de las celdas de combustible como fuente de generación de potencia, así como su eficiencia, rendimiento y forma de operación. (Acuña, 2001)

En el 2004 un estudio comparativo sobre la reducción electrocatalítica de oxígeno y su desempeño en una celda de combustible con membrana polimérica la reacción global en una celda de combustible con membrana de intercambio protónico está controlada por la reacción catódica, por ser ésta cercana a cinco órdenes de magnitud más lenta que la reacción anódica, entre otras razones. La electrocatálisis de la reacción de reducción de oxígeno es de interés práctico y teórico. Los electrodos con materiales manométricos han mostrado un alto desempeño para la reducción de oxígeno. (González, Leyva, & Solorza, 2004).

En 2005 un estudio sobre construcción y evaluación de una celda de combustible de intercambio protónico Se propone un diseño de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) alimentada con hidrógeno. Los electrodos porosos de platino soportados en carbón activado fueron fabricados por los métodos de impregnación, reducción y prensado en caliente; obteniéndose electrodos. (Gutiérrez, 2005)

Los combustibles fósiles generan problemas políticos y económicos que tienen que ver con la concentración de las reservas de estos y la distribución de la energía, por ejemplo, el petróleo se produce en ciertos países, esto ha generado una serie de crisis, tales como Suez (1956), crisis del petróleo (1973), guerra del Golfo (1991) y la guerra de Irak (2004). (Sapiña, 2006)

El calentamiento global es generado en su mayoría por el uso de combustibles fósiles, y esta actividad humana es la que más dióxido de carbono produce, siendo este el gas de efecto invernadero con mayor presencia en la atmósfera. (Sapiña, 2006)

La primera demostración de una celda de combustible fue por el abogado y científico William Grove en 1839, en la que a partir de una reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno se obtuvo electricidad y las celdas de combustible podrían beneficiar y disminuir la contaminación del aire. (Rozo & Tibaquirá, 2007)

En 2007 mediante un estudio de la celda de combustible de hidrógeno se observa que el flujo no tiene una velocidad homogénea a lo largo de todo el recorrido del canal de la celda. En diferentes puntos el flujo se acelera hasta prácticamente duplicar su velocidad. Esta situación puede provocar pérdida del rendimiento de la celda, por lo que se hace necesaria una modificación del modelo geométrico. (Pérez Manso, 2007)

En 2013 se realizó optimización de una celda combustible de hidrógeno mediante un estudio realizado a una celda combustible de hidrógeno se pudo comparar su funcionamiento con la membrana y sin ella, bajo diferentes condiciones de operación. Estas condiciones permitieron analizar el avance de la reacción con el tiempo del Grado de Conversión, el Rendimiento Eléctrico, la productividad específica, y el Consumo Energético Específico. (Montoya García & Reyes Pineda, 2013)

La Universidad Nacional de La Plata arroja que las celdas de combustibles de tecnología PEM se encuentran dentro de los recursos tecnológicos cuyo desarrollo impulsará la transición hacia una economía del hidrógeno. Las celdas de combustible de tecnología PEM son dispositivos que convierten, a través de procesos electroquímicos, la energía química del hidrógeno directamente en energía eléctrica y térmica. Estos dispositivos trabajan a bajas temperaturas de operación, con un tiempo rápido de arranque y con una alta densidad de potencia y alta eficiencia de conversión. (Montoya García & Reyes Pineda, 2013)

En 2015 un estudio sobre las celdas de combustible microbianas muestra que son uno de los medios con los que en la actualidad se está intentando reemplazar los métodos contaminantes de obtención de energía. Estas “bio-baterías” utilizan biomasa para obtener energía mediante el metabolismo de los microorganismos que hay en ellas. Al mismo tiempo que se obtiene energía. (Zaderenko, Anta, Merklings, & Calero, 2015).

En 2016 un artículo sobre celdas de combustible muestra un modelo que está conformado por dos partes: la primera parte lo conforma un modelo termodinámico, este modelo es empleado para representar la dinámica de la temperatura de la celda de combustible y la segunda parte corresponde al modelo eléctrico que describe la dinámica del comportamiento del voltaje de la celda. Debido a la naturaleza de la dinámica que presenta la celda de combustible, se plantea en este trabajo el empleo de sistemas lineales por pedazos. (Kunusch & Puleston, 2016)

Marco Conceptual

- **Celda de Combustible**

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química en combustibles y en energía eléctrica directamente, prometiendo generación de energía con alta eficiencia y bajo impacto ambiental. Debido a que se evitan los pasos intermedios de producción de calor y el trabajo mecánico típico de la mayoría de los métodos convencionales de generación de energía, las celdas de combustible no están limitadas por la termodinámica. Además, debido a que se evita la combustión, las celdas de combustible producen energía con un mínimo de contaminantes. Sin embargo, a diferencia de las baterías, el reductor y el oxidante en las celdas de combustible deben reponerse continuamente para permitir un funcionamiento continuo. Las pilas de combustible tienen un parecido significativo con los electrolizadores. De hecho, algunas celdas de combustible funcionan a la inversa como

electrolizadores, lo que produce una celda de combustible reversible que se puede usar para almacenar energía.

Aunque las celdas de combustible podrían, en principio, procesar una amplia variedad de combustibles y oxidantes, lo que más interesa hoy en día son las celdas de combustible que usan combustibles comunes (o sus derivados) o hidrógeno como reductor, y aire ambiente como oxidante. La mayoría de los sistemas de energía de celdas de combustible comprende varios componentes:

- Células unitarias, en las que se producen las reacciones electroquímicas.
- Pilas, en las cuales las celdas individuales se combinan modularmente conectando eléctricamente las celdas para formar unidades con la capacidad de salida deseada.
- Equilibrio de la planta que comprende componentes que proporcionan acondicionamiento de la corriente de alimentación (incluido un procesador de combustible si es necesario), gestión térmica y acondicionamiento de la energía eléctrica, entre otras funciones auxiliares y de interfaz.

Las celdas unitarias forman el núcleo de una celda de combustible. Estos dispositivos convierten la energía química contenida en un combustible electroquímicamente en energía eléctrica. La estructura física básica, o bloque de construcción, de una celda de combustible consiste en una capa de electrolito en contacto con un ánodo y un cátodo en cada lado.

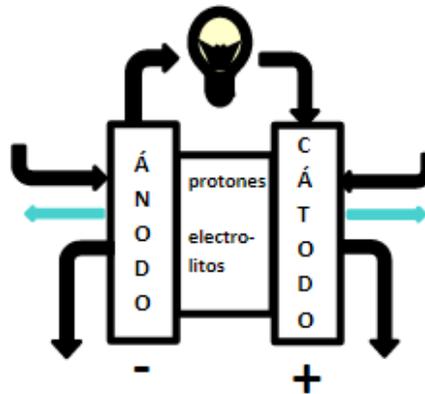


Figura 2 Principio de operación de una celda de combustible
Fuente: Adaptado de (Larminie & Dicks, 2003) autores

En una celda de combustible típica, el combustible se alimenta continuamente al ánodo (electrodo negativo) y un oxidante (a menudo oxígeno del aire) se alimenta continuamente al cátodo (electrodo positivo). Las reacciones electroquímicas tienen lugar en los electrodos para producir una corriente eléctrica a través del electrolito, mientras se conduce una corriente eléctrica complementaria que realiza el trabajo en la carga. Aunque una pila de combustible es similar a una batería típica en muchos aspectos.

Para la mayoría de las aplicaciones prácticas de celdas de combustible, las celdas unitarias deben combinarse de manera modular en un pila de celdas para lograr el voltaje y el nivel de salida de potencia requeridos para la aplicación. En general, el apilamiento implica la conexión de varias celdas unitarias en serie a través de interconexiones eléctricamente conductoras. (EG&G Technical Services, Inc., 2004)

- **Tipos de Celda de Combustible**

Los diferentes tipos de celdas de combustible generalmente se distinguen por el electrolito que se usa, aunque hay otras diferencias importantes también. Estas celdas funcionan a temperaturas bastante bajas, por lo que el problema de las velocidades de reacción lentas se aborda mediante el uso de sofisticados catalizadores y electrodos. (Larminie & Dicks, 2003)

Tabla 1 Tipos de celdas de combustibles y características principales

Tipos de celdas de combustibles	Ion movil	Temperatura de funcionamiento	Aplicaciones y notas
Alcalino (AFC)	OH ⁻	50–200 °C	Se utiliza en vehículos espaciales, por ejemplo. Apolo, Lanzadera
Membrana de intercambio de protones (PEMFC)	H ⁺	30–100 °C	Vehículos, aplicaciones móviles y para sistemas de cogeneración de baja potencia
Metanol directo (DMFC)	H ⁺	20–90 °C	Adecuado para sistemas electrónicos portátiles de baja potencia, funcionando durante largos períodos de tiempo
Ácido fosfórico (PAFC)	H ⁺	~220 °C	Grandes cantidades de sistemas CHP de 200 kW en uso.
Carbonato fundido (MCFC)	$[\text{CO}]_{-3}^{(-2)}$	~650 °C	Adecuado para sistemas de cogeneración de media a gran escala, hasta capacidad de MW
Óxido sólido (SOFC)	O ⁽²⁻⁾	500–1000 °C	Adecuado para todos los tamaños de sistemas CHP, de 2 kW a multi-MW

Fuente: Larminie & Dicks, 2003

Celda de combustible de electrolito alcalino (AFC)

Las perspectivas para la AFC no son tan sombrías. Un número de empresas en los Estados Unidos, Canadá y Europa son todos productores de celdas y avanzan silenciosamente con la construcción de celdas de combustible la razón es que la AFC tiene una serie de claras y fundamentales ventajas sobre otros tipos de pilas de combustible. (Larminie & Dicks, 2003)

Celda de combustible de polímero sólido PEMFC

También llamada celda de combustible de polímero sólido (SPFC), fue desarrollado por primera vez por General Electric en los Estados Unidos en la década de 1960 para su uso por la NASA en sus primeros vehículos espaciales tripulados. El ión móvil en los polímeros utilizados es un ion H^+ o protón, por lo que la operación básica de la celda es esencialmente la misma que para la celda de combustible de electrolito ácido, los electrolitos poliméricos funcionan a bajas temperaturas, lo cual tiene la ventaja de que PEMFC puede comenzar rápidamente. La delgadez de los MEA (Ensamble de electrodo de membrana) significa que se pueden hacer celdas de combustible compactas. Otras ventajas son que no hay riesgos de fluidos corrosivos y que la celda puede funcionar en cualquier orientación. Esto significa que el PEMFC es particularmente adecuado para su uso en vehículos y en aplicaciones portátiles.

Las primeras versiones de la PEMFC, tal como se utilizaron en la nave espacial Gemini de la NASA, tuvieron una vida útil de sólo unas 500 h, pero eso fue suficiente para esas primeras misiones limitadas. El programa de desarrollo continuó con la incorporación de una nueva membrana de polímero en 1967 llamada Nafion, una marca registrada de Dupont. Este tipo de membrana, que se describe en la Sección 4.2, se convirtió en estándar para el PEMFC, como lo es hoy en día. (Larminie & Dicks, 2003)

Pila de combustible de metanol directo DMFC

El problema más apremiante asociado con la DMFC es que las reacciones del ánodo del combustible avanzan mucho más lentamente que con el hidrógeno. La oxidación del hidrógeno se produce fácilmente: la oxidación del metanol es una reacción mucho más compleja y se desarrolla mucho más lentamente. Esto resulta en una celda de combustible que tiene una potencia mucho menor para un tamaño dado. (Larminie & Dicks, 2003)

Celda de combustible de ácido fosfórico PAFC

Fue la primera en producirse en cantidades comerciales y goza de un uso terrestre generalizado. Muchos sistemas de 200 kW, fabricados por la Corporación Internacional de Celdas de Combustible (ahora comercializados como UTC Fuel Cells Inc.), se instalan en los Estados Unidos y Europa, así como sistemas producidos por compañías japonesas. Se utilizan electrodos porosos, catalizadores de platino y una temperatura bastante alta para aumentar la velocidad de reacción a un nivel razonable. El problema del abastecimiento de combustible con hidrógeno se resuelve al "reformar" el gas natural (predominantemente metano) al hidrógeno y al dióxido de carbono, pero el equipo necesario para hacer esto aumenta considerablemente costoso, la complejidad y el tamaño del sistema de celdas de

combustible. Sin embargo, los sistemas PAFC utilizan la simplicidad inherente de una celda de combustible para proporcionar un sistema de energía extraordinariamente confiable y libre de mantenimiento. Varios sistemas PAFC se han ejecutado de forma continua durante períodos de un año o más, con poca mantenimiento que requiera parada o intervención humana. (Larminie & Dicks, 2003)

Celda de combustible de carbonato fundido MCFC

Tiene un historial que se remonta al menos hasta la década de 1920.1 Funciona a temperaturas de alrededor de 650°C. Los principales problemas con este tipo de células se relacionan con la degradación de los componentes celulares durante largos períodos. Sin embargo, el MCFC muestra una gran promesa de uso en los sistemas de CHP (Calor y potencia combinados). (Larminie & Dicks, 2003)

Celdas de combustible de óxido sólido SOFC

Ha sido objeto de investigación durante muchos años. Su desarrollo se remonta al 'Glowler' de Nernst de 1899. Dado que la SOFC es un dispositivo de estado sólido, tiene muchas ventajas desde el punto de vista de la simplicidad mecánica. La SOFC también es muy flexible en la forma en que se puede hacer y en su posible tamaño. Por lo tanto, tiene margen para una amplia variedad de aplicaciones. Las SOFC pueden fabricarse a partir de una gama de diferentes materiales, con diferentes temperaturas de funcionamiento, desde aproximadamente 650 a 1000 ° C.

Antes de considerar los detalles de los tipos diferentes de celdas de combustible de temperatura baja, media y alta, debemos considerar las características principales que son comunes en todas las celdas. Las principales ventajas están relacionadas con lo que se podría hacer con el calor residual. Se puede utilizar para reformar los combustibles, proporcionar calor y accionar los motores. Esto significa que PAFC, MCFC y SOFC nunca pueden considerarse simplemente como celdas de combustible, pero siempre deben considerarse como parte integral de un sistema completo de procesamiento de combustible y generación de calor. Los problemas más amplios del sistema son en gran parte lo mismo para los tres tipos de celdas de combustible. Las características comunes se consideran en cuatro títulos como se describe a continuación. (Larminie & Dicks, 2003)

Marco Teórico

Las celdas de combustible son aparatos electro químicos análogos a las baterías convencionales: ambos poseen electrodos positivos y negativos y un electrolito. Sin embargo, a diferencia de las baterías, que pueden suministrar potencia sólo por un tiempo definido, luego del cual hay que recargarlas o reemplazarlas, las celdas de combustible gracias a que absorben nuevos suministros de combustible permanentemente pueden operar continuamente, es decir, produce electricidad mientras esté siendo alimentada con combustibles y oxidante. (Acuña, 2001), es decir que convierte la energía química de los reactivos (combustible y oxidante) directamente en energía eléctrica a bajo voltaje, la eficiencia de una celda de combustible depende de la cantidad de energía extraída de ella.

Las celdas de combustible también son dispositivos complejos que ofrecen grandes ventajas sobre la manera convencional en la que se produce la energía eléctrica. Muchas de estas ventajas giran alrededor del impacto medioambiental y en particular de la eficiencia energética. Sin embargo, el progreso en el campo de estos dispositivos que funcionan a temperaturas elevadas requiere la continua búsqueda de nuevos materiales con avanzadas propiedades, optimización en su fabricación, tecnologías de vanguardia para el procesamiento de sus principales componentes (ánodo-electrolito-cátodo-sellos) y bajos costos de fabricación. (Alvarado, 2016).

Generalmente las celdas de combustible funcionan con el hidrógeno actuando como combustible, ya que este es el elemento más sencillo y abundante del universo, está conformado por un protón y un electrón, a continuación, se muestran las fracciones de hidrógeno que contienen diferentes tipos de combustible:

Tabla 2 Fracción de hidrógeno y densidad energética de los combustibles

Combustible	Fracción de hidrógeno	Estado físico	Densidad energética (MJ/kg)
Hidrógeno	1	Gas	120
Metano	0.25	Gas	50 (43x43)
Etano	0.2	Gas	47.5
Propano	0.18	Gas (líquido)	46.4
Gasolina	0.16	Líquido	44.4
Etanol	0.13	Líquido	26.8
Metanol	0.12	Líquido	19.9

Fuente (Linares & Moratilla, 2017), adaptado por Autores

Hoy en día, entre las celdas de combustible que están disponibles en el mercado, las de óxidos sólidos representan una de las tecnologías más prometedoras para la producción de energía limpia a partir de hidrógeno, biomasa y/o biorrefinerías (Bennettz, (2002), los avances en el desarrollo de las celdas de combustible dependen principalmente del tipo y de la estructura de los materiales que la conforman: ánodo (oxidación del combustible), electrolito (conducción iónica), cátodo (reducción de oxígeno), interconectores y sellos.

Una investigación de la Universidad de Bath, la Universidad Queen Mary y el Laboratorio de Robótica de Bristol muestra un el diseño de un nuevo tipo de pila de combustible microbiana que supera 2 (dos) limitaciones típicas de los procesos, el alto coste y la baja potencia de generación de energía. (Sabán, 2016).

En los sistemas de celdas de combustible se analiza el papel del hidrógeno y las pilas de combustible en las redes eléctricas extendidas que suministran energía a regiones o naciones y las aplicaciones para los diferentes sectores, los dispositivos de celdas de combustible pueden reemplazar los requisitos de calor que reemplazan a los sistemas actuales de gas natural u otros combustibles fósiles, con la ventaja adicional de generar energía y calor para la construcción y posiblemente exportar energía a la red general. Para los requisitos de energía portátil, el problema para introducir celdas de combustible es el almacenamiento de los combustibles necesarios. (Spazzafumo, 2018)

La sostenibilidad de un sistema puede representarse mediante una función no decreciente de evaluación de las salidas o productos del sistema analizado que son de interés. Se examinan distintas concepciones sobre el sistema de referencia, desde una antropocéntrica a ultranza hasta una extremadamente bio o ecocéntrica y se las relacionan con los criterios de sostenibilidad muy fuerte, fuerte, débil y muy débil. (Gallopín, 2003).

Las energías renovables proceden del sol, del viento, del agua de los ríos, del mar, del interior de la tierra, y de los residuos. Hoy por hoy, constituyen un complemento a las energías convencionales fósiles cuyo consumo actual, cada vez más elevado, está provocando el agotamiento de los recursos y graves problemas ambientales. (Solar, 2017).

Marco Normativo

Dentro del sistema jurídico colombiano no se evidencia la articulación entre energía, desarrollo y medio ambiente, lo cual, podemos aseverar, impide que exista un derecho ambiental-energético coherente con los fundamentos constitucionales del Estado colombiano.

La normatividad que señala las diferentes autoridades ambientales y energéticas en el campo de la regulación energética y su relación con la conservación ambiental y la sostenibilidad del sector energético son las siguientes:

1. Ministerio de Minas y Energía

- **Ley 1437 de 2011** “Por la cual se expide el Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo”.

Artículo 1º. *Finalidad de la parte primera.* Las normas de esta Parte Primera tienen como finalidad proteger y garantizar los derechos y libertades de las personas, la primacía de los intereses generales, la sujeción de las autoridades a la Constitución y demás preceptos del ordenamiento jurídico, el cumplimiento de los fines estatales, el funcionamiento eficiente y democrático de la administración, y la observancia de los deberes del Estado y de los particulares.

Artículo 2º. **Ámbito de aplicación.** Las normas de esta Parte Primera del Código se aplican a todos los organismos y entidades que conforman las ramas del poder público en sus distintos órdenes, sectores y niveles, a los órganos autónomos e independientes del Estado y a los particulares, cuando cumplan funciones administrativas. A todos ellos se les dará el nombre de autoridades.

- **Decreto 0381 del 16 de Febrero de 2012** “Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Minas y Energía”
- **Decreto 1617 de 2013** “Por la cual se expide el Régimen para los Distritos Especiales”.

2. Ministerio del Medio Ambiente

- **Ley 99 de 1993** “Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones”.

Artículo 4o. sistema nacional ambiental, SINA. El Sistema Nacional Ambiental SINA, es el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambientales contenidos en esta Ley. Estará integrado por los siguientes componentes:

- 1) Los principios y orientaciones generales contenidos en la Constitución Nacional, en esta Ley y en la normatividad ambiental que la desarrolle.
- 2) La normatividad específica actual que no se derogue por esta ley y la que se desarrolle en virtud de la Ley.
- 3) Las entidades del Estado responsables de la política y de la acción ambiental, señaladas en la Ley.
- 4) Las organizaciones comunitarias y no gubernamentales relacionadas con la problemática ambiental.
- 5) Las fuentes y recursos económicos para el manejo y la recuperación del medio ambiente.
- 6) Las entidades públicas, privadas o mixtas que realizan actividades de producción de información, investigación científica y desarrollo tecnológico en el campo ambiental.

El gobierno nacional reglamentará la organización y funcionamiento del Sistema Nacional Ambiental, SINA.

- **Ley 1259 de 2007** “Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Rotterdam para la Aplicación del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado previo a ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos, objeto de comercio internacional.”
- **Decreto 1076 de 2015** “Por medio del cual se expide el Decreto Único en ejercicio de las facultades que le confiere el numeral 11 del ARTÍCULO 189 de la Constitución Política”

ARTÍCULO 1.1.1.1.1 Objetivo. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible, sin perjuicio de las funciones asignadas a otros sectores.

El Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible formulará, junto con el Presidente la República la política nacional ambiental y de recursos naturales renovables, de manera que se garantice el derecho de todas las personas a gozar de un medio ambiente sano y se proteja el patrimonio natural y la soberanía de la Nación.

Corresponde al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible dirigir el Sistema Nacional Ambiental (SINA), organizado de conformidad con la Ley 99 de 1993, para asegurar la adopción y ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos respectivos, en orden a garantizar el cumplimiento de los deberes y derechos del Estado y de los particulares en relación con el ambiente y el patrimonio natural de la Nación.

3. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)

- **Ley 143 de 1994** “por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética”.
- **Decreto 1258 de 2013** “Por el cual se modifica la estructura de la Unidad de Planeación Minero Energética”.
- **Ley 1715 de 2014** “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”.

Artículo 12. Instrumentos para la promoción de las FNCE. Incentivo tributario IVA. Para fomentar el uso de la energía procedente de FNCE, los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la preinversión e inversión, para la producción y utilización de energía a partir de las fuentes no convencionales, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos estarán excluidos de IVA. Para tal efecto, el Ministerio de Medio Ambiente certifica los equipos y servicios excluidos del gravamen, con base en una lista expedida por la UPME.

Artículo 13. Instrumentos para la promoción de las energías renovables. Incentivo arancelario. Las personas naturales o jurídicas que a partir de la vigencia de la presente ley sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de FNCE gozarán de exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de preinversión y de inversión de proyectos con dichas fuentes. Este beneficio arancelario será aplicable y recaerá sobre maquinaria, equipos, materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de los mismos.

- **Resolución 0281 de 2015** “Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala”.
- **Resolución 143 de 2016** “Por la cual se modifica el artículo quinto y se adicionan artículos y anexos a la Resolución Upme 0520 de octubre 9 de 2007 por medio de la cual se establece el Registro de Proyectos de Generación y se toman otras disposiciones.”.
- **Resolución 045 de 2016** “Por la cual se establecen los procedimientos y requisitos para emitir la certificación y avalar los Proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía

(FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario de que tratan los artículos 12 y 13 de la Ley 1715 de 2014, y se toman otras determinaciones”.

- **Decreto 1543 de 2017** “Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, FENOGE, adicionando una Sección 5 al Capítulo 3 del Título 111 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía 1073 de 2015”.

4. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)

- **Ley 142 de 1994** “por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”.

ARTÍCULO 74. Funciones especiales de las comisiones de regulación. Con sujeción a lo dispuesto en esta Ley y las demás disposiciones que la complementen, serán, además, funciones y facultades especiales de cada una de las comisiones de regulación las siguientes:

- a) Regular el ejercicio de las actividades de los sectores de energía y gas combustible para asegurar la disponibilidad de una oferta energética eficiente, propiciar la competencia en el sector de minas y energía y proponer la adopción de las medidas necesarias para impedir abusos de posición dominante y buscar la liberación gradual de los mercados hacia la libre competencia. La comisión podrá adoptar reglas de comportamiento diferencial, según la posición de las empresas en el mercado.
- b) Expedir regulaciones específicas para la autogeneración y cogeneración de electricidad y el uso eficiente de energía y gas combustible por parte de los consumidores y establecer criterios para la fijación de compromisos de ventas garantizadas de energía y potencia entre las empresas eléctricas y entre éstas y los grandes usuarios;
- c) Establecer el reglamento de operación para realizar el planeamiento y la coordinación de la operación del sistema interconectado nacional y para regular el funcionamiento del mercado mayorista de energía y gas combustible;
- d) Fijar las tarifas de venta de electricidad y gas combustible; o delegar en las empresas distribuidoras, cuando sea conveniente dentro de los propósitos de esta Ley, bajo el régimen que ella disponga, la facultad de fijar estas tarifas.
- e) Definir las metodologías y regular las tarifas por los servicios de despacho y coordinación prestados por los centros regionales y por el centro nacional de despacho.

Marco Institucional

Las entidades gubernamentales, empresas y demás actores del sector energético en Colombia, deben facilitar la ejecución de determinadas políticas en el país, la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía - CIURE tiene las siguientes funciones para apoyar su uso racional y eficiente de la energía y promover el uso de energías alternativas:

1. “Coordinar las políticas del Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales de Energía que diseñen cada una de las entidades, en el ámbito de su competencia;
2. Impartir orientación superior a las entidades de la rama ejecutiva del poder público, que desarrollen funciones relacionadas con el Uso Racional y Eficiente de Energía y las Fuentes No Convencionales de Energía; Funciones CIURE.
3. Impulsar los programas y proyectos sobre Uso Racional y Eficiente de Energía, Cogeneración y Fuentes No Convencionales de Energía;
4. Impartir lineamientos específicos para el diseño, implementación y seguimiento del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE;
5. Efectuar el seguimiento de las metas, y variables energéticas y económicas que permitan medir el avance en la implementación del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE;
6. Coordinar la consecución de recursos nacionales o internacionales para desarrollar los programas y proyectos sobre Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales de Energía, así como definir las estrategias que permitan la identificación de nuevas fuentes y/o las estrategias que permitan la identificación de nuevas fuentes y/o la consolidación de las existentes; Funciones CIURE.
7. Estudiar, recomendar, hacer seguimiento y coordinar con las entidades competentes el otorgamiento de estímulos relacionados con el Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales de Energía;
8. Apoyar el desarrollo de programas de eficiencia energética para el transporte de pasajeros en los centros urbanos y para el transporte de carga.
9. Seleccionar a las personas naturales o jurídicas que deban ser galardonadas con la Orden al Mérito URE;
10. La Comisión Intersectorial, además asesorará al Gobierno para la toma de La Comisión Intersectorial, además asesorará al Gobierno para la toma de decisiones estratégicas en el contexto de los objetivos de la ley y en condiciones de crisis del sector energético.”

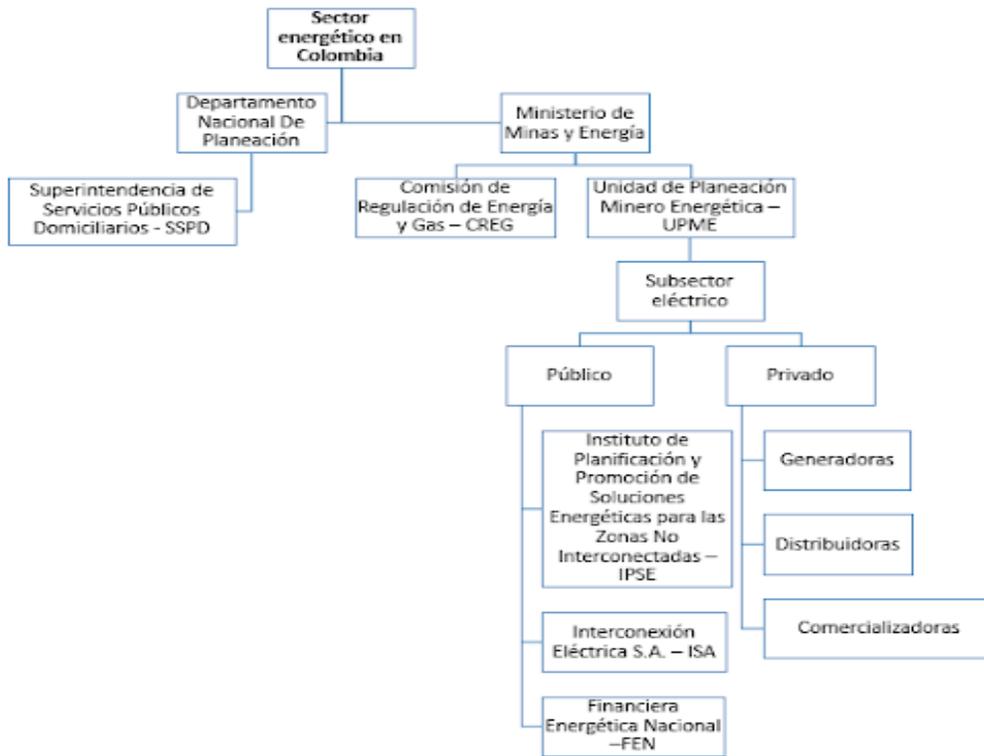


Figura 3 Marco institucional del sector energético en Colombia

Fuente: Autores

En la Figura 4, se muestran los objetivos de la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía – CIURE:

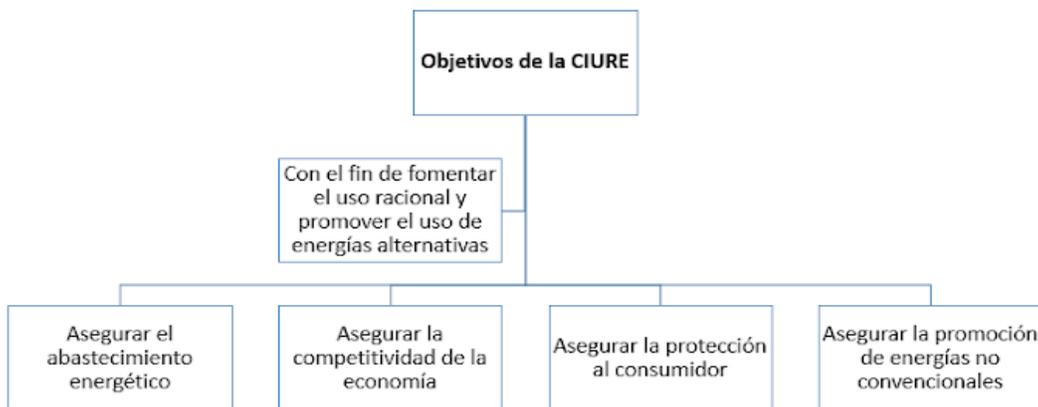


Figura 4 Objetivos de la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía – CIURE

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2017) adaptado por Autores

12. Metodología

El proyecto se desarrolla por medio del método científico, a través de cuatro pasos, primero la elección del tema, seguido por las limitaciones del mismo, ya que el tema de energías alternativas es amplio, después se plantea la problemática sobre las sustancias alternativas en celdas de combustible y posteriormente los objetivos, para así continuar con la revisión bibliográfica y obtener datos que aporten al núcleo temático de las energías no convencionales. El alcance de la investigación es descriptivo, ya que se busca especificar propiedades y características de las sustancias alternativas aplicadas en celdas de combustible. (Sampieri, 2014).

El enfoque de ésta investigación direcciona el proyecto para cumplir con los objetivos, comparando sus propiedades; El enfoque del proyecto es de tipo mixto ya que recopila información cualitativamente por medio del desarrollo de una idea - planteamiento del problema - Revisión de la información secundaria y desarrollo de marco teórico - visualización del alcance del estudio - desarrollo del diseño de la investigación - recolección de datos bibliográficos - síntesis de información, así como cuantitativamente planteando un problema de estudio delimitado y concreto - se investiga sobre el tema a tratar - revisión bibliográfica, “[...] para darle una visión más allá de la simple recopilación de información y de análisis bibliográfico, se pretende obtener una perspectiva más precisa acerca de la generación de energía a partir de una celda de combustible” (Sampieri 2014).

Una revisión bibliográfica tiene como objetivo realizar una revisión documental. Según Valencia, (s.f.) “La revisión documental permite identificar las investigaciones elaboradas con anterioridad, las autorías y sus discusiones; delinear el objeto de estudio; construir premisas de partida; consolidar autores para elaborar una base teórica; hacer relaciones entre trabajos; rastrear preguntas y objetivos de investigación; observar las estéticas de los procedimientos (metodologías de abordaje); establecer semejanzas y diferencias entre los trabajos y las ideas del investigador; categorizar experiencias; distinguir los elementos más abordados con sus esquemas observacionales; y precisar ámbitos no explorados”.

Mediante una revisión bibliográfica se pretende establecer los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de diferentes sustancias como alternativa sostenible en celdas de combustible. El primer paso fue indagar en las diferentes bases de datos ofrecidas por la Universidad El Bosque y las de libre acceso, aplicando los criterios de investigación previamente establecidos como el año, el idioma y sus áreas de aplicación. Los thesaurus son una herramienta de investigación la cual nos ayuda a buscar información relevante y palabras clave para el tema investigación, de igual manera, se usaron conectores como Or, and y not para así poder investigar de una manera más selectiva los documentos (artículos científicos, libros, revistas científicas, trabajos de grado, patentes entre otros) a estudiar y así poder analizar y sintetizar su información como se observa en el anexo 2.

De acuerdo con lo anterior, se realizó una tabla por cada uno de los criterios seleccionados, facilitando la revisión bibliográfica e identificando el núcleo temático de cada documento. El primer paso fue seleccionar las bases de datos que hacen referencia al tema de la investigación (Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas) como se muestra en la Tabla 3 de igual manera se establecieron los conectores para poder añadir o excluir la información deseada, como se muestra en la Tabla 4. Por último, se seleccionaron los thesaurus relevantes para el tema de investigación, presentes en la Tabla 5.

Tabla 3. Bases de datos de acuerdo al área de investigación

Base de datos	Idioma	Área temática	Acceso	Tipos de material
Sage Journals	Español - Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Libros electrónicos y revistas electrónicas
Taylor & Francis	Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos y bases de datos especializadas
Oxford University Press	Español - Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos, bases de datos especializadas y revistas electrónicas
Ebooks 7-24		Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	
Reaxys 2.0	Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos, base de datos especializadas y objetivos virtuales de aprendizaje
Web of Science	Español - Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos
Dirección Nacional de Derechos de Autor	Español	Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso libre	Bases de datos
ProQuest Central	Español - Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos, base de datos especializadas, libros electrónicos y revistas electrónicas
SpringerLink	Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Libros electrónicos
Access Engineering	Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos y libros electrónicos
Scopus	Inglés	Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos y bases de datos especializadas

BIBLIOTECA A JUAN ROA VÁSQUEZ UNIVERSIDAD DEL BOSQUE

	Sciece Direct	Español - Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Bases de datos, Libros electrónicos, revistas electrónicas
	Academic Search	Inglés	Ingeniería, Ciencias exactas, Matemáticas y Físicas	Recurso suscrito	Base de datos

Fuente: Autores

Tabla 4. Conectores utilizados en la revisión bibliográfica

Conectores		
Or	And	Not

Fuente: Autores

Tabla 5. Thesaurus utilizados en la revisión bibliográfica

Thesaurus	
Base de datos	Idioma
UNESCO	Inglés, español, francés y ruso
IEEE	Inglés
AGROVOC	Hasta 29 lenguas, entre esas inglés y español

Fuente: Autores

Para la clasificación de la información secundaria encontrada se construyó una matriz de información con el fin de organizar los documentos en orden cronológico y evidenciando el objetivo y aportes hacia el trabajo. Finalmente, se hizo una síntesis con la cual se identificó los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de las diferentes sustancias como alternativa sostenible en celdas de combustible para la generación de energía eléctrica.

13. Plan de trabajo

En el Anexo 1 se muestra el cronograma general de trabajo, para cada actividad realizada durante el desarrollo del proyecto, desde el proceso de investigación, la formulación de los objetivos, planteamiento

del problema, revisión bibliográfica detallada, resultados, conclusiones y recomendaciones, por mes, así como en la Tabla 6. Relación de objetivos, actividades y resultados de acuerdo al plan de trabajo, se relacionan los objetivos planteados con las actividades y resultados obtenido a lo largo de la revisión bibliográfica.

Tabla 6. Relación de objetivos, actividades y resultados de acuerdo al plan de trabajo

Plan de trabajo													
Mes		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Objetivos	Actividades	Resultado											
Realizar una matriz de información a partir de una revisión bibliográfica sobre las propiedades químicas y físicas de diferentes sustancias como alternativa en celdas de combustible.	Elección del tema	Identificar las propiedades físicas y químicas de las diferentes sustancias con posible aplicación en celdas de combustible, buscando la sostenibilidad	X										
	Delimitación del tema			X									
	Planteamiento y enfoque del problema				X	X	X						
	Revisión documental				X	X	X	X	X	X	X		
	Selección de criterios para la matriz de información							X	X				
	Establecer semejanzas y diferencias de los diferentes tipos de sustancias utilizadas en celdas de combustible									X	X	X	X
	Filtración de artículos útiles para el desarrollo del trabajo								X	X	X		
Distinguir los elementos más abordados con sus esquemas observacionales y precisar los ámbitos no explorados									X	X	X		
Correlacionar las propiedades físicas y químicas de las sustancias con los requerimientos de funcionalidad de las celdas de combustible con posible aplicación.	Indagar en las bases de datos ofrecidas por la Universidad El Bosque y las de libre acceso	Establecer los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de diferentes sustancias					X	X	X	X	X		
	Identificar el núcleo temático de cada documento						X	X	X	X	X		
	Realizar una tabla por cada uno de los criterios seleccionados								X	X	X		

	Aplicar los criterios de investigación previamente establecidos como el año, el idioma y sus áreas de aplicación	como alternativa sostenible en celdas de combustible			X	X	X	X	X	X		
	Utilizar los thesaurus como una herramienta de investigación				X	X	X	X	X	X		
	Analizar y sintetizar la información de las bases de datos en la matriz de información									X	X	X

Fuente: Autores

14. Resultados

A partir de la búsqueda de información secundaria que se realizó mediante el ingreso de las palabras clave en las bases de datos proporcionadas por la Biblioteca Juan Roa Vásquez de la Universidad El Bosque y otras bases de datos de libre acceso, se tuvo presente los criterios de búsqueda anteriormente mencionados, como las palabras claves (celdas de combustible, transferencia iónica y energías no convencionales entre otras) las cuales se consultaron en diferentes idiomas (Inglés y Español) para así poder obtener información concreta. La cantidad de artículos obtenidos fue de 39 documentos, cada uno de ellos se muestra a continuación en la tabla 7.

Tabla 7. Matriz de información – Año, fuente, bases de datos, objetivos y aportes a la revisión bibliográfica

Datos bibliográficos	Título	Idea principal	Resumen
<p>Año: 1934 Tipo de fuente: Libro Base de datos: Engineering Autor: Don W. Green</p>	<p>Electrochemical energy conversion, Eighth Edition</p>	<p>Brinda una cobertura incomparable de todos los aspectos de la ingeniería química, desde los aspectos fundamentales hasta los detalles sobre aplicaciones y control de computadoras.</p>	<p>Este libro aporta información fundamental sobre las celdas de combustible, su funcionamiento, diseño, aplicaciones y eficiencia. La idea de la pila de combustible se acredita generalmente a Sir William Grove, quien vivió en el siglo XIX. Los primeros dispositivos prácticos que se construyeron en el programa espacial de EE. UU. Tardaron más de 100 años como fuente de alimentación para las cápsulas espaciales y el transbordador espacial.</p>
<p>Año:1999 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: Michael Q. Wang</p>	<p>Fuel-Cycle Greenhouse Gas Emissions Impacts of Alternative Transportation Fuels and Advanced Vehicle Technologies</p>	<p>Calcular las emisiones de GEI generadas por combustión convencional y sus posibles impactos</p>	<p>Reducir significativamente las emisiones de GEI relacionadas con el transporte. Propiedades de los diferentes combustibles y sus impactos negativos en el medio ambiente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)</p>
<p>Año:1999 Tipo de fuente: Libro Base de datos: Engineering Autor: Neil Sclater</p>	<p>Electronic Technology Handbook Cap. 10 Batteries and power supplies</p>	<p>Cubre los principales medios prácticos para obtener energía de CC (Corriente Continua) a voltajes que generalmente son menores de 50 V.</p>	<p>Los diferentes procesos electroquímicos que producen la energía en celdas y baterías disponibles comercialmente adecuadas para alimentar la electrónica. La medida del rendimiento de una celda de potencia está determinada por su densidad de energía en términos de peso y volumen</p>

<p>Año: 2000 Tipo de fuente: Libro Base de datos: Biblioteca Juan Roa Vásquez Autor: Luis A. Vargas Amado</p>	<p>Diseño y construcción de un generador prototipo de energía mediante paneles solares-hidrógeno celda de combustible</p>	<p>Realiza una aplicación de las tecnologías innovadoras en nuestro medio, tales como el almacenamiento de energía en hidrógeno y el empleo de celdas de combustible para la generación eléctrica</p>	<p>Los sistemas de generación de energía eléctrica de media potencia existente, como plantas que emplean combustible fósiles y los sistemas fotovoltaicos, que usan baterías para el almacenamiento de energías, presentan algunas limitaciones que los hacen contaminantes de vida útil limitada</p>
<p>Año: 2001 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: Revista científica Autor: Francisco Acuña Garrido, Ventura Muñoz Yi.</p>	<p>Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI</p>	<p>Utilizar las celdas de combustible como fuente de generación de energía, mostrar su forma de operación, su eficiencia y rendimiento, a parte de una descripción de la misma.</p>	<p>Evidencia la eficiencia de un sistema de celdas de combustión y muestra las aplicaciones de la celda, identificando cual es la más promisoría al convertirse en energía eléctrica.</p>
<p>Año: 2002 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: Shahram Karimi y Frank R. Foulkes</p>	<p>Fuel Cell Cars: Panacea or Pipe Dream?</p>	<p>La celda de combustible se realizó para examinar el entorno principal de dicho motor en comparación con un motor de combustión interna para cuantificar las emisiones, material y energía.</p>	<p>Síntesis del funcionamiento de una celda de combustible comparadas con el funcionamiento de un motor de combustión interna para posibles aplicaciones futuras</p>

<p>Año: 2002 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: ScienceDirect / Revista Internacional de Energía de Hidrógeno Autor: Seth Dunn</p>	<p>Hydrogen futures: toward a sustainable energy system</p>	<p>El interés en el hidrógeno, el elemento más simple y más abundante en el universo, también está aumentando debido a los avances técnicos en las celdas de combustible, los sucesores potenciales de las baterías en dispositivos electrónicos portátiles, centrales eléctricas y el motor de combustión interna</p>	<p>Enfatiza en la "economía del hidrógeno" debido a los impactos negativos como la contaminación del aire urbano, la seguridad energética y el cambio climático, generados por las fuentes de energías no convencionales</p>
<p>Año: 2003 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: R. J. Spiegel</p>	<p>System and Process for Production of Methanol from Combined Wind-Turbine and Fuel-Cell Power</p>	<p>Este estudio examina el uso integrado de aerogeneradores, gas natural y alta temperatura.</p>	<p>El propósito es producir combustible para el transporte vehicular, utilizando recursos locales con las emisiones menos contaminantes. Este tipo de combustibles desplazaría al petróleo, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la conversión de energía eólica, gas natural y energía eléctrica de las celdas de combustible.</p>

<p>Año: 2004 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: Google Académico / Revista de la sociedad química de México Autores: Rosa de Guadalupe González-Huerta, Marco Antonio Leyva, Omar Solorza-Feria</p>	<p>Estudio comparativo de la reducción electrocatalítica de oxígeno y su desempeño en una celda de combustible con membrana polimérica</p>	<p>Analizar el comportamiento electroquímico de la reacción catódica sintetizado del pirólisis y mostrar el desempeño de una Celda de Combustible con Membrana de Intercambio Protónico (CCMIP), operando con hidrógeno y oxígeno.</p>	<p>El artículo muestra el desempeño de una monocelda de combustible con el Ensamble Membrana- Electrocatalizador, EME, preparado con platino nanoparticulado como ánodo, rutenio nanoparticulado como cátodo, funcionando con hidrógeno puro como combustible y oxígeno puro como agente oxidante</p>
<p>Año: 2005 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autores: Departamento de Ingeniería Mecánica, la Universidad de Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong</p>	<p>Current Status of Fuel Cell Technologies</p>	<p>Este artículo revisa el estado actual de la celda de combustible tecnologías, compara diferentes tipos de pilas de combustible. Las aplicaciones potenciales de se discuten las celdas de combustible.</p>	<p>Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía para la electricidad generada a partir del combustible hidrógeno. La característica principal de una celda de combustible es que puede convertir energía química directamente en energía eléctrica con mayores eficiencias que los sistemas mecánicos convencionales.</p>

<p>Año: 2005 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: Google Académico Autores: Omar Gutiérrez, Renson Pareja, Carlos Monsalve, Gonzalo Trujillo, Bibian Hoyos, Carlos Sánchez, Javier González</p>	<p>Construcción y evaluación de una celda de combustible de intercambio protónico</p>	<p>Proponer un diseño de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) alimentada con hidrógeno.</p>	<p>Identificación de las condiciones óptimas para satisfacer el diseño de la celda de combustible de membrana de intercambio protónico.</p>
<p>Año: 2006 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autores: Alex Waegel, John Byrne, Daniel Tobin y Bryan Haney</p>	<p>Hydrogen Highways: Lessons on the Energy Technology-Policy Interface</p>	<p>Se han lanzado iniciativas locales en los Estados Unidos, creando “planes de trabajo” piloto y asociaciones tecnológicas para explorar las plataformas de la economía del hidrógeno.</p>	<p>Opciones de energía como el hidrógeno es una energía mejorada, seguridad y reducción de impactos ambientales, contribuyendo a una transición hacia las energías sostenible.</p>

<p>Año: 2006 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: Helge Godoe</p>	<p>The Role of Innovation Regimes and Policy for Creating Radical Innovations: Comparing Some Aspects of Fuel Cells and Hydrogen Technology Development With the Development of Internet and GSM</p>	<p>El autor se centra en el papel de la innovación, regímenes y políticas en un sistema sectorial de perspectivas innovadoras.</p>	<p>Compara el desarrollo moderno de pilas de combustible y tecnología de hidrógeno</p>
<p>Año: 2006 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autores: Denis Kouroussis y Shahram Karimi</p>	<p>Alternative Fuels in Transportation</p>	<p>Comparar los diferentes combustibles aplicables en los diferentes tipos de celdas de combustible</p>	<p>Los beneficios del hidrógeno y otros combustibles líquidos como combustibles de transporte</p>

<p>Año: 2006 Tipo de fuente: Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences- Article Base de datos: JSTOR Journals Autores: N. P. Brandon y D. J. Brett</p>	<p>Engineering Porous Materials for Fuel Cell Applications</p>	<p>Mostrar el uso de los materiales porosos aplicados a la ingeniería por medio de celdas de combustible.</p>	<p>Nos ayuda a determinar las características e introducir los materiales y métodos de procesamiento utilizados para diseñar materiales porosos dentro de dos de las principales variantes de celdas de combustible, la celda de combustible de óxido sólido y la celda de combustible de membrana de electrolito polimérico.</p>
<p>Año: 2007 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: Google Académico Autor: Ángel Pérez Manso</p>	<p>Optimización del diseño de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (DMFC y PEMFC)</p>	<p>Estudiar las oxidaciones del CO, metanol y etanol sobre catalizadores y participar en la línea de investigación dedicada al diseño de las celdas de combustible de metanol directo (DMFC) y de hidrógeno (PEMFC)</p>	<p>Nos ayuda a identificar los problemas actuales de almacenamiento y distribución del hidrógeno como combustible.</p>
<p>Año: 2007 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: Google Académico Autores: Sandra M. Roza Q, Juan E. Tibaquira G.</p>	<p>Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico</p>	<p>Mostrar el principio de funcionamiento, el estado del arte, el campo de aplicación y los costos de las celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico</p>	<p>Aporta sobre el uso de las celdas de combustible, su capacidad de convertir la energía química de la reacción entre el hidrógeno (H₂) y el oxígeno (O₂) en electricidad y calor y de que está compuesta.</p>

<p>Año: 2007 Tipo de fuente: Libro Base de datos: Acess Engineering Autor: Peter Gevorkian</p>	<p>Sustainable Energy Systems Engineering: The Complete Green Building Design Resource Cap. 9 Fuel Cell Technologies</p>	<p>Este recurso altamente visual va más allá de la teoría y proporciona información sólida, práctica y de ingeniería eléctrica sobre el diseño e instalación de sistemas de energía sostenible.</p>	<p>En general, las pilas de combustible son dispositivos similares a baterías que producen energía eléctrica por medio de reacciones electroquímicas. A diferencia de las baterías, siempre que se suministre combustible, las celdas producen electricidad con una mínima degradación o recarga. La degradación de la celda de combustible, según el tipo de producto y la tecnología, puede degradarse de 1 a 4 por ciento por 1000 horas; como resultado, durante un período de 5 a 7 años, las pilas se reemplazan o se reconstruyen.</p>
<p>Año: 2008 Tipo de fuente: Trabajo de grado Base de datos: Researchgate Autor: Alessandro Alfredo Carmona-Martínez</p>	<p>"Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂"</p>	<p>El objetivo principal de este trabajo fue evaluar la producción de electricidad y el desempeño general de una CCM a escala laboratorio, en el tratamiento en lote y lote repetido de los extractos provenientes de los sólidos gastados de la producción fermentativa de H₂.</p>	<p>Aporta sobre el estado actual de la sociedad frente al uso de combustibles convencionales y los impactos negativos que estos generan al ambiente</p>

<p>Año: 2008 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: Susan A. Shaheen, Elliot Martin, and Timothy E. Lipman</p>	<p>Dynamics in Behavioral Response to Fuel-Cell Vehicle Fleet and Hydrogen Fueling Infrastructure</p>	<p>Estudio de Hydrogen fuel-cell vehicles (FCV) que se centró en las actitudes y percepciones de los conductores. El estudio empleó un diseño de encuesta longitudinal, con tres fases y un grupo focal.</p>	<p>Los posibles impactos negativos generados por los motores de vehículos comparados con celdas de combustible y sus beneficios</p>
<p>Año: 2009 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: Departamento de Física, Universidad de Islamia, Bahawalpur, Pakistán Correo electrónico: razahussaini1980@yahoo.com</p>	<p>Development of pem fuel cell in pakistan</p>	<p>Las celdas de combustible son vistas como posibles candidatos para llenar la brecha de escasez de energía próxima. En este enfoque global, se ha emprendido una iniciativa para desarrollar celdas de Combustible en Pakistán. En consecuencia, se desarrolló un prototipo de pila de combustible.</p>	<p>Medición del rendimiento de una celda de combustible y el impacto en varios parámetros determinantes de rendimiento de la celda de combustible</p>
<p>Año: 2010 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: SAGE journals Autor: Yongling Sun, Joan M. Ogden, and Mark A. Delucchi</p>	<p>Societal Life-Cycle Buy-Down Cost of Hydrogen Fuel Cell Vehicles</p>	<p>El costo del ciclo de vida de la sociedad se emplea para evaluar la celda de combustible de hidrógeno vehículos (FCV) en comparación con los vehículos de gasolina convencionales.</p>	<p>los costos económicos directos del consumidor durante la vida útil del vehículo y los costos externos resultantes de la contaminación del aire, el ruido, el uso de petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de combustible y la vida útil del vehículo.</p>

<p>Año: 2010 Tipo de fuente: Journal of Power Sources -Article Base de datos: Scopus Autores: Yilmaztürk, S., Deligöz, H., Yilmazoğlu, M y Damyan, H</p>	<p>Self-assembly of highly charged polyelectrolyte complexes with superior proton conductivity and methanol barrier properties for fuel cells</p>	<p>Conocer las limitaciones del catalizador de platino y el cruce de metanol a través de la membrana basada en polímeros aplicados en celdas de combustible.</p>	<p>Para las celdas de combustible de metanol directo, se presenta un importante cruce de metanol del ánodo al cátodo, lo que causa un potencial mixto y reduce el rendimiento eléctrico.</p>
<p>Año: 2013 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: Google Académico Autores: Maribel Montoya García y Henry Reyes Pineda</p>	<p>Optimización de una celda combustible de hidrógeno</p>	<p>Comparar el funcionamiento de una celda de combustible de hidrógeno con la membrana Nafton 117 y sin ella, bajo diferentes condiciones de operación</p>	<p>Determinar las desventajas comparativas entre la utilización de otros tipos de membranas, tanto catiónicas como aniónicas, debido a los altos costos a pesar de que presentan excelentes rendimientos, con un bajo consumo específico de energía</p>
<p>Año: 2014 Tipo de fuente: Artículo Base de datos: ScienceDirect /Journal of Membrane Science Autor: Hooshyari, K., M. Javanbakht, L. Naji y M. Enhessari</p>	<p>Journal of Membrane Science Volume 454, Nanocomposite proton exchange membranes based on Nafion containing Fe₂TiO₅ nanoparticles in water and alcohol environments for PEMFC</p>	<p>Preparación y caracterización de las membranas de nanocompuestos Nafion / Fe₂TiO₅ para células de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC).</p>	<p>Importancia de las celdas de combustibles comparadas con el campo de energías no convencionales</p>

<p>Año: 2015 Tipo de fuente: Artículo / Revista de investigación Base de datos: Google Académico Autor: Contreras Hincapie, Angela Cristina; Calzada, Rene RomanIcon ; Ramos, Silvina GabrielaIcon ; Andreasen, Gustavo Alfredo; Barsellini, Diego RafaelIcon ; Triaca, Walter Enrique</p>	<p>Evaluación del desempeño de prototipos de celda de combustible de H₂/O₂</p>	<p>Convertir a través de procesos electroquímicos, la energía química del hidrógeno directamente en energía eléctrica y térmica, mediante la aplicación de celdas de combustible</p>	<p>Nos muestra que la mayor brecha que debe superarse para la comercialización de estos dispositivos es el costo y tiempo de vida de los mismos, lo que implica, entre otras cosas, la optimización de los materiales que los componen y el estudio de los fenómenos multifásicos, de transporte y electroquímicos que toman lugar durante su operación</p>
<p>Año: 2015 Tipo de fuente: Revista científica de la Universidad Pablo de Olavide - España Base de datos: Google Académico Autores: Estrella Martín Castellano, Sofía Calero Díaz, Ana Paula Zaderenko Partida, Juan Antonio Anta Montalvo y Patrick J. Merklung</p>	<p>Uso de desechos orgánicos urbanos para la producción energética mediante una celda de combustible microbiana de Escherichia coli</p>	<p>Identificar las ventajas que presentan las diferentes técnicas analíticas aplicadas a las celdas de combustible.</p>	<p>Nos muestra la aplicación de las celdas de combustible con biomateriales, ofreciendo la posibilidad de obtener información relevante a cerca de la vida y el comportamiento de los seres vivos en el pasado empleando una metodología sencilla y versátil que, además, minimiza el daño efectuado sobre piezas únicas.</p>

<p>Año: 2015 Tipo de fuente: Journal of Membrane Science - Article Base de datos: Scopus, Autor: Ngamsantivongsa, P. Lin, H.-L. Yu, T.L.</p>	<p>Properties and fuel cell applications of polybenzimidazole and ethyl phosphoric acid grafted polybenzimidazole blend membranes</p>	<p>Optimizar el rendimiento de la pila de combustible, por medio del desarrollo de membranas a altas temperaturas.</p>	<p>Nos ayuda a identificar las deficiencias que presenta este tipo de membrana debido a su fragilidad.</p>
<p>Año: 2017 Tipo de fuente: Materials Research Bulletin - Article Base de datos: ScienceDirect Autores: Xiao, Jing, Xu, Qing, Huang, Duang-Ping y Chen, Min</p>	<p>Evaluation of $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{Fe}_{1-y}\text{Cr}_y\text{O}_{3-\delta}$ ($y=0.1-0.3$) cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells</p>	<p>Explicar las diferencias en las propiedades entre los sistemas LCFCr y LSFCr y su eficiencia en celdas de combustible.</p>	<p>Nos ayuda a identificar que las diferencias entre los dos sistemas se deben a la relación con sus características estructurales.</p>
<p>Año: 2017 Tipo de fuente: Computational Materials Science - Article Base de datos: Scopus Autor: Riazat, M., Baniassadi, M., Faraji, G y Tafazoli, M.</p>	<p>Investigation of the property hull for solid oxide fuel cell microstructures</p>	<p>Diseñar microestructuras óptimas para electrodos de celdas de combustible de óxido sólido, mejorando su eficiencia.</p>	<p>Nos permite identificar paradigmas frente al diseño para obtener las propiedades deseadas de longitud de límite de triple fase (TPBL), conductividad iónica / electrónica de fase y difusión de gas para una celda de combustible.</p>

<p>Año: 2017 Tipo de fuente: Artículo de investigación Base de datos: SAGE journals Autor: Deivanayagam paradesi, Sivasubramanian Gandhimathi , Hariharasubramanian Krishnan , Ramaswamy Jeyalakshmi</p>	<p>A novel proton conducting polymer electrolyte membrane for fuel cell applications</p>	<p>Una serie de membranas de poli (éter éter sulfona) sulfonadas basadas en fenoltaleína (SPEES) se sintetizaron mediante una reacción de polimerización aromática nucleófila. El grado de sulfonación se controló mediante la síntesis directa de un polímero sulfonado, lo que conduce a una alta estabilidad térmica.</p>	<p>Este artículo nos evidencia las propiedades fisicoquímicas de las membranas, evaluando la idoneidad de estas membranas en aplicaciones de celdas de combustible.</p>
<p>Año: 2017 Tipo de fuente: International Journal of Hydrogen Energy - Article Base de datos: ScienceDirect Autor: Muthu, R. Naresh, Rajashabala, S. y Kannan, R.</p>	<p>Hydrogen storage performance of lithium borohydride decorated activated hexagonal boron nitride nanocomposite for fuel cell applications</p>	<p>Desarrollar la tecnología en celdas de combustible utilizando un material seguro y rentable para el almacenamiento de hidrógeno.</p>	<p>Nos aporta en identificar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno utilizando una configuración de hidrogenación de tipo Sieverts arrojando una excelente capacidad de almacenamiento por parte del hidrógeno.</p>

<p>Año: 2018 Tipo de fuente: International Journal of Hydrogen Energy - Article Base de datos: Academic Search Index Autor: Díaz Elena, Epstein Michael, Romero Manuel y González-Aguilar José</p>	<p>Performance assessment of concentrated solar power plants based on carbon and hydrogen fuel cells.</p>	<p>Descomponer el metano en hidrógeno y carbono, que se utilizan en las células de combustible de hidrógeno y carbono para la generación de electricidad.</p>	<p>Ayuda a identificar la capacidad de energía que se puede lograr almacenando el carbono sólido.</p>
<p>Año: 2018 Tipo de fuente: International Journal of Hydrogen Energy - Article Base de datos: Academic Search Index Autor: Haseli, Y.</p>	<p>Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells.</p>	<p>Demostrar que la eficiencia teórica de una celda de combustible puede exceder la de un motor Carnot que opera entre las mismas temperaturas altas y bajas.</p>	<p>Identificar que, al aumentar el coeficiente estequiométrico del aire, las eficiencias de las celdas de combustible de aire de hidrógeno y de metano y aire aumentan.</p>
<p>Año: 2019 Tipo de fuente: Journal of Power Sources -Article Base de datos: Proxy Autor: Wu, Y., Ravey, A., Chrenko, D. y Huangfu, Y.</p>	<p>A strong robust DC-DC converter of all-digital high-order sliding mode control for fuel cell power applications</p>	<p>Diseñar un convertidor de retroceso aislado fuerte y sólido para las aplicaciones de energía de celdas de combustible</p>	<p>Nos ayuda a determinar la efectividad de la celda de combustible a través de varios experimentos realizados en diferentes condiciones.</p>

<p>Año: 2019 Tipo de fuente: Journal of Electroanalytical Chemistry - Article Base de datos: Proxy Autor: Mohammed, R.K. y Krishnamurthy, B.</p>	<p>Modeling the gas concentration in the anode of a Direct carbon fuel cell</p>	<p>Modelar los perfiles de concentración de dióxido de carbono y monóxido de carbono en el ánodo de una celda de combustible de carbono directo</p>	<p>Nos ayuda a estudiar las concentraciones de dióxido de carbono y sus variaciones en la aplicación a la celda de combustible, dependiendo de la cercanía en la que se encuentre el colector de corriente, analizar el efecto de la conductividad</p>
<p>Año: 2019 Tipo de fuente: International Journal of Hydrogen Energy - Article Base de datos: Academic Search Index Autor: Lin, Rong-Heng, Xi, Xue-Nan, Wang, Pei-Nan, Wu, Bu-Dan y Tian, Shi-Ming</p>	<p>Review on hydrogen fuel cell condition monitoring and prediction methods.</p>	<p>Proponer una visión general completa del trabajo sobre la tecnología de monitoreo de condiciones de celdas de combustible y revisar las obras de la literatura desde dos puntos de vista diferentes, tecnología y escenario. Para la vista tecnológica, existen métodos basados en modelos, métodos basados en filtros y métodos basados en datos. Para las vistas de escenarios, propuso tablas 5 × 5 para una comparación detallada.</p>	<p>Nos permite identificar las condiciones de las celdas de combustible, como el estado de mantenimiento y las fallas, son esenciales para garantizar el suministro continuo de energía.</p>
<p>Año: 2019 Tipo de fuente: Journal of Membrane Science - Article Base de datos: ScienceDirect Autor: Salim, Witopo, Han, Yang, Vakharia, Varun, Wu, Dongzhu, Wheeler, Douglas J. y Ho, W.S. Winston</p>	<p>Scale-up of amine-containing membranes for hydrogen purification for fuel cells</p>	<p>Fabricar membranas que contienen amina para la eliminación de CO₂ del gas de reformado para la purificación de hidrógeno para celdas de combustible</p>	<p>Posibilidades de fabricación de membranas que purifiquen el hidrógeno para celdas de combustible e identificar las variables clave que controlan el grosor de la capa selectiva de la membrana, es decir, la solución de recubrimiento, la velocidad de recubrimiento de la lámina del sustrato</p>

			y el ajuste de la separación de la cuchilla de recubrimiento.
--	--	--	--

Fuente: Autores

De forma paralela se clasificó la información secundaria encontrada, evidenciando un total de 39 documentos relacionados con cada núcleo temático como el funcionamiento de una celda de combustible (24), el diseño de celda una celda de combustible (32), construcción de una celda de combustible (9), celdas de combustibles convencionales (6) y características de las sustancias como posibles combustibles (11), cabe resaltar que más de un documento brinda información a más de un núcleo temático. En la Tabla 8 se muestra la relación de los documentos revisados con los criterios planteados para su clasificación:

Tabla 8 Clasificación de los documentos según los criterios

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUSTANCIAS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS DE COMBUSTIBLE						
Clasificación de los documentos según el tema						
Criterios	Funcionamiento de una celda de combustible	Diseño de celda una celda de combustible	Construcción de celdas de combustible	Celdas de combustibles convencionales	Características de las sustancias como posibles combustibles	Documentos totales
Número de documentos	24	32	9	6	11	39

Fuente: Autores

Siendo una celda de combustible un dispositivo electroquímico cuya función es convertir la energía química de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno, en electricidad y calor, generando como subproducto agua, como se puede observar en la Figura 5 Entradas y salidas de una celda de combustible, la celda de combustible está compuesta por dos electrodos, un ánodo cátodo, separados por un electrolito.

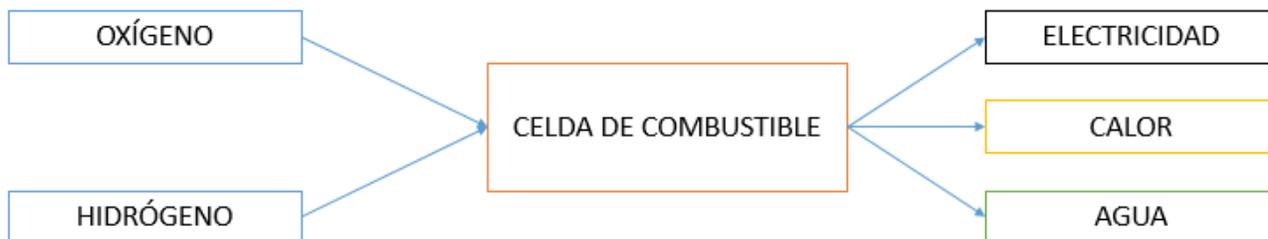


Figura 5 Entradas y salidas de una celda de combustible

Fuente: Autores

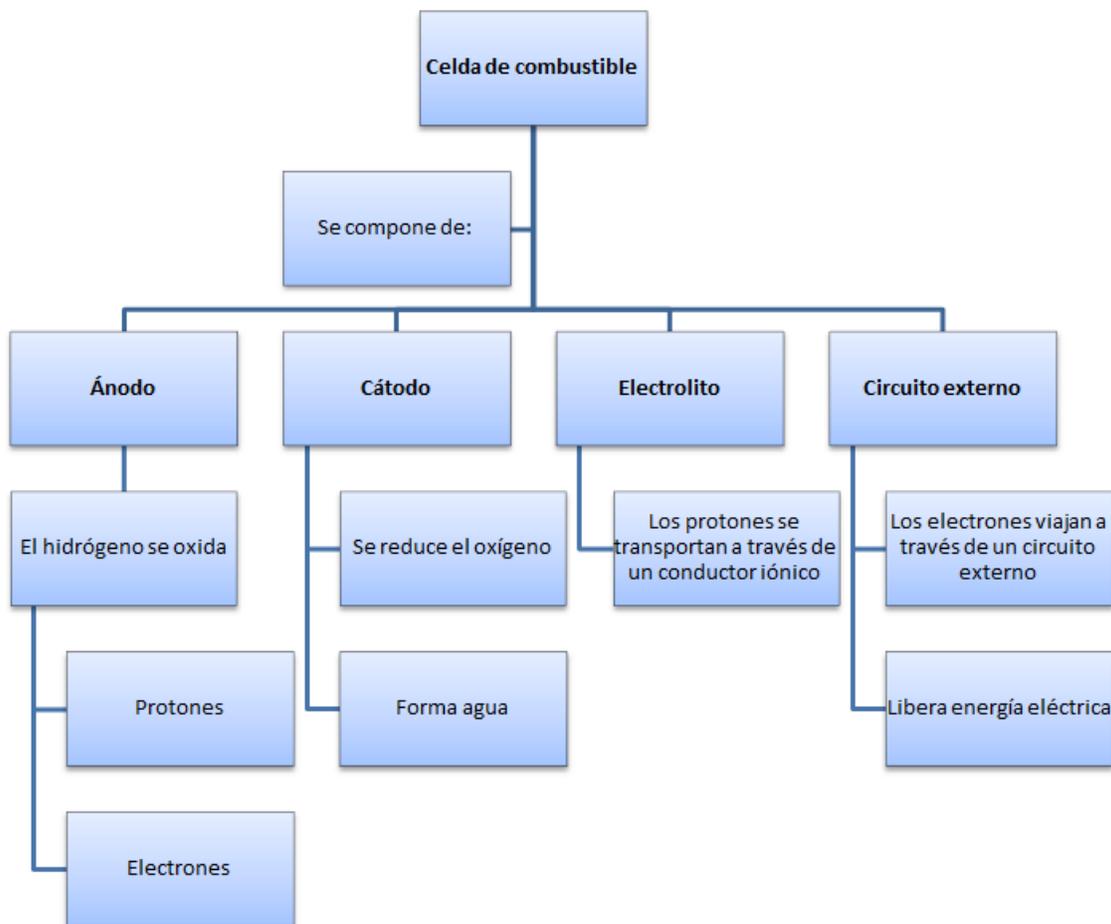


Figura 6 Componentes de una celda de combustible

Fuente: Autores

El funcionamiento de las celdas de combustible es inagotable, ya que depende del suministro de los reactivos, el funcionamiento básico de la celda, en el cual entra el combustible, después se realiza el proceso de oxidación, liberando electrones que viajan a través del electrolito, que pasa a un circuito externo generando energía eléctrica, luego pasa por un proceso de reducción, donde se generan las salidas de los residuos del proceso.

De acuerdo con la Tabla 9 y la Tabla 10, para el funcionamiento óptimo de una celda de combustible es necesario tener en cuenta tanto el ión móvil, como la temperatura de operación de dicha celda, identificando su capacidad de ceder o ganar electrones, es decir su capacidad de oxidación y reducción a determinadas condiciones de funcionamiento de la celda, bajo criterios de funcionamiento, características de las sustancias, diseño, tipo de celda, construcción y su impacto ambiental.

Tabla 9 Tipos de celdas de combustible, temperatura de operación y aplicación.

Tipo	Ión móvil	Temperatura de operación	Aplicación
Alcalina	OH ⁻	50-200°C	Usado en vehículos espaciales (Apollo).
Membrana de intercambio protónico	H ⁺	30-100°C	Vehículos y aplicaciones móviles. Ciclos combinados de baja potencia.
Metanol directo	H ⁺	20-90°C	Dispositivos electrónicos de baja potencia.
Ácido fosfórico	H ⁺	~220°C	Ciclos combinados de alta potencia
Carbonato fundido	CO ₃ ²⁻	~650°C	Ciclos combinados de media potencia
Óxido sólido	O ²⁻	500-1000°C	Ciclos combinados desde 2 kW hasta multi-MW

Fuente: (Roza & Tibaquira, 2007)

Tabla 10 Propiedades físicas y químicas de las sustancias alternativas aplicadas en celdas de combustible

Características de las sustancias											
Generalidades				Propiedades físicas				Propiedades químicas			
Fórmula	Nombre de la sustancia	Estado de la materia	Grupo	Residuos generados	Densidad kg/m ³	Solubilidad	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Estado de oxidación	Energía de ionización	Toxicidad
H	Hidrógeno	Gaseoso	1	agua	0.0838	* Baja en líquidos * Alta en metales	-259.2	-252.9	+1	1.312	-
KOH	Hidróxido de potasio	-	-	-	-	Soluble en agua, alcohol y glicerol. Ligeramente soluble en éter	360	1320	-	-	ORL-RAT LD50 365 mg kg-1
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico	-	-	-	-	Miscible	19	212.7778	-	-	-
ZrO ₂	Óxido de zirconio	Sólido	-	-	5680	Soluble en HF, y HSO ₄ , HNO ₃ , HCl en caliente	2715	4300	+4	-	-
	Ácido crómico	Sólido	Metal	-	1201	-	197	250	+6	652,9 kJ/mol	-
	Dióxido de carbono	Gaseoso	-	-	1,976	En soluciones ácidas.	-78	-57	+4	1086,5 kJ/mol	5000 ppm

	Bicarbonato de sodio	Sólido	-	-	2173	En agua 10,3 g/100 g de H ₂ O	50	270	-	-	4220 mg/kg
CH ₄	Metano	Gaseoso	-	-	0,657	En etanol, éter dietílico, benceno, tolueno, metanol, acetona.	-182	-162	-	-	LD 50 5-15.4 %
C ₂ H ₅ OH	Etanol	Líquido	-	-	789		78	241	-	-	LD 50 10,3 g/kg
Na ₂ O.	Oxido de sodio	Sólido	-	-	2,27	Soluble ligeramente en agua	1275	1950	-	-	-
CaS.	Sulfuro de calcio	Sólido	-	-	2,59	Soluble ligeramente en agua	2525	-	-	-	-
O	Oxígeno	Gaseoso	-	-	1,429	En agua 14,6 mg•L ⁻¹) a 0 °C	-223	-183	-2	1313,9 kJ/mol	-
C ₃ H ₆ O	Acetona	Líquido	-	-	784	Soluble en agua. También puede disolverse en etanol, isopropanol y tolueno	-95	56	-	-	LD50 >2000 mg/kg, oral
CO	Monóxido de carbono	Gaseoso	-	-	1,184	0,0026 g en 100 g de agua	-205	-192	-	-	Inhalación: Muy peligroso, puede ser fatal.
Al(OH) ₃	Hidróxido de aluminio	Sólido	-	-	2420	Soluble en ácidos y bases	300	-	-	-	LD50 >5000 mg/kg (ratas, oral)
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnesio	Sólido	Orgánico	-	2344,6	Solubilidad en agua 12 mg en 1 L de agua	350	-	-	-	Sin riesgo en bajas dosis, peligroso en gran cantidad (puede causar diarrea).
ZnO.	Óxido de cinc	Sólido	Inorgánico	-	5606		1975	-	-	-	-
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno	Líquido	-	-	1400	Miscible	-1	150	-	-	Ingestión Serios daños, posiblemente fatal
H ₃ PO ₃	Ácido fosforoso	Sólido	-	-	1651	Solubilidad en agua 310 g/100 mL	73,6	200	-	-	-
N ₂ H ₄ H ₂ O.	Hidrato de hidrazina	Líquido	-	-	1032	-	-51,7	119	-	-	-

Fuente: Autores

15. Análisis y discusión de resultados

Para el objetivo uno, realizar una matriz de información a partir de una revisión bibliográfica sobre las propiedades químicas y físicas de diferentes sustancias como alternativa en celdas de combustible, se obtuvo que las sustancias a utilizar como alternativa en celdas de combustible son aquellas que tienen la capacidad de ceder y ganar electrones, para comprender los criterios que deben tener dichas sustancias es necesario primero determinar el diseño y funcionamiento de la celda de combustible, para ello la celda se compone de un ánodo donde el hidrógeno se oxida, cátodo donde se reduce el oxígeno y se forma agua, electrolito, donde los protones se transportan a través de un conductor iónico y un circuito externo por donde los electrones viajan y se libera energía eléctrica; Entonces en el primer paso de oxidación la sustancia pierde electrones y estos se acumulan en la membrana y viajan a través del conductor iónico, luego la sustancia se reduce, ganando electrones y formándose una molécula nueva de la cual sale un residuo, en el caso del hidrógeno y el oxígeno, su residuo es agua.

Para determinar las propiedades es importante plantear los criterios de búsqueda, en la Tabla 8 Clasificación de los documentos según los criterios, se muestran los documentos relacionados con cada núcleo temático para el desarrollo del proyecto y tener en cuenta la densidad de la sustancia y su capacidad para ceder o ganar electrones, así como también su punto de fusión y ebullición para no generar una reacción química no deseada dentro de la celda de combustible, ya que esto puede generar la ineficiencia de la celda o su daño.

Después de la revisión bibliográfica, la delimitación del tema y el establecimiento de los criterios, la matriz de información se muestra en la Tabla 10, allí se encuentra recopilada la información por cada sustancia de acuerdo con los criterios planteados para su delimitación y posible uso en celdas de combustible.

Para el objetivo dos, correlacionar las propiedades físicas y químicas de las sustancias con los requerimientos de funcionalidad de las celdas de combustible con posible aplicación.

A partir de las características de una celda de combustible, es necesario definir los parámetros como combustible, en el caso de la celda de combustible hidrógeno gaseoso; Las condiciones ambientales a las cuales se ve expuesta la celda, como temperatura ambiente y humedad, así como las emisiones que se generan, sea agua pura (vapor y líquida), partículas de dióxido de carbono, ruido, entre otros y los datos físicos en su diseño y construcción como las dimensiones y el peso de la celda. En relación al hidrógeno que consume la celda, al entrar en ella su presión decrece y la tasa de consumo del hidrógeno es proporcional a la densidad de corriente.

En cuanto al funcionamiento de una celda de combustible primero debe definirse el tipo de celda, para determinar a qué temperatura estará la sustancia a ingresar como combustible, por ejemplo en el caso de la celda de combustible tipo alcalina (AFC), su temperatura de operación se encuentra entre los 70°C y 120°C, ingresando como combustible H_2 , en este caso el oxidante es el O_2 y el aire, de acuerdo con la tabla de propiedades físicas y químicas de las sustancias a utilizar como alternativa, se observa el estado en el cual se encuentran y el punto de fusión para que no genere una reacción química creando otro compuesto que no permita la liberación de electrones o que envenene la celda, como es el caso del CO_2 para la celda de tipo alcalina (AFC).

La densidad de la sustancia también es importante de acuerdo a los criterios planteados de Funcionamiento de una celda de combustible, diseño y construcción, y las características de las sustancias como posibles combustibles, ya que una sustancia demasiado pesada ocasiona que la celda de combustible no pueda realizar o realice incompleto el proceso de oxidación de la misma, no generando energía; Y entre más baja sea su densidad mayor será el intercambio de electrones al electrolito, generando así una mayor eficiencia de la celda, por tanto las sustancias con mayor potencial a utilizar en celdas de combustible, como alternativa sostenible son: el metano, etanol, sulfuro de calcio y el hidrógeno, dependiendo del tipo de celda a utilizar.

Un requisito crítico es mantener un alto contenido de agua en el electrolito para garantizar una alta conductividad iónica. Mantener un alto contenido de agua es particularmente crítico cuando se opera a altas densidades de corriente (aproximadamente $1 \text{ A} / \text{cm}^2$) porque los problemas de transporte masivo asociados con la formación y distribución del agua.

La conductividad iónica del electrolito es mayor cuando la membrana está completamente saturada: esto afecta la eficiencia general de la celda de combustible. Sin una adecuada gestión del agua, un Se producirá un desequilibrio entre la producción de agua y la eliminación de agua de la celda.

16. Conclusiones

En este proyecto se presentó una metodología que se basa en una revisión bibliográfica sobre los requerimientos funcionales a nivel químico y físico de una sustancia como alternativa sostenible en celdas de combustible tipo PEMFC, mediante una macro búsqueda que permite la identificación de los documentos referentes al tema de investigación. Es decir, que a partir de la implementación de las herramientas tecnológicas se pudo crear una matriz de información con la cual se pudo evidenciar el concepto de una celda de combustible, así como: Diseño de celda una celda de combustible, celdas de combustibles convencionales, funcionamiento de una celda de combustible, construcción de celdas de combustible y características de las sustancias como posibles combustibles.

De acuerdo con las propiedades físicas y químicas que se estimaron para el funcionamiento de la celda, se identificó los beneficios y falencias de las diferentes sustancias (hidrógeno, hidróxido de potasio, ácido fosfórico, ácido fosfórico, óxido de zirconio, ácido crómico, dióxido de carbono, bicarbonato de sodio, metano, etanol, óxido de sodio, sulfuro de calcio, oxígeno y acetona) propuestas como alternativa sostenible en celdas de combustible, teniendo en cuenta los criterios establecidos en la tabla 9. De la misma forma, se pudo establecer el medio propicio para su funcionamiento, los diferentes factores de funcionalidad, el tipo de celda, sus generalidades como fórmula, nombre de la sustancia, estado de la materia, grupo, así como sus propiedades tanto físicas como químicas. Por lo dicho anteriormente, se pudo evidenciar que, dependiendo de la temperatura de la sustancia y el tipo de celda de combustible, puede potencializar la funcionalidad del proceso mediante el cual se produce energía.

17. Recomendaciones

- Realizar una revisión bibliográfica utilizando la metodología planteada en el trabajo para profundizar en las sustancias metano, sulfuro de calcio y monóxido de carbono, sugeridas como óptima aplicación en celdas de combustible.

18. Referencias bibliográficas

- Acuña, F. M. (2001). Celdas de combustible. Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI. Sistema de Información Científica Redalyc
- Alvarado Flores, J. (2013). Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible. [online] Boletines.secv.es. Recuperado de: [at:http://boletines.secv.es/upload/20130704101206.201352105.pdf](http://boletines.secv.es/upload/20130704101206.201352105.pdf) [Accessed 14 Mar. 2019]
- Bahawalpur (2009). DEVELOPMENT OF PEM FUEL CELL IN PAKISTAN. Recuperado el 11 de abril del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1260/095830509788707310>
- BIRF, B. M. (2018). Energía, panorama general. Obtenido de: <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Brandon N. P. & Brett D. J. (2006). Engineering Porous Materials for Fuel Cell Applications. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences- Article. Recuperado el 5 de abril del 2019; <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2005.1684>
- Cano, U. (2000). Infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso. Academia.edu.documents, 7. Recuperado de: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38931078/tenden01.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1555894995&Signature=1YVBWF6rpuBQGepW WnKQCuUndJo%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DBoletin_iae_julio-agosto_del_2000.pdf
- Carmona, A. A. (2008). Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂. Recuperado el 5 de abril del 2019.
- Contreras, H., Cristina, A., Roman Icon, R., Gabriela Icon, S., Triaca, Walter., Gustavo, A., Rafael Icon, D., Enrique, W., (2015). Evaluación del desempeño de prototipos de celda de combustible de H₂/O₂. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/5070>
- Corrales, L. & Muñoz Ariza, M. (2012). Estrés oxidativo: origen, evolución y consecuencias de la toxicidad del oxígeno. NOVA, 10(18). <https://doi.org/10.22490/24629448.1010>
- Das D.; Veziroglu T.N. (2001). Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. Int. J. Hydrogen Energy. 26: 13-28.
- Deivanayagam, Pa., Sivasubramanian, G., Hariharasubramanian., K., Ramaswam y Jeyalakshmi. (2017). A novel proton conducting polymer electrolyte membrane for fuel cell applications.

Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/full/10.1177/0954008316684931>

- De La Torre, R. García, L. Garcia, C. & Gonzalez, D. (2016). Análisis de los parámetros de funcionamiento de una celda de combustible de óxido sólido regenerativa. *Energética* vol.37 no.3 La Habana sep.-dic. 2016
- Díaz, E., Epstein, M., Romero, M y González, J. (2018). Performance assessment of concentrated solar power plants based on carbon and hydrogen fuel cells. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0360319918303343?via%3Dihub>
- Don, W. (1934). *Electrochemical energy conversion*, Eighth Edition. Recuperado el 26 de marzo del 2019; Engineering
- Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system, *Int. J. Hydrogen Energy*. 27: 235-264
- EG&G Technical Services, Inc., (2004), *Fuel Cell Handbook*. Seventh Edition. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory P.O. Box 880 Morgantown, West Virginia 26507-0880
- Fernando, S. (2006). El reto energético. Recuperado de: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8uXrQynjKZ4C&oi=fnd&pg=PA11&dq=celda+de+combustible+fue+por+el+abogado+y+cient%C3%ADfco+William+Grove+en+1839&ots=bFf9xNICP-&sig=sypiSc5TdZQFxFxUQS_7NWJxfTomg#v=onepage&q&f=false
- Franco J., A. Sanguinetti, G. Colángelo & H. Fasoli, (2010). *Funcionamiento y Estabilidad en el Tiempo de un Sistema Energético con Batería PEM a Combustible y sus Componentes*
- Larminie, J. & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. Second Edition. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
- Gallopín G. (2003), *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. NU. CEPAL
- Gevorkian, P. (2007). *Sustainable Energy Systems Engineering: The Complete Green Building Design Resource* Cap. 9 FUEL CELL TECHNOLOGIES. Recuperado el 11 de abril del 2019; <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.unbosque.edu.co/browse/sustainable-energy-systems-engineering-the-complete-green-building-design-resource/c9780071473590ch09?q=fuel+cell>
- González, R., Leyva, M., & Solorza, O. (2004). Estudio comparativo de la reducción electrocatalítica de oxígeno sobre rutenio y su desempeño en una celda de combustible con membrana polimérica. *Revista de la sociedad química de México*, 8. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932004000100001

- Gutierrez. (2005). Construcción y evaluación de una celda de combustible de intercambio protónico. 11. Recuperado de:<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n145/a01v72n145.pdf>
- Godoe, H. (2006). The Role of Innovation Regimes and Policy for Creating Radical Innovations: Comparing Some Aspects of Fuel Cells and Hydrogen Technology Development With the Development of Internet and GSM. Recuperado el 05 de abril del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1177/0270467606290303>
- Haseli, Y.(2018). Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0360319918308371?via%3Dihub>
- Hooshyari, K. M. Javanbakht, L. Naji & M. Enhessari, (2014). Nanocomposite proton exchange membranes based on Nafion containing Fe₂TiO₅ nanoparticles in water and alcohol environments for PEMFC, *Journal of Membrane Science*: 454(1), 74-81
- Hoyos, B. Restrepo, A. & Mesa, C. (2007). Ánodo de Pt-Ru y Pt-Ir para celdas de combustible alimentadas con Metano y propano directo.
- Karimi, S & Foulkes, F. (2002). Fuel Cell Cars: Panacea or Pipe Dream?. Recuperado el 05 de marzo del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1177/0270467602022004004>
- Kouroussis, D. & Karimi, S. (2006). Alternative Fuels in Transportation. Recuperado el 11 de abril del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1177/0270467606292150>
- Kunusch, C. & Puleston, P. (2016). Modelado Dinámico y Validación. 8. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/3604505.pdf>
- Lim, Y. et al (2014). Preparation and characterization of proton exchange poly(ether sulfone)s membranes grafted propane sulfonic acid on pendant phenyl groups, *Electrochimica Acta*: 118, 18-25
- Lin, Rong Heng, X.i, Xue, N., Wang, Pei, N., Wu, Bu, D., y Tian, S. (2019). Review on hydrogen fuel cell condition monitoring and prediction methods. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0360319918329525?via%3Dihub>.
- Linares, J., Moratilla, B., (2007), El hidrógeno y la energía. Universidad Pontificia Comillas Alberto Aguilera, 23. 28015 Madrid.
- Liu, J. B. Madsen, Z. Ji, S. Barnett (2002). A fuel-flexible ceramic-based anode for solid oxide fuel cells *Electrochem. Solid-State Lett.*, 5 (6), pp. A122-A124

- Luna, G., Gil, C. (2014). Aplicaciones del hidrógeno como biogás, producido en una celda de combustible de orina. 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/ExtendedAbstracts/EA032.pdf>
- Martín, E., Calero, S., Zaderenko, A., Antonio, J., Montalvo, A y Merklings, P., (2015). Uso de desechos orgánicos urbanos para la producción energética mediante una celda de combustible microbiana de Escherichia coli. Recuperado el 27 de abril del 2019; https://www.upo.es/moleqla/export/sites/moleqla/documentos/Numero19/Nxmero_19.pdf.
- Martinez, J. Fernández, A. (2004), Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Recuperado de: http://fec-chiapas.com.mx/sistema/biblioteca_digital/cambio-climatico.pdf#page=27
- Membranes grafted propane sulfonic acid on pendant phenyl groups, Electrochemical Acta: 118(1), 18-25 (2014)
- Ministerio de Minas y Energía, (2017). Ministerio de minas y energía.org. Bogotá. Recuperado de: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf
- Mohammed, R y Krishnamurti, B. (2019). Modeling the gas concentration in the anode of a Direct carbon fuel cell. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://eds-a-ebSCOhost-com.ezproxy.unbosque.edu.co/eds/detail/detail?vid=0&sid=22943581-83f1-4f9f-a0a7-6903664df5de%40sdc-v-sessmgr02&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2NvcGU9c2l0ZQ%3d%3d#AN=edselc.2-52.0-85059686572&db=edselc>
- Montoya, M. & Reyes, H. (2013). Optimización de una celda combustible de Hidrógeno. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, 7. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/849/84927487029.pdf>
- Muthu, R., Naresh., Rajashabala, S. y Kannan, R. (2017). Hydrogen storage performance of lithium borohydride decorated activated hexagonal boron nitride nanocomposite for fuel cell applications. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0360319917316932?via%3Dihub>.
- Ngamsantivongsa, P., Lin, H.L Tu y T.L. (2015). Properties and fuel cell applications of polybenzimidazole and ethyl phosphoric acid grafted polybenzimidazole blend membranes. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0376738815003762?via%3Dihub>.
- Pérez, A. (2007). Optimización Del Diseño De Una Celda De Combustible De Membrana De Intercambio Protónico (Dmfc Y Pemfc). España. Recuperado de http://root.ps/download/estrategiasconjuntas/Suficiencia_Angel_Perez.pdf

- Pineda, A. Rosas, M. (2016) Estado del arte en celdas de combustible microbianas (CCM) para producción de bioenergía. Universidad Distrital Francisco José de Caldas facultad del medio ambiente y recursos naturales proyecto curricular de ingeniería ambiental Bogotá D.C.
- Poggi, H. Martinez, A. & Pineda, J. (2008) Energía Eléctrica Directa de Residuales Líquidos Orgánicos Utilizando Pilas de Combustible Microbianas: Avances y Perspectivas Libros de Ciencia y Tecnología N° 1 Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec Energías Renovables Biológicas-Hidrógeno-Pilas de Combustible, México
- Pokfulam, R. (2005). Current Status of Fuel Cell Technologies. Recuperado el 5 de abril del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1260/014459805774852083>
- Realpe, A. Romero, K. & Acevedo, M. (2014) Síntesis de Membranas de Intercambio Protónico a Partir de Mezcla de Poliéster Insaturado y Látex Natural, para su uso en Celdas de Combustible. Programa de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, Campus Piedra Bolívar.
- Riazat, M., Baniassadi, M., Faraji, G y Tafazoli, M. (2017). Investigation of the property hull for solid oxide fuel cell microstructures. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0927025616305213?via%3Dihub>
- Rivera, D. A. Méndez, J. F. & Herrar, L. (2015). Estudio de factibilidad para la implementación de una planta generadora de energía eléctrica en la UNAH utilizando celdas de combustible a base de gas metano. Revista Ciencia y Tecnología, (3), 37-52.
- Rozo, S., & Tibaquirá, J. (2007). Celdas De Combustible Tipo Membrana De Intercambio Protónico. Revista Científica de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 6. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/html/849/84903747/>
- Salim., Witopo., Han., Yang., Vakharia., Varun., Wu., Dongzhu., Wheeler., Douglas J. y Winston, W. (2019). Scale-up of amine-containing membranes for hydrogen purification for fuel cells. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0376738818320738?via%3Dihub>
- Santibañez, G. (2014). Hidrógeno como combustible, Instituto Tecnológico de Tijuana. México
- Sapiña, F. (2006). El reto energético. España: Maite Simón. Recuperado de: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8uXrQynjKZ4C&oi=fnd&pg=PA11&dq=celda+de+combustible+fue+por+el+abogado+y+cient%C3%ADfco+William+Grove+en+1839&ots=bFf9xNlCP-&sig=sypiSc5TdZQFxFxUQS_7NWJxfTomg#v=onepage&q&f=false
- Sclater, N. Electronic Technology Handbook. Batteries and power supplies, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineeri. +ngLim, Y. y otros ocho autores, Preparation and characterization of proton exchange Polly (ether sulfone)

- Shaheen, S. A. Martin, E. & Lipman, T. E. (2008). Dynamics in Behavioral Response to Fuel-Cell Vehicle Fleet and Hydrogen Fueling Infrastructure. Recuperado el 6 de marzo del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.3141/2058-19>
- Spiegel, R. J. (2003). System and Process for Producción of Methanol from Combined Wind-Turbine and Fuel-Cell Power. SAGE journals. Recuperado en: <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1260/03095240360698564>
- Solar, J. (2017). Extracción del hidrógeno contenido en la orina humana mediante el método de celdas electrolítica para generar energía eléctrica. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42150/JUAN%20ANGEL%20SOLAR%20CASTILLEJOS.pdf?sequence=1>
- Spazzafumo, G. (2018). Hydrogen and fuel cells. <https://eds-b-ebshost-com.ezproxy.unbosque.edu.co/eds/results?vid=1&sid=b49933cd-b8fd-45a2-9e2fdfb32758e94d%40pdc-v>
- Tibaquirá, G. Juan E. Posner, J. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et technica*, [S.l.], v. 2, n. ISSN 2344-7214. Recuperado de: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2569/1473>
- Valencia, V. (s.f.). Revisión documental en el proceso de investigación, Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. Recuperado de: <https://univirtual.utp.edu.co/pandora/recursos/1000/1771/1771.pdf>
- Sapiña, F. (2006). El reto energético. España: Maite Simón. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8uXrQynjKZ4C&oi=fnd&pg=PA11&dq=celda+de+combustible+fue+por+el+abogado+y+cient%C3%ADfico+William+Grove+en+1839&ots=bFf9xNICP-&sig=sypiSc5TdZQFxFUQS_7NWXfTomg#v=onepage&q&f=false
- Vargas, L. A. (2000). Diseño y construcción de un generador prototipo de energía mediante paneles solares-hidrógeno celda de combustible. Bogotá: U. Distrital Francisco José de C.
- Waegel, A. Byrne, J. Tobin, D. & Haney, B. (2006). Hydrogen Highways: Lessons on the Energy Technology-Policy Interface. Recuperado el 05 de marzo del 2019; <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.1177/0270467606291834>
- Wang, Q. (1999). Fuel-Cycle Greenhouse Gas Emissions Impacts of Alternative Transportation Fuels and Advanced Vehicle Technologies. Recuperado el 26 de marzo del 2019, <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unbosque.edu.co/doi/pdf/10.3141/1664-02>
- Wu, Y., Ravey, A., Chrenko, D. y Huangfu, Y. (2019). A strong robust DC-DC converter of all-digital high-order sliding mode control for fuel cell power applications. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://eds-a-ebshost-com.ezproxy.unbosque.edu.co/eds/detail/detail?vid=0&sid=af9edb2d-7524-42fc-b30c-77b9741fe55d%40sdc-v->

sessmgr02&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2NvcGU9c2l0ZQ%3d%3d#AN=edsele.2-52.0-85058779458&db=edsele"

- Xiao., Jing, Xu., Qing., Huang., Duang., Ping y Chen, Min. (2017). Evaluation of $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{Fe}_{1-y}\text{Cr}_y\text{O}_{3-\delta}$ ($y=0.1-0.3$) cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. Recuperado el 27 de abril del 2019; <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0025540816313666?via%3Dihub>
- Yilmaztürk, S. Deligöz, H. Yilmazoğlu, M. & Damyan, H. (2010). Self-assembly of highly charged polyelectrolyte complexes with superior proton conductivity and methanol barrier properties for fuel cells. *Journal of Power Sources* -Article. Recuperado el 11 de abril del 2019; <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0378775309014311?via%3Dihub>
- Yongling, S. Ogden, M. J. & Delucchi, M. A. (2010). Societal Life-Cycle Buy-Down Cost of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Recuperado el 6 de marzo del 2019
- Yue Ch.D. Liua Ch.M. Lioub E.M.L. (2001). A transition toward a sustainable energy future: feasibility assessment and development strategies of wind power in Taiwan. *Fuel and Energy Abstracts*. 29:951-963.
- Zaderenko, A., Anta, J., Merklng, P., & Calero, S. (2015). MOLEQLA (Vol. 19). España.
-  Zamora, M. Olivares, J. Ramírez, J. Santos cruz, J. Orozco, G. (2016). Simulación de platos colectores para su aplicación en celas de combustible Tipo PEM. *Revista de Tecnología e Innovación*. Recuperado de: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Tecnologia_e_innovacion/vol3num8/Revista_d_e_Tecnologia_e_Innovaci%C3%B3n_V3_N8_10.pdf