

Celdas de combustible SOFC para Aprovechamiento de Gas Natural y Biogás

SOFC fuel Cells for Natural Gas and Biogas Utilization

Carlos Cervantes ^{1}, Javier Mora ², Cristian Valdes ³, Alberth González ^{4**}*

Universidad ECCI, Bogotá D.C, Colombia

**carlosa.cervantesg@ecci.edu.co*

***argonzalezc@ecci.edu.co*

RESUMEN

El uso de recursos para las diferentes necesidades del ser humano impone desarrollar nuevas tecnologías para promover el desarrollo sostenible, reducir la contaminación y suplir todas las necesidades, tal es el caso de la demanda de energía eléctrica en nuestra sociedad, la cual es empleada en gran medida para el funcionamiento de diferentes dispositivos electrónicos. En este sentido, las fuentes de energía convencionales deben poder sustituirse por fuentes de energía renovables garantizando los mismos niveles de entrega de energía y su estabilidad, así las celdas de combustible se presentan como dispositivos electroquímicos eficientes para aprovechamiento energético. En esta revisión abordaron las generalidades de las celdas de Combustible de Óxido Solido (SOFC) que emplean fuentes de combustible convencionales y no convencionales como lo son el Gas Natural y el Biogás, a fin de poder determinar la viabilidad de su uso en el ámbito real sustituyendo parcialmente métodos actuales de generación de energía convencionales. De forma detallada se abordarán aspectos importantes del funcionamiento de las celdas de combustible tipo SOFC, desde la perspectiva de los diferentes fenómenos electrocinéticos que ocurren en su estructura porosa, la importancia de los materiales que la componen y que determinan el comportamiento térmico del proceso y su eficiencia, así como la configuración mecánica de estos dispositivos y su uso en ciclos de cogeneración. Una vez desarrollada la investigación, logra determinarse que, aunque estos combustibles pueden ser empleados y ofrecen resultados satisfactorios que se ajustan a las condiciones demandadas por el contexto actual, suponen retos que deben ser atendidos en términos de infraestructura de suministro de combustibles gaseosos, así como la generación de subproductos del proceso y costos asociados a las condiciones locativas específicas para este tipo de energía renovable.

Palabras clave: Celdas de Combustible de Óxido Solido (SOFC), Gas Natural, Biogás.

Recibido: 07 de febrero de 2022. Aceptado: 24 de junio de 20xx

Received: February 07, 2022 Accepted: June 24, 2022

ABSTRACT

The use of resources for the different requirements of the human being imposes the development of new technologies to promote sustainable development, reduce pollution and supply all the needs, such is the case of the demand for electrical energy in our society, which is largely used for the operation of different electronic devices. In this sense, conventional energy sources must be replaced by renewable energy sources guaranteeing the same levels of energy delivery and stability, thus fuel cells are presented as efficient electrochemical devices for energy use. In this review the generalities of the Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) that use conventional and non-conventional fuel sources such as Natural Gas and Biogas, to determine the feasibility of their use in the real world partially replacing current conventional energy generation methods. Important aspects of the SOFC operation will be approached in detail, from the perspective of the different electrokinetic phenomena that occur in its porous structure, the importance of the materials that compose it and that determine the thermal behavior of the process and its efficiency, as well as the mechanical configuration of these devices and their use in cogeneration cycles. Once the research was developed, it was determined that, although these fuels can be used and offer satisfactory results that meet the conditions demanded by the current context, they pose challenges that must be addressed in terms of infrastructure for the supply of gaseous fuels, as well as the generation of process by-products and costs associated with the specific local conditions for this kind of renewable energy.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Natural Gas, Biogas

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles convencionales, ha promovido drásticamente generación de emisiones atmosféricas que contribuyen al calentamiento global, estas emisiones principalmente se componen de CO₂, CH₄, CO y vapor de agua. Así se hace evidente que la humanidad requiere un cambio si desea conservar su actual estilo de vida. Para ello, la producción futura de electricidad deberá utilizar fuentes renovables de energía libres de emisiones atmosféricas, contribuyendo así a una generación sostenible de energía eléctrica [1,2]

Durante las últimas décadas, la investigación sobre las Pilas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC) se ha intensificado considerablemente, dada la necesidad existente de generar una fuente continua y eficiente de energía eléctrica. Sin embargo, su costo de producción y el desarrollo de electrodos duraderos a altas temperaturas comprometen su potencial comercialización, así como una relativa corta vida útil que limita aún más su aplicación asociada al desgaste de los electrocatalizadores y las altas temperaturas de operación. Por otra parte, el desarrollo de estudios relacionados a los nanomateriales utilizados y a sus condiciones de operación, así como las condiciones interfaciales con el electrolito, muestran que estas tecnologías son promisorias y en combinación con tecnologías de almacenamiento y producción de hidrogeno permiten el desarrollo de dispositivos electroquímicos eficientes [3,4]

Estas celdas de combustible cuentan con una ventaja significativa respecto a otros sistemas dada su eficiencia que puede llegar al 94% en comparación con motores de combustión interna y ciclos térmicos, cuya eficiencia oscila entre 57 y 65%, empleando fuentes alternativas en el combustible utilizado, donde las diferentes reacciones electroquímicas se dan principalmente tras el suministro controlado de un combustible y un comburente que es generalmente aire comprimido. Aun así, el aspecto de mayor relevancia en la efectividad de una celda SOFC es el electrocatalizador empleado [4,5,6]. Usualmente, los catalizadores aceleran las reacciones de electrooxidación y electroreducción en el ánodo y en el cátodo; generando mayores densidades de corriente y rendimiento en la reacción electrocatalizada; aprovechando el potencial que poseen el gas natural, el Biogás y El Fluegas en estos sistemas [7,8]

En términos de exergía, el gas natural en un motor de combustión libera casi la mitad de su flujo en CO₂ generado, así al utilizar una celda de combustible SOFC se aprovecha

de manera sostenible el gas natural sin generar combustión de manera convencional, siendo aprovechado en una reacción electroquímica [7]. Adicionalmente el Biogás como alternativa sostenible generado a partir de biomasa también puede ser aprovechado en estos dispositivos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación a los sistemas tradicionales de combustión interna [9,10,11].

Las celdas de combustible de óxido sólido, en términos generales son dispositivos que transforman inicialmente el gas natural, el fluegas y el Biogás en gas de síntesis en un reactor de reformado interno para producir gas de síntesis, una mezcla de H₂ y CO que posteriormente se aprovecha en la celda SOFC mediante un proceso de electrooxidación sobre electrocatalizadores de Níquel soportados en materiales cerámicos dada la alta temperatura alcanzada en el proceso [10,12]. Estas celdas de combustible tienen características modulares, son silenciosas y presentan bajos niveles de emisiones contaminantes, sin embargo el uso de materiales tipo perovskitas y Yittria estabilizada como membranas de la celda han limitado su comercialización a gran escala, superado esto; estas celdas se podrían utilizar en el desarrollo de sistemas híbridos para generación eficiente de energía de la mano con otros tipos de energías renovables como la energía solar y la energía eólica, dentro del contexto de desarrollo de soluciones energéticas para regiones no interconectadas en Colombia.

Esta revisión analiza el estado del arte de las celdas de combustible tipo SOFC, sus características y sus potenciales aplicaciones, combinadas con fuentes alternativas de combustible como lo son el Gas natural y el Biogás y el aprovechamiento de manera sostenible de fluegas generado en procesos de combustión y en procesos industriales en la industria petrolera, cementera y metalúrgica, viabilizando el uso de estos combustibles como fuentes generadoras de energía eléctrica empleando celdas de combustible tipo SOFC, reduciendo simultáneamente la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) causadas [10,13].

2. CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Las celdas de combustible SOFC son dispositivos de conversión de energía electroquímica que convierten parcialmente la energía química de los combustibles en energía eléctrica y producen H₂O, CO y CO₂ como subproducto, generando voltajes de operación de una celda simple de 3.5 Volts que comparadas a las celdas PEM, generan 3 veces más su entrega actual, con corrientes eléctricas altas en comparación a otras celdas de combustible

como lo son las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio de Protones (PEMFC) o las celdas de Combustible de Carbono Directo (DCFC) [14,15,16] con un excedente de calor generado en las reacciones exotérmicas. Estas celdas proporcionan eficiencias del 96% de conversión en comparación a los ciclos térmicos tradicionales, su principio de funcionamiento es similar al de las baterías sólidas, es decir una combinación de reacciones electroquímicas asistida por un medio electrolítico que producen una corriente eléctrica en amperes y una diferencia de potencial en voltios, un combustible gaseoso y un gas oxidante (oxígeno del aire) reaccionan simultáneamente sobre la superficie catalítica de dos electrodos químicamente similares generando protones y electrones que promueven una corriente eléctrica continua y un subproducto por el efecto de la combinación de un ion transportador proveniente del ánodo y un catión que se transporta a través de un medio poroso llamado membrana [3,17,18]. Dicho proceso se esquematiza en la Figura 1 [19].

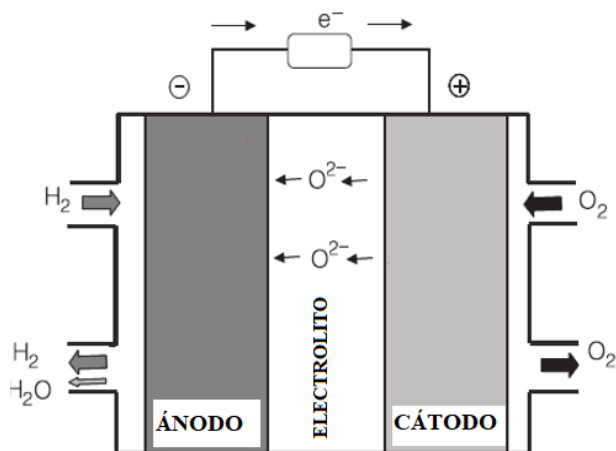
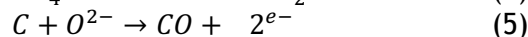
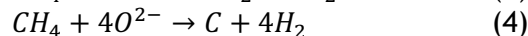
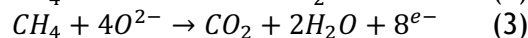
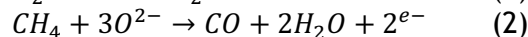
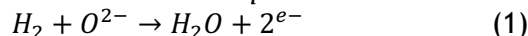


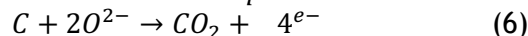
Fig 1. Esquema de funcionamiento de una celda SOFC, reproducida de [19]

Mientras que el ánodo es responsable de la oxidación del combustible, los iones de oxígeno que reaccionan en el cátodo como resultado de la reacción electroquímica en los sitios activos del catalizador, se transfieren a través del electrolito a la capa del ánodo, generando el flujo de electrones responsable de la corriente eléctrica generada en el circuito. Las condiciones de operación de las celdas SOFC están en el rango de temperatura entre 500°C 1000°C permitiendo una gran flexibilidad de operación para diversos combustibles gaseosos, de naturaleza convencional y de naturaleza renovable [20,21,22]. Las reacciones que ocurren de manera general en la celda son expresadas por las ecuaciones [25]:

Reacciones electroquímicas en el ánodo:



Reacciones electroquímicas en el cátodo:



La generación de corriente eléctrica se logra a través del circuito externo durante la transferencia de electrones producidos desde el ánodo hacia el cátodo. La captación de corriente se logra mediante el uso de colectores de corriente cerámicos o metálicos en ambos lados conocidos como interconectores. Por otra parte, las reacciones electroquímicas tienen lugar en las interfaces del ensamble electrodo-membrana (MEA) donde se encuentran un conductor de iones, un conductor electrónico, el electrocatalizador y los reactivos gaseosos. En ocasiones se mezcla una cierta cantidad de material electrolítico con el material catalizador correspondiente a fin de mejorar la conductividad iónica de los electrodos y expandir la capacidad de producción energética [20,26]

Las celdas SOFC se clasifican de acuerdo al tipo de iones conductores en los diferentes materiales electrolíticos, también al tipo de soporte de la celda, o según la temperatura de funcionamiento. Con relación al tipo de iones conductores estas pueden ser conductoras de iones de oxígeno, conductoras de protones o conductoras de iones mixtos o compuestos; según el tipo de soporte pueden ser con soporte de ánodo, cátodo, electrolito o sustrato poroso; y según la temperatura pueden ser a temperatura alta, intermedia o baja [3,20]

En el modo tradicional de transporte de iones de oxígeno, el oxígeno del aire se reduce a iones de oxígeno en el cátodo y se transfiere al ánodo a través del canal de vacancia de oxígeno mediante el impulso de la diferencia de concentración y la diferencia de potencial. En el modo de transporte de protones, las reacciones de oxidación de las moléculas de hidrógeno ocurren en el ánodo, impulsados por la diferencia de concentración y la diferencia de potencial, los iones de hidrógeno se transfieren al cátodo a través de la interfaz. Por último, los electrolitos cumplen el papel de conducir los iones de oxígeno requeridos para las reacciones electroquímicas con metano e hidrogeno, los cuales pueden doparse con metales como zirconio, serio, yitria y perovskitas; materiales que poseen elevada conductividad eléctrica, propiedades iónicas mejoradas y alto nivel de vacancias de oxígeno en su estructura cristalina [3,27].

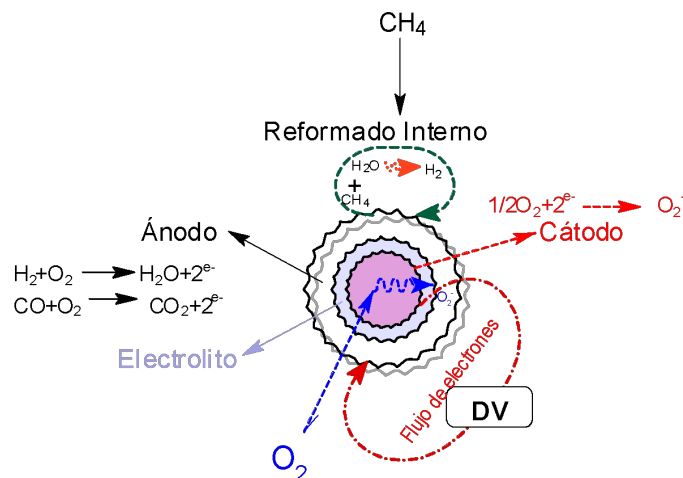


Fig 2. Principio esquemático del funcionamiento de las celdas SOFC y reacciones interfaciales en los poros, adaptado de [9]

El soporte empleado para los electrocatalizadores, presentan problemas difusionales, al reducirse espesor se mejora el rendimiento. El diseño de celda soportada en el ánodo es el más común. Sin embargo, las SOFC soportadas por electrolitos tienen estructuras relativamente fuertes y son menos susceptibles a fallas mecánicas. El uso de un nuevo material para soportar los dos electrodos y el electrolito aumenta la complejidad en el diseño de soporte poroso. La temperatura de funcionamiento de las SOFC está determinada principalmente por el tipo de material electrolítico utilizado pudiendo llegar a temperaturas de 1000 °C y manteniendo un promedio de 800 °C [20].

La comercialización exitosa de la tecnología SOFC ha sido impedida por una serie de factores como el alto costo de los materiales; el sellado de la estructura poco confiable; la susceptibilidad de la celda a fallar debido a cambios térmicos transitorios, el choque mecánico y la oxidación del ánodo; y los problemas de fabricación asociados con la producción de algunas piezas cerámicas grandes y complejas [28].

Este tipo de pilas de combustible vienen en muchas formas y se pueden combinar para formar una serie de unidades o apilamiento denominados *stacks*, ya que la mayoría de las pilas de combustible individuales son de tamaño pequeño (alrededor de 1 metro) y producen entre 0,5 y 0,9 voltios de electricidad [17].

3. ÁNODOS Y CÁTODOS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

El *ánodo* en una celda de combustible tipo SOFC debe ser un excelente conductor electrónico; a fin de que sea posible la migración de electrones por el circuito externo desde el ánodo hacia el cátodo, a la vez debe mantenerse estable en ambientes reductores del combustible y contar con una superficie porosa que permita el paso de gas reactivo hasta la capa de difusión de gas o *gas diffusion layer*. De igual forma debe ser compatible química, térmica y mecánicamente con el electrolito ya que mantienen contacto durante el proceso electroquímico [24,29]

En términos generales, el ánodo debe cumplir con ciertas condiciones asociadas a sus propiedades fisicoquímicas como son elevada conductividad eléctrica, una alta, conductividad iónica que permita la oxidación del hidrógeno en la superficie del catalizador, alta estabilidad química a bajas presiones parciales, elevada actividad catalítica de los sitios metálicos del catalizador seleccionado, altos coeficientes de expansión térmica, tener un área adecuada de contacto entre el gas y las superficies porosas, alta estabilidad en medios reductores y ser lo suficientemente delgada para evitar pérdidas de transferencia de masa sin afectar la distribución de la corriente y sin promover la formación de corrientes residuales [24,30]

Entre los materiales más empleados se encuentran el Níquel (Ni^{+2}) el cual tiene un costo relativamente bajo y cumple con la mayoría de los requerimientos en concentraciones entre el 40 y 60%. Luego se destaca el Cobre (Cu^{+2}), estos materiales han demostrado mayor resistencia a la deposición de carbón y menor sinterización a una concentración promedio del 40%. De igual forma se emplean materiales lantánidos, como una alternativa para

mejorar las propiedades catalíticas en términos de resistencia a la deposición de coque, a expensas de un costo mayor a medida que el proceso es escalado a nivel macroscópico. Otra alternativa es el Cerio (Ce^{+2}), el cual opera a bajas temperaturas con una conductividad iónica y electrónica aceptable en atmósferas reductoras. Por último, se destaca las Perovskitas, las cuales presentan altas propiedades de oxigenación [24,31]

El *cátodo* es el componente de la celda, donde se reduce el O^2 a iones de O^{2-} , el cual desempeña funciones de limitar la resistencia de la celda especialmente a bajas temperaturas. Entre las propiedades importantes de los materiales del cátodo, estos deben poseer, alta conductividad eléctrica, excelente compatibilidad química con el electrolito, deben tener porosidad suficiente para permitir la difusión de oxígeno, tamaño suficiente de la capa de difusión de gas, una alta conductividad iónica, adhesión a la superficie del electrolito, coeficiente de expansión térmica similar a los demás componentes empleados en la celda SOFC [24].

Los materiales empleados para el cátodo suelen ser a base de lantano dopado, debido a su compatibilidad con electrolitos de ZrO_2 y *Yittria estabilizada*, otro material de interés es el Praseodimio (Pr) el cual ofrece una reducción del sobrepotencial del cátodo y una elevada actividad catalítica en comparación al Lantano, el Samario (Sm) aunque dado su costo no suele ser muy empleado, el Gadolinio (Gd) suele ser ideal para reacciones de electrooxidación a temperaturas moderadas, todos estos materiales presentan limitaciones operacionales similares [24].

Finalmente, un componente fundamental en la celda es el electrolito, el cual es un óxido sólido que transporta la carga de O^{2-} e inhibe el transporte de electrones forzándolos a circular a través del circuito externo, adicionalmente separando las semirreacciones de oxidación y reducción. Los electrolitos pueden ser clasificados de acuerdo con el número de capas que lo constituyen y deben cumplir con determinadas condiciones asociadas a sus propiedades fisicoquímicas, en resumen, deben ser materiales iónicos, aislantes eléctricos, deben ser químicamente estables a altas temperaturas, inertes a los gases combustibles, sus propiedades de expansión térmica deben ser compatibles con los electrodos, y relativamente baratos para que sean escalables [24].

El electrolito se consolida como un óxido cerámico que permite el transporte del ion transportador generando la

transferencia de electrones, el cátodo y ánodo son electrodos que se encargan de reducir el oxígeno y oxidar electroquímicamente el combustible generando la reacción deseada, el interconector se une con el cátodo y protege al electrolito de las condiciones del entorno, y los sellos se utilizan en algunos diseños planares y su función es unir los componentes de la celda [24,32].

Los materiales de preferencia son a base de óxido de Zirconio (ZrO_2) dopado típicamente con Yittria, escandio, MgO y Samario, estas mezclas de óxidos cerámicos mixtos, exhiben excelentes propiedades térmicas y mecánicas. Por otro lado, materiales basados en el óxido de Cerio (CeO_2) dopados con gadolinio, Samario, Yittria y Calcio, presentan mejoras en su propiedad térmica, mecánicas y electroquímicas. Estos dos elementos dopados, exhiben alta resistencia protónica y excelentes propiedades de almacenamiento de oxígeno, debido al nivel de vacancias de oxígeno que presentan en su estructura cristalina dada por sus defectos superficiales y sus propiedades electrónicas [24].

De este modo se logra determinar que existen diferentes alternativas de materiales para el desarrollo de las celdas SOFC donde cada uno de ellos cuenta con características puntuales que se ajusten en mayor o menor medida a los requerimientos solicitados para cada uno de los componentes de este tipo de celdas. Es importante destacar que se procura mejorar las condiciones de costo y acceso a estos materiales a la vez que logren desempeñar eficientemente su función en el proceso sin alterar de forma negativa los potenciales y corrientes resultantes [24]. La Tabla 1 muestra los materiales utilizados en la fabricación de celdas de combustible tipo SOFC.

La morfología de los materiales afecta el cómo procede la reacción electroquímica en términos del mecanismo de reacción de los gases sobre Níquel en fase metálica, sugiriendo que el ion transportador se moviliza más fácilmente en sistemas con alto nivel de vacancias y alta área superficial expuesta. Las Imágenes de las Figuras 3 y 4 muestran las morfologías (SEM y HR-TEM) típicas de catalizadores de níquel soportados en diferentes materiales, evidenciando materiales nanodispersos y presencia de formación de coque causada por los fenómenos electroquímicos en la superficie de los electrocatalizadores con apariencia de *nanofibras*, por los efectos de formación de carbono (Grafito) con morfología de nanotubos de carbono.

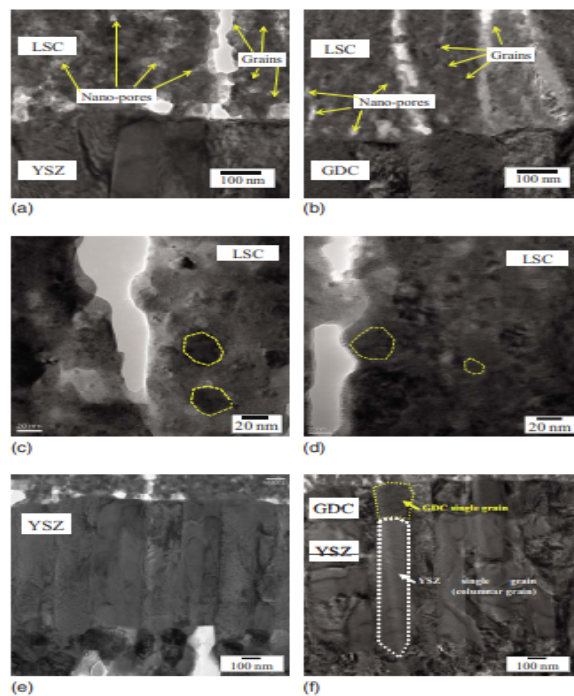


Fig 3. a) imágenes de HR-TEM de cátodos de NiO/ZrO₂-yttria-stabilizada (YSZ) a diferentes magnificaciones: (a). región concentrada de 100 nm (b) regiones con menor ampliación (c,d). ampliación a 20 nm (d) región de contacto entre el catalizador y electrolito [33]

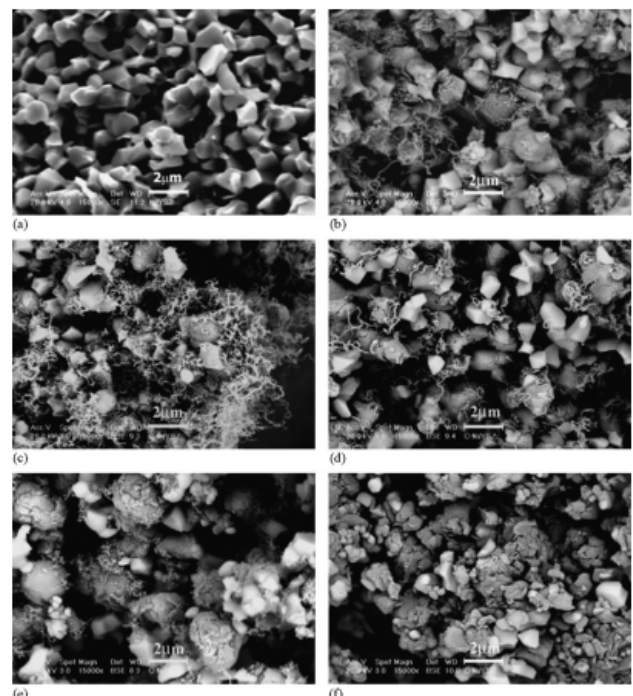


Fig 4. Imágenes SEM de Ni-YSZ (a) preparadas, tras deposición de carbono en metano humidificado durante 4 horas a (b) 500 °C, (c) 600 °C y en la superficie a (d) 600 °C, (e) 700 °C y (f) 800 °C. Todas las imágenes son del centro del pellet, excepto (c) [34].

Tabla 1. Materiales para el ánodo, cátodo y electrolito en una celda SOFC [7]

Electrolito	Ánodo	Cátodo
Zirconio (YSZ, SSZ) operable entre 800 y 1.000°C al presentar buenas propiedades térmicas y mecánicas. Cerio (GDC, SDC, YDC) el cual es inestable bajas presiones parciales de oxígeno, así como por encima de los 700°C.	Níquel (Ni-O/YSZ, SSZ, GDC, SDC) en concentraciones de 40-60%. Porosidad recomendada entre 20 y 40%.	Lantano (LSM, LSF, LSC, LCM, LNF) siendo el cátodo más popular para celdas SOFC de alta temperatura.
Lantano (LSGM, LSGMC, LSGMF) se consolida como una alternativa para los materiales de Zirconia y Cerio.	Cobre (CuO ₂ YSZ, YZT) con un comportamiento estable entre los 600 y 700°C con un peso ponderado del 40%.	Gadolinio (GSC, GSM) el cual es buen prospecto para bajas temperatura
Otros Materiales (BCY, YSTh, Bismuto, Pirocloros, Estroncio y Bario)	Lantano (LST, LAC), el cual ofrece una gran resistencia a temperaturas superiores a los 1.000°C	Praseudimio (PCM, PSM, PBC) el cual respecto al Lantano ofrece una disminución en el sobre potencial del cátodo así como elevada actividad catalítica
	Otros Materiales (GDC, YSZ, Cobalto, Platino)	Estroncio (SSC, NSC) el cual cuenta con un elevado costo aunque permite trabajar en temperaturas superiores a los 900°C.
		Itrya (YSCF, YCCF) el cual se considera bueno en el rango de temperaturas intermedias

4. CONFIGURACIÓN DEL STACK DE CELDAS SOFC

El funcionamiento de las celdas SOFC pueden adoptar diferentes configuraciones en la modalidad de módulos o Stack, de dos tipos: Planar y Tubular. La configuración tubular está compuesta de tubos conectados en serie o en

paralelo el cual proporciona una elevada densidad de potencia mejorando de forma importante la capacidad de generación eléctrica. Por su parte, el diseño planar se compone por una serie de placas rectangulares o circulares para facilitar el flujo de los reactivos, los cuales en conjunto forman una celda. La Figura 5 muestra las dos posibles configuraciones geométricas de la celda que determinan los patrones de flujo del sistema [24,35].

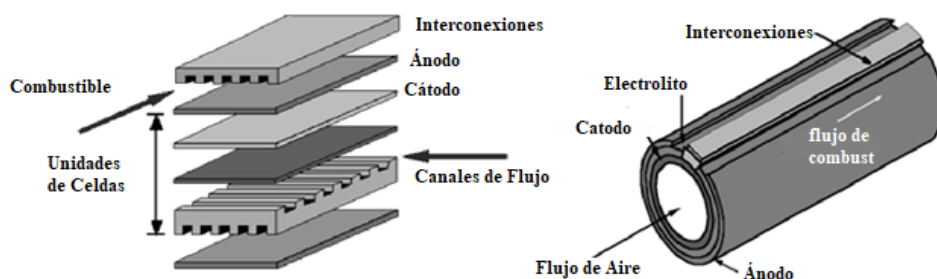


Fig 5. Configuración Tubular (a) y Planar (b) de una celda SOFC [20].

La diferencia entre estas configuraciones se centra en las densidades de potencia generadas, donde para el caso de la configuración tubular (Figura 5a) se ofrece una mayor resistencia eléctrica dada la distancia que los electrones deben recorrer, aunque a costo de largos periodos de operación [24].

Por otra parte, la configuración planar (Figura 5b) se considera más efectiva pero así mismo se incurre en mayores costos de fabricación y operación en comparación al modelo tubular debido a la necesidad de crear microcanales finos para los gases y detalles internos de gran importancia. Tanto el diseño tubular como el planar, están constituidos por los componentes principales siguientes: electrolito, ánodo, cátodo interconector y sellos [36,37]

Independientemente del diseño o configuración que tenga la celda SOFC, se busca reducir los costos de operación por medio de un mayor control de las temperaturas de funcionamiento. Específicamente, para los diseños donde su temperatura oscila entre 850 y 1000°C, se puede reducir a 750 -850°C (temperatura intermedia) o incluso entre 500 y 750°C (temperatura baja). Esto dado a que, a menor temperatura, los materiales que suelen emplearse son más comunes y de menor costo como son los conectores metálicos, o componentes de menor grosor y resistencia [24,38].

Estos diseños básicos, son susceptibles a modificaciones a fin de optimizar la fluidodinámica y turbulencia, como la adición de flujos adicionales de aire que contribuyan a la transferencia de calor, aunque esto aún está en estudio específicamente para el caso de la configuración planar [39].

Adicionalmente, pueden encontrarse diseños complementarios enfocados al mayor aprovechamiento del combustible empleado destacando principalmente cuatro los cuales varían de acuerdo al lado en que se ubica el ánodo y el cátodo [40,41]

En términos de integración energética las celdas SOFC pueden combinarse con ciclos de cogeneración. Santin y Colaboradores [40], presentan la optimización de celdas SOFC adaptada con sistemas híbridos y utilizando combustibles líquidos, mostrando diseños que utilizan intercambiadores de calor de alta temperatura, integrados a un SOFC tubular, para precalentar el aire de entrada del cátodo (diseño TSOFC), un segundo diseño usa la recirculación de los gases de escape del quemador en la entrada del cátodo, con un SOFC planar (diseño PSOFC). En el lado del ánodo (lado del combustible), se consideraron dos opciones de tratamiento del combustible: Procesar el combustible dentro de circuito de recirculación del ánodo (IR) o un circuito externo de flujo (ER). Estos cuatro diseños se denominan TSOFC-IR, TSOFC-ER, PSOFC-IR y PSOFC-ER y se ilustran en la Figura 6 [40].

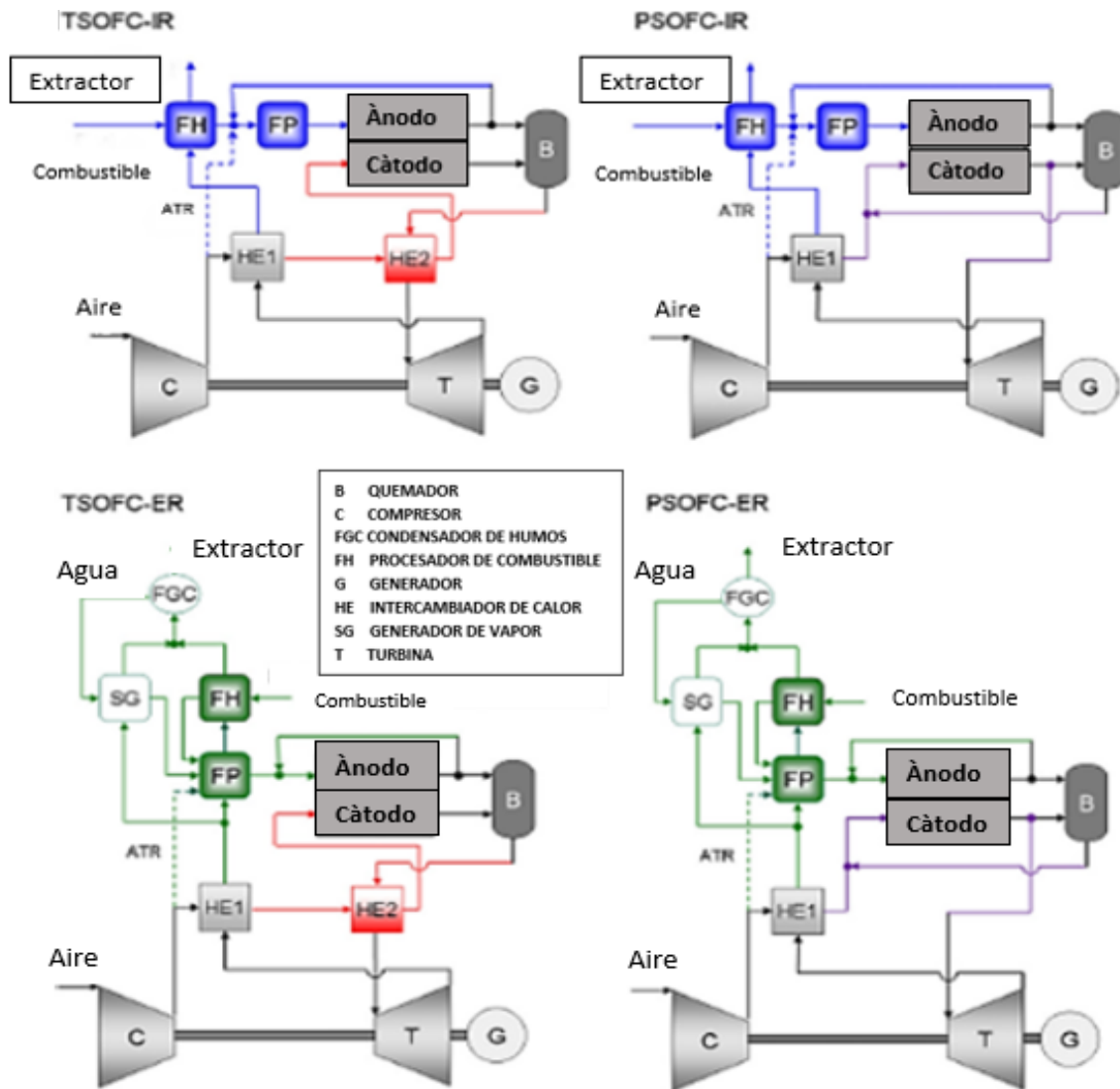
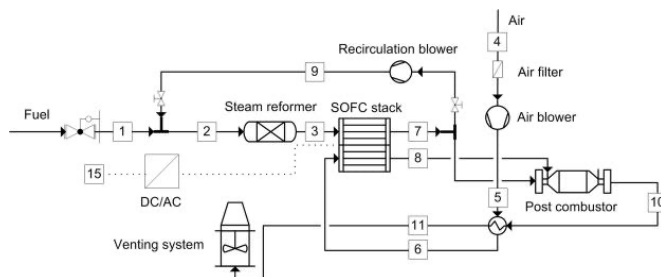


Fig 6. Configuraciones de los ciclos híbridos con celdas SOFC [40].

5. INTEGRACIÓN ENERGÉTICA

[illegible]

preciosos [7].

En parte por razones económicas, abundancia y alta actividad catalítica, el metal de transición que es más utilizado es el Níquel, el cual ha sido tradicionalmente el electrocatalizador más preferido y comúnmente utilizado para los ánodos de SOFC, aunque principalmente para la oxidación de hidrógeno. Sin embargo, con metano, el Níquel desactiva rápidamente, adicionalmente el gas natural que contiene azufre puede envenenar el catalizador, el desafío finalmente está en desarrollar electrocatalizadores más resistentes a la deposición y al envenenamiento de azufre para la conversión de gas natural a electricidad. [7]. Se ha reportado el uso del biogás como combustible en celdas SOFC para aplicaciones estacionarias, el biogás es un combustible prometedor para este tipo de celdas ya que no es necesario eliminar ni CO ni el vapor de agua. Sin embargo, el biogás crudo a menudo contiene cantidades considerables de compuestos traza indeseables como el sulfuro de hidrógeno y los *siloxanos* que pueden causar la degradación de las SOFC a concentraciones muy bajas. La cantidad de estos contaminantes varía ampliamente según las condiciones de funcionamiento de la unidad de producción de biogás y la composición de la materia prima cruda [46,47,48].

Con la implementación continua de sistemas de biogás y SOFC, es posible evaluar la viabilidad económica determinando dos desafíos importantes. Primero, la economía de la unidad de limpieza de gas, ya que el suministro de biogás limpio para SOFC aumenta el costo de limpieza del gas, y segundo el costo de la celda SOFC. La evaluación tecnoeconómica del sistema de biogás-SOFC puede ser útil para ilustrar los obstáculos operacionales [46,49,50].

Aunque la producción de biogás mediante digestión anaerobia de biomasa se ha investigado exhaustivamente y de manera comercial, el biogás en sí se utiliza solamente para la producción de calor y electricidad en motores de gas y unidades de cogeneración o para la inyección de gas a la red, después de lo cual se quema una gran parte, para la generación de calor a baja temperatura [46,47].

Aun así, los sistemas SOFC brindan una buena oportunidad para aplicaciones futuras empleando Biogás debido a la alta eficiencia, la flexibilidad del combustible y ambiente de reducción de emisiones que podría ofrecer a futuro. El biogás como combustible renovable se adapta bien a los sistemas SOFC a pesar de la fluctuación de la presión parcial de metano en el biogás. El calor residual puede mejorar la producción de biogás en el proceso mediante el pretratamiento térmico de los lodos, donde uno de los

principales desafíos sería la durabilidad de la operación con respecto a sus contaminantes [10,47].

Por último, el costo de las celdas SOFC es una barrera importante para la evolución de estos sistemas integrados de cogeneración. Sobre la base de las investigaciones en nanomateriales y nuevas técnicas de fabricación, se espera que los costos de las celdas SOFC se reduzcan. [10,51]

7. CONCLUSIONES

Las celdas SOFC se consolidan como una alternativa viable para la generación de energía eléctrica a menor impacto ambiental y empleando para ello como fuente diferentes tipos de combustible entre los que se destacan el Gas Natural y el Biogás. La producción de biocombustibles gaseosos, se ha impulsado considerablemente a fin de disminuir el uso de recursos fósiles los cuales se sabe ampliamente cuentan con un potencial negativo de acelerar los procesos de calentamiento global.

En conclusión, las celdas SOFC son dispositivos ecoeficientes de producción de energía mediante el aprovechamiento de gases responsables de efecto invernadero, es decir corrientes gaseosas conteniendo CH₄, CO, CO₂ y H₂S. Los modelos de integración energética que contemplan celdas SOFC muestran eficiencias superiores a los ciclos térmicos, entre 85 y 96% en los mejores panoramas, todo esto con factores adicionales como la posibilidad de desarrollar sistemas híbridos con energías renovables como la energía eólica, la energía solar y el uso de biomasa para la producción de Biogás y consumo de las celdas SOFC.

Así, el gas natural y el biogás resultan supremamente importante para el aprovechamiento energético con este tipo de tecnologías electroquímicas que al no generar combustión convencional permiten su transformación en hidrógeno y energía eléctrica, sin embargo, para su escalado a nivel industrial deben considerarse factores como el tratamiento de las emisiones de fluegas generadas en el proceso, a través de procesos de Oxidación selectiva.

Por otra parte, se debe destacar que de por sí el desarrollo masivo y comercial de las celdas SOFC supone un esfuerzo económico considerable a fin de consolidarlo como una fuente estable y suficiente de energía, por lo que adaptar dicho proceso al uso de fuentes combustibles renovables supone un costo adicional. Mientras que, para el caso del Gas Natural, se deben establecer mecanismos que reduzcan la cantidad de contaminantes generados destacando que se emplearía principalmente el metano y podrían producirse sustancias con potencial de envenenamiento.

En definitiva, estos tipos de combustible alternos suponen una oportunidad adicional para reducir la cantidad de emisiones contaminantes generadas durante el proceso de generación de energía eléctrica, aunque implican un apoyo económico importante que permita solucionar falencias identificadas requiriendo para ello el desarrollo de investigaciones complementarias. Aun así, una vez establecidas condiciones ideales para su uso, se consolida como una alternativa viable empleando combustibles con el potencial suficiente para suplir la demanda energética actual.

8. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad ECCI especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica, así como a la asesoría y acompañamiento del Profesor Alberth Renne Gonzalez Caranton quien estuvo presente en el desarrollo de esta investigación.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Hagen, H. Langnickel y X. Sun, «Operation of solid oxide fuel cells with alternative hydrogen carriers,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, n° 33, pp. 18382-18392, 2019.
- [2] Y. Yang, Z. Li, R. Bian y Z. Su, «Fault diagnosis of SOFC system based on single cell voltage analysis,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 48, pp. 24531-24545, 2021.
- [3] Y. Lyu, J. Xie, D. Wang y J. Wang, «Review of cell performance in solid oxide fuel cells,» *Springer*, p. 24, 2020.
- [4] A. Abdalla, H. Shahzad, A. Atia, P. Mohammad, B. Feroza, E. Sten y A. Abul, «Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 353-368, 2018.
- [5] Z. Zezhi, Q. Yuping, Z. Yangjun, H. Changkun, D. Dan y Z. Weilin, «A review of heat transfer and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks,» *Applied Energy*, vol. 280, p. 115899, 2020.
- [6] S. Shcheklein y A. Dubinin, «Hydrogen-methanol SOFCs for transport,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 51, pp. 25871-25877, 2021.
- [7] G. Turgut, «Comprehensive review of methane conversion in solid oxide fuel cells: Prospects for efficient electricity generation from natural gas,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 54, pp. 1-64, 2016.
- [8] M. Andersson, J. Yuan y B. Sundén, «SOFC modeling considering electrochemical reactions at the active three phase boundaries,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, n° 4, pp. 773-788, 2012.
- [9] B. Cheng, W. Ying, F. Daili, J. Zeyi y Z. Xinxin, «Macroscopic modeling of solid oxide fuel cell (SOFC) and model-based control of SOFC and gas turbine hybrid system,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 66, pp. 83-140, 2018.
- [10] A. Saabadabi, A. Thallam, L. Fan, R. Lindeboom, H. Spanjers y P. Aravind, «Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints,» *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 194-214, 2019.
- [11] H. Reza, H. Pourrahmani, N. Chitgar y J. V. Herle, «Thermodynamic analysis of a tri-generation system using SOFC and HDH desalination unit,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1-12, 2021.
- [12] M. Santarelli, F. Quesito, V. Novaresio, C. Guerra, A. Lanzini y D. Beretta, «Direct reforming of biogas on Ni-based SOFC anodes: Modelling of heterogeneous reactions and validation with experiments,» *Journal of Power Sources*, vol. 242, pp. 405-414, 2013.
- [13] S. Inac, S. Ozen y A. Midili, «Global warming, environmental and sustainability aspects of a geothermal energy based biodigester integrated SOFC system,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 60, pp. 35039-35052, 2020.
- [14] A. Hajimolana, A. Hussain, A. Wan Daud, S. Soroush y A. Shamiri, «Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1893-2017, 2011.
- [15] R. Napoli, M. Gandiglio, A. Lanzini y M. Santarelli, «Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-CHP fuel cell systems for the residential sector,» *Energy and Buildings*, vol. 103, pp. 131-146, 2015.
- [16] A. Rady, S. Giddey, S. Badwal, B. Ladewig y S. Bhattacharya, «Review of Fuels for Direct Carbon Fuel Cells,» *Energy Fuels*, vol. 26, pp. 1471-1488, 2012.
- [17] B. Stambouli y E. Traversa, «Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, pp. 433-455, 2002.
- [18] C. Sun, R. Hui y J. Roller, «Cathode materials for solid oxide fuel cells: a review,» *J Solid State*

- Electrochem*, vol. 14, pp. 1125-1144, 2010.
- [19] H. Taroco, J. Santos, R. Domingues y T. Matencio, «Ceramic Materials for Solid Oxide Fuel Cells,» *Universidade Federal de Minas Gerais*, pp. 423-446, 2011.
- [20] B. Timurkutluk, C. Timurkutluk, M. Mat y Y. Kaplan, «A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1101-1121, 2016.
- [21] X. Zhang, S. Chan, G. Li, H. Ho, J. Li y Z. Feng, «A review of integration strategies for solid oxide fuel cells,» *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 685-702, 2010.
- [22] R. Roushenas, A. Reza, M. Soltani, M. Torabi, M. Dusseault y J. Nathwani, «Thermo-environmental analysis of a novel cogeneration system based on solid oxide fuel cell (SOFC) and compressed air energy storage (CAES) coupled with turbocharger,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 181, p. 1159978, 2020.
- [23] H. Wang, Z. Yu, D. Wang, G. Li y G. Xu, «Energy, exergetic and economic analysis and multi-objective optimization of atmospheric and pressurized SOFC based trigeneration systems,» *Energy Conversion and Management*, vol. 239, p. 114183, 2021.
- [24] J. Alvarado y J. Ávalos, «Materiales para ánodos, cátodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC),» *Revista Mexicana de Física*, vol. 59, pp. 66-87, 2013.
- [25] X. Wang, X. Lv y Y. Weng, «Performance analysis of a biogas-fueled SOFC/GT hybrid system integrated with anode-combustor exhaust gas recirculation loops,» *Energy*, vol. 197, pp. 117-213, 2020.
- [26] V. Haanappel y M. Smith, «A review of standardising SOFC measurement and quality assurance at FZJ,» *Journal of Power Sources*, vol. 171, n° 1, pp. 169-178, 2007.
- [27] J. Hossein, R. Ali, M. Niaz, M. Hussain, I. Shakir y R. Raza, «Modeling and simulation of planar SOFC to study the electrochemical properties,» *Current Applied Physics*, vol. 20, pp. 660-672, 2020.
- [28] M. Tucker, «Progress in metal-supported solid oxide fuel cells: A review,» *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 4570-4582, 2010.
- [29] C. Berges, A. Wain, R. Andújar, A. Naranjo, A. Gallejo, E. Nieto, G. Herranz y R. Campana, «Fused filament fabrication for anode supported SOFC development: Towards advanced, scalable and cost-competitive energetic systems,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 51, pp. 26174-26184, 2021.
- [30] E. Agarkova, I. Burmistrov, D. Yalovenko, D. Agarkov, S. Rabotkin, A. Solovyev y M. Levin, «Relationships between mechanical stability of the anode supports and electrochemical performance of intermediate-temperature SOFCs,» *Materials Letters*, vol. 303, p. 130516, 2021.
- [31] J. Alvarado, I. Espitia, J. Espino y A. Reyes, «Impregnación de la perovskita $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ como ánodo en celdas SOFC Impregnation of $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta} + \text{Cu}$ perovskite as the anode for SOFCs,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 54, n° 5, pp. 198-208, 2015.
- [32] A. Hagen, A. Wulff, P. Ziekle, X. Sun, B. Talic, I. Ritucci, H. Frnadsen, S. Jensen, W. Kiebach y P. Hendricksen, «SOFC stacks for mobile applications with excellent robustness towards thermal stresses,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 53, pp. 29201-29211, 2020.
- [33] H. S. Noh, J. Park, H. Lee, H. Lee, J. Lee y J. W. Son, «Transmission Electron Microscopy Study on Microstructure and Interfacial Property of Thin Film Electrolyte SOFC,» *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 14, n° 2, pp. 26-29, 2011.
- [34] W. Wang, C. Su, Y. Wu, R. Ran y Z. Shao, «Progress in Solid Oxide Fuel Cells with Nickel-Based Anodes Operating on Methane and Related Fuels,» *Chemical Reviews*, vol. 113, pp. 8104-8151, 2013.
- [35] Y. Jin, W. Nam, J. Haeng, H. Jin, K. Sik, D. Gu y M. Chul, «Design and analysis of SOFC stack with different types of external manifolds,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 53, pp. 29143-29154, 2020.
- [36] L. Tan, X. Dong, C. Chen, Z. Gong y M. Wang, «Diverse system layouts promising fine performance demonstration: A comprehensive review on present designs of SOFC-based energy systems for building applications,» *Energy Conversion and Management*, vol. 245, p. 114539, 2021.
- [37] V. Somano, D. Ferrero, M. Santarelli y D. Papurello, «CFD model for tubular SOFC directly fed by biomass,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 33, pp. 17421-17434, 2021.
- [38] W. Quadakkers, J. Piron, V. Shemet y L. Singheiser, «Metallic interconnectors for solid oxide fuel cells – a review,» *Materials at High*

- Temperatures*, vol. 20, n° 2, pp. 115-127, 2003.
- [39] V. Periasamy, H. Shahin y T. Moses, «A novel concept for improved thermal management of the planar SOFC,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, pp. 560-572, 2013.
- [40] M. Santin, A. Traverso, L. Magistri y A. Massardo, «Thermoeconomic analysis of SOFC-GT hybrid systems fed by liquid fuels,» *Energy*, vol. 35, pp. 1077-1083, 2010.
- [41] J. Peng, J. Huang, X. Wu, Y. Wu, H. Chen y X. Li, «Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review,» *Journal of Power Sources*, vol. 505, p. 230058, 2021.
- [42] X. Wang, X. Lv y Y. Weng, «Performance analysis of a biogas-fueled SOFC/GT hybrid system integrated with anode-combustor exhaust gas recirculation loops,» *Energy*, vol. 197, p. 117213, 2020.
- [43] S. Song, X. Xiong, X. Wu y Z. Xue, «Modeling the SOFC by BP neural network algorithm,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 38, pp. 20065-20077, 2021.
- [44] Y. Sang, Y. Duk y K. Young, «System integration and proof-of-concept test results of SOFC-engine hybrid power generation system,» *Applied Energy*, vol. 277, p. 115542, 2020.
- [45] J. Peng, J. Huang, X. Wu, Y. Xu, H. Chen y X. Li, «Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review,» *Journal of Power Sources*, vol. 505, p. 230058, 2021.
- [46] A. Saadabadi, A. Thallam, L. Fan, R. Lindeboom, H. Spanjers y P. Aravind, «Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints,» *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 194-214, 2019.
- [47] O. Norouzi, F. Di Maria y M. El Hoz, «A short review of comparative energy, economic and environmental assessment of different biogas-based power generation technologies,» *Energy Procedia*, vol. 148, pp. 846-851, 2018.
- [48] N. Kamalimeera y V. Kirubakaran, «Prospects and restraints in biogas fed SOFC for rural energization: A critical review in indian perspective,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110914, 2021.
- [49] Y. Wang, L. Wehrle, A. Banerjee y Y. Shi, «Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling,» *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 78-87, 2021.
- [50] K. Takino, Y. Tachikawa, K. Mori, S. Lyth, Y. Shiratori, S. Taniguchi y K. Sasaki, «Simulation of SOFC performance using a modified exchange current density for pre-reformed methane-based fuels,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 11, pp. 6912-6925, 2020.
- [51] J. Van Herle, Y. Membrez y O. Bucheli, «Biogas as a fuel source for SOFC co-generators,» *Journal of Power Sources*, vol. 127, n° 1-2, pp. 300-312, 2004.
- [52] M. Rojas, «Tipos de Investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación,» *REDVET - Revista electrónica de Veterinaria*, vol. 16, n° 1, pp. 1-14, 2015.