



Pontificia Universidad Católica de Chile
Facultad de Ingeniería
Departamento de Química y Bioprocesos
IIQ3843 - Procesamiento de hidrógeno para energías sostenibles

Modelado y simulación de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC) alimentada con hidrogeno a diferentes temperaturas

Estudiante: Catalina Arcila Restrepo

Profesor: Felipe Huerta

Ayudantes: Sebastián Ormazábal y Junior Lorenzo Llanes

Curso: Procesamiento de hidrógeno para energías sostenibles

Lunes 18, de noviembre de 2024

Índice

1.	Introducción	3
2.	Contexto	3
3.	Principio de operación.....	6
4.	Desarrollo del Modelo OpenFuelCell2	7
4.1	Conservación de Masa.....	8
4.2	Conservación de Cantidad de Movimiento.....	8
4.3	Conservación de Energía	8
4.4	Transporte de Especies	9
4.5	Reacciones Electroquímicas	9
5.	Simulación.....	10
5.1	Modificación de parámetros	10
5.2	Configuración para Estado Estacionario y Transitorio	11
6.	Resultados y análisis simulación.....	11
6.1	Gráfico de Voltaje (V) vs. Posición (X).....	11
6.2	Gráfico de Corriente (I) vs. Posición (X)	13
6.3	Curva de Polarización.....	14
6.4	Gráfico de Temperatura (T) vs. Posición (X)	15
7.	Conclusiones	16
8.	Referencias.....	18

1. Introducción

Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) son dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química de un combustible (como hidrógeno, amoníaco o metano) en energía eléctrica y calor. Operan a altas temperaturas (700–1000°C), lo que les permite lograr eficiencias superiores al 60% en la conversión de energía química en eléctrica, y hasta un 85% en configuraciones de cogeneración. Su alta eficiencia, flexibilidad en la elección de combustibles, y bajas emisiones las posicionan como una tecnología clave en la transición energética sostenible (Lysunen et al., 2021).

El propósito de este proyecto es evaluar el desempeño de una SOFC utilizando el software OpenFuelCell2. Este análisis se centra en el impacto de parámetros operativos, como la temperatura, sobre las variables clave del sistema, incluyendo el voltaje, la densidad de corriente y la distribución de temperatura.

2. Contexto

Las SOFC son particularmente relevantes en el contexto de la sostenibilidad debido a su capacidad de utilizar combustibles renovables o sintéticos como el hidrógeno verde o el amoníaco, minimizando las emisiones de carbono. Además, sirven como sistemas de almacenamiento y conversión de energía, integrándose con fuentes renovables intermitentes (solar, eólica) para garantizar estabilidad en la red eléctrica. Finalmente, las SOFC reducen la dependencia de combustibles fósiles mediante la utilización eficiente de biocombustibles o combustibles reformados (Singh et al., 2021). En la figura 1 se observa la relación de las pilas de combustible de hidrógeno con la generación de energía distribuida.

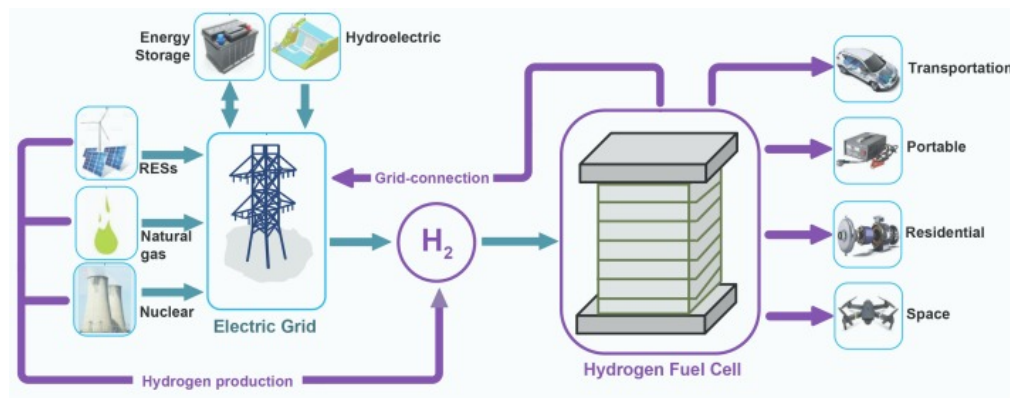


Figura 1: Relación de las pilas de combustible de hidrógeno con la generación de energía distribuida y las aplicaciones de consumo. Fuente: Inci, 2022.

En el mundo, hay innovaciones como el uso de nanoestructuras, impresión 3D para reducir costos de fabricación, y la integración de SOFC con sistemas híbridos como microturbinas o dispositivos CHP están mejorando la eficiencia general y la viabilidad económica. Las herramientas avanzadas de modelado y simulación son esenciales para optimizar el diseño y

comprender los fenómenos que afectan el rendimiento (Abdalla et al., 2020). En Japón, las innovaciones en SOFC están impulsadas por la necesidad de independencia energética y sostenibilidad. Instituciones gubernamentales como el MITI y la NEDO han liderado programas de investigación a gran escala, como ENE-FARM, centrados en sistemas de celdas de combustible estacionarias para aplicaciones residenciales y comerciales. Japón se enfoca en tecnologías básicas de materiales, con empresas que trabajan en cerámicos avanzados y componentes críticos para mejorar la eficiencia y durabilidad de las SOFC. Este enfoque coordinado entre el gobierno y la industria refleja una estrategia a largo plazo para integrar las SOFC en la infraestructura energética del país. Por otro lado, en los Estados Unidos, el desarrollo de SOFC ha sido impulsado por objetivos estratégicos relacionados con la defensa, la exploración espacial y la modernización de la infraestructura energética. Programas como el SECA, financiados por el Departamento de Energía, buscan reducir los costos de producción y aumentar el rendimiento para aplicaciones como redes eléctricas descentralizadas y sistemas militares. El enfoque competitivo del país fomenta la innovación a través de startups y colaboraciones universidad-industria (Fernandes et al., 2020). En Europa, se han instalado más de 2000 micro-CHP con celdas de combustible, con capacidades de hasta cientos de kW para SOFC y 1.4 MW para MCFC. Se espera que para 2030, los costos de inversión (CAPEX) disminuyan de 10,000 €/kW a 2000 €/kW y los costos de operación a 2 €/kW, mientras que la degradación de las celdas podría reducirse significativamente, aumentando su vida útil. Además, se prevé una amplia adopción de micro-CHP con más de 2.5 GW instalados y ventas anuales de 500 MW, destacando la capacidad reversible de las SOFC para generar hidrógeno o syngas limpio según sea necesario. La figura 2 ilustra la hoja de ruta europea a medio plazo para la presente década (2020-2030) en relación con la difusión de los sistemas de pilas de combustible de alta temperatura como cogeneración (Corigliano et al., 2022).

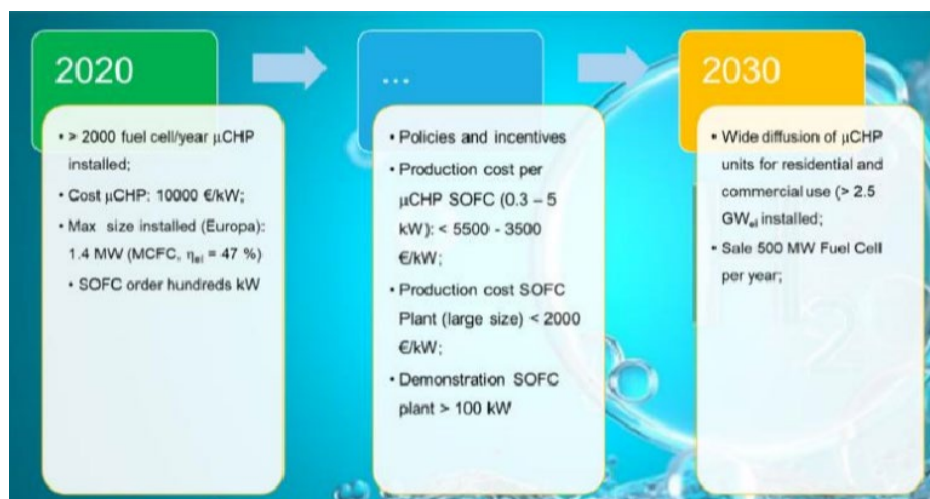


Figura 2: Plan europeo de las pilas de combustible. Fuente: Corigliano et al., 2022.

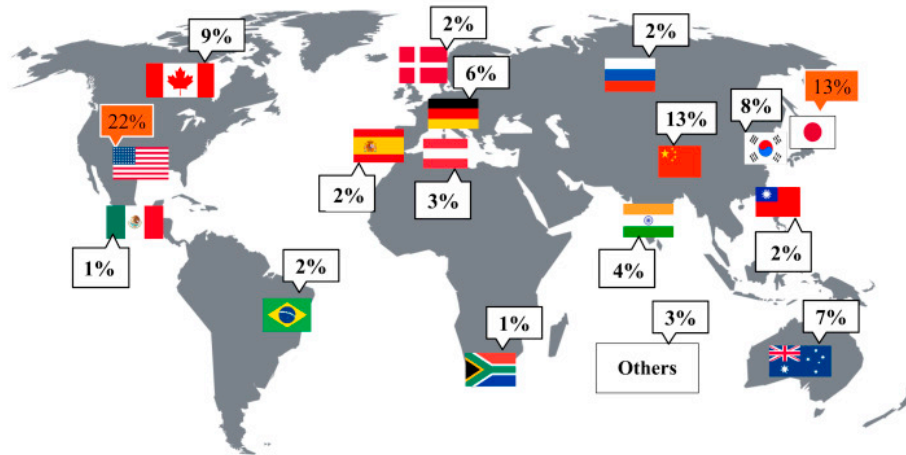
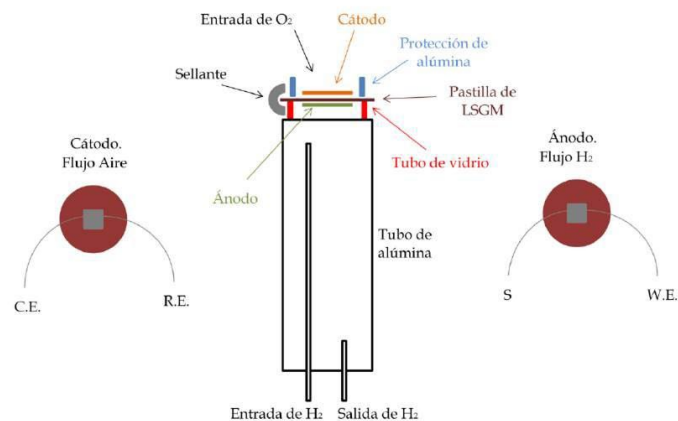


Figura 3: Actividad de patentamiento de los solicitantes de SOFC. Fuente: Fernandes et al., 2020

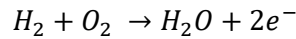
En Chile, la investigación y el desarrollo de las SOFC están enfocados principalmente en dos áreas: simulación computacional y experimentación en laboratorio. Aunque no existen proyectos industriales implementados actualmente, estas actividades son fundamentales para sentar las bases para el desarrollo futuro de esta tecnología. La simulación computacional es una herramienta clave para el diseño y análisis de SOFC en Chile. Estas investigaciones buscan comprender el comportamiento electroquímico, térmico y de transporte de especies en estas celdas bajo diferentes condiciones operativas. Estudios como Díaz et al. (2024) se centra en el análisis de SOFC alimentadas con amoníaco e hidrogeno como combustible. El estudio aborda cómo la temperatura de operación influye en el rendimiento electroquímico y térmico de las SOFC cuando se utiliza amoníaco, un portador de hidrógeno prometedor para aplicaciones energéticas sostenibles. Por otro lado, estudios experimentales Martínez-Coronado et al. (2012) y Loreto Troncoso, con el horno de alta temperatura y su configuración para las SOFC.



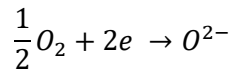
3. Principio de operación

Las SOFC son dispositivos electroquímicos que convierten energía química en eléctrica y térmica mediante reacciones redox. Una SOFC consta de tres componentes principales: el ánodo, donde ocurre la oxidación del combustible y se liberan electrones hacia el circuito externo; el cátodo, donde el oxígeno molecular se reduce para formar iones de oxígeno (O^{2-}) que migran hacia el ánodo; y el electrolito, una cerámica densa que transporta los iones de oxígeno entre los electrodos y aísla los gases para evitar su mezcla. Las interconexiones conectan múltiples celdas, formando un sistema multicelda eficiente y estable a altas temperaturas (Zhang et al., 2024).

En el ánodo, el combustible (hidrógeno en este caso) se oxida al reaccionar con iones de oxígeno provenientes del cátodo, produciendo agua y liberando electrones. El ánodo cataliza la reacción y facilita el transporte de electrones hacia el circuito externo.



En el cátodo, el oxígeno molecular se reduce al captar estos electrones. Estos procesos generan una corriente eléctrica al forzar a los electrones a circular a través de un circuito externo, permitiendo el aprovechamiento de la energía. Estos iones son transportados hacia el ánodo a través del electrolito.



Por otro lado, el electrolito es una cerámica densa, comúnmente hecha de zirconia estabilizada con itria (YSZ). Transporta exclusivamente iones de oxígeno desde el cátodo hacia el ánodo, los materiales del electrolito transportan iones de óxido entre el ánodo y el cátodo para completar las reacciones electroquímicas. Un buen electrolito debe ser denso, estable a la temperatura de operación y no reaccionar con otros materiales. También necesita tener un coeficiente de expansión térmica similar al de los electrodos, baja conductividad electrónica y alta conductividad iónica o protónica (Rathore et al., 2021). Su estructura evita que los gases se mezclen, asegurando que las reacciones ocurran de manera controlada.

En la figura 5, se observan los componentes del SOFC, El color azul es el cátodo, el color verde es el ánodo y el blanco es el electrolito. El conducto superior es el conducto en donde fluye el aire y el inferior es donde pasa el combustible, el hidrogeno.

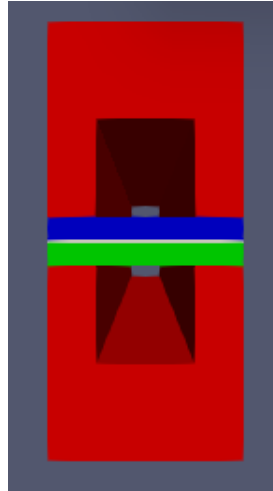


Figura 5: Estructura de SOFC en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se puede observar el movimiento de los iones O^{2-} y de los electrones e^- . Se ilustra cómo el combustible entra al ánodo, el aire al cátodo, y cómo los productos y la energía fluyen fuera del sistema.

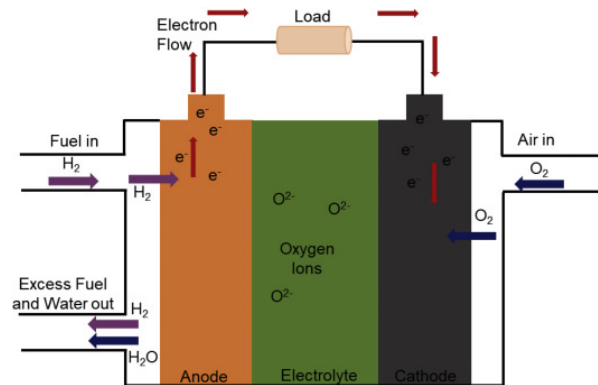


Figura 6: Esquema básico de operación. Fuente: Singh et al. (2021)

4. Desarrollo del Modelo OpenFuelCell2

Es software utilizado en este proyecto es el modelo de OpenFuelCell2, este está diseñado para simular el comportamiento electroquímico, térmico y de transporte de especies en una celda de combustible de óxido sólido (SOFC). Este modelo se basa en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales (PDEs) y ecuaciones algebraicas que representan los principios físicos fundamentales de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y reacciones electroquímicas. Estas ecuaciones se resuelven en un dominio tridimensional utilizando un enfoque de volúmenes finitos.

4.1 Conservación de Masa

La ecuación de continuidad asegura que la masa de los gases reactivos y productos se conserva en todo momento:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = S_m$$

Donde:

- ρ : densidad del gas (kg/m³).
- u : velocidad del flujo (m/s).
- S_m : término fuente asociado al consumo o producción de masa debido a las reacciones químicas.

Todas estas variables se pueden encontrar en la carpeta *constant*, en donde se puede cambiar este valor. Este se mostrará en el video tutorial.

4.2 Conservación de Cantidad de Movimiento

El modelo incluye la ecuación de Navier-Stokes, que describe el transporte de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = \nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho g + S_{mom}$$

Donde:

- p : presión (Pa).
- μ : viscosidad del gas (Pa·s).
- g : gravedad (m/s²).
- S_{mom} : término fuente asociado a las reacciones y a las interacciones de los gases.

4.3 Conservación de Energía

El balance de energía incluye las contribuciones de las reacciones electroquímicas, el transporte de calor y las pérdidas térmicas:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{gen} + q_{reac}$$

Donde:

- C_p : capacidad calorífica específica (J/kg·K).
- T : temperatura (K).
- k : conductividad térmica (W/m·K).

- q_{gen} : calor generado por la reacción electroquímica (W/m³).
- q_{reac} : calor asociado a la oxidación del combustible.

4.4 Transporte de Especies

El transporte de gases reactivos, como hidrógeno y oxígeno, se modela mediante:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot (D_i \nabla Y_i) + S_i$$

Donde:

- Y_i : fracción de masa de la especie i .
- D_i : coeficiente de difusión (m²/s).
- S_i : término fuente por consumo o producción de la especie.

4.5 Reacciones Electroquímicas

La ecuación de Nernst calcula el potencial eléctrico en la celda:

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right)$$

Donde:

- E : potencial eléctrico (V).
- E^0 : potencial estándar (V).
- R : constante universal de los gases (8.314 J/mol·K).
- T : temperatura (K).
- F : constante de Faraday (96485 C/mol).
- p_{H_2} , p_{H_2O} , p_{O_2} : presiones parciales de las especies (Pa).

Además, la ecuación de Butler-Volmer describe la densidad de corriente electroquímica. La corriente generada según la ecuación de Butler-Volmer, depende de las propiedades de los materiales y las condiciones operativas:

$$j = j_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_c F \eta}{RT} \right) \right]$$

Donde:

- j : densidad de corriente (A/m²).
- j_0 : densidad de corriente de intercambio (A/m²).

- α_a, α_c : coeficientes de transferencia anódico y catódico.

- η : sobrepotencial (V).

En OpenFuelCell2, estas ecuaciones se implementan en archivos de configuración y bibliotecas que manejan las interacciones físicas y químicas. Las propiedades termo físicas del combustible se configuran en *thermophysicalProperties*. Las reacciones se definen en *combustionProperties*. Los términos fuente específicos se adaptan según el diseño del modelo.

5. Simulación

OpenFuelCell2 es un *software* de simulación especializado desarrollado como una extensión de OpenFOAM, un framework ampliamente utilizado para la dinámica de fluidos computacional (CFD). Está diseñado específicamente para modelar y simular celdas de combustible, en este proyecto se simulará SOFC, sin embargo, el *software* posee otros tipos de celdas electroquímicas. Este *software* permite estudiar fenómenos físicos complejos que ocurren en estas celdas, como reacciones electroquímicas, transferencia de calor, transporte de especies y dinámica de fluidos (Zhang et al., 2024). El SOFC a simular tiene la estructura de la figura 7 y 8.

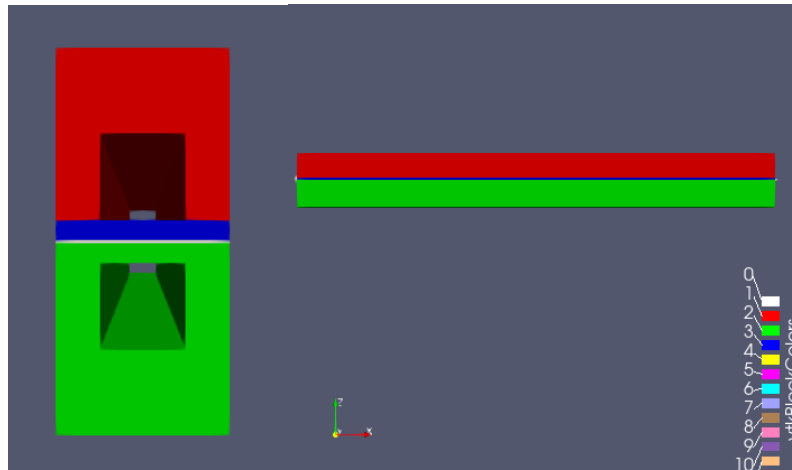


Figura 7 y 8: Estructura de la SOFC en *paraview*. Fuente: Elaboración propia.

5.1 Modificación de parámetros

Para evaluar el comportamiento de una SOFC en este proyecto se trabajó bajo diferentes temperaturas operacionales. En el caso de OpenFuelCell2, este parámetros se encuentran en los archivos de configuración dentro de la carpeta *0.origin*, que define las condiciones iniciales y de frontera del sistema. La razón de elegir este parámetro de cambio es que es un parámetro crítico en el modelado y simulación de las SOFC (Zeng et al., 2020). La temperatura juega un papel crucial al determinar la eficiencia electroquímica y la durabilidad de los componentes, lo que subraya la importancia de un control térmico uniforme para evitar condiciones críticas locales que puedan acelerar la degradación de la celda (Bessler et al., 2010). El archivo *T* contiene los valores de temperatura en unidades de Kelvin para cada región del dominio (ánodo, cátodo,

electrolito). Para simular el efecto de la temperatura en la eficiencia del sistema, se pueden modificar los valores en este archivo.

5.2 Configuración para Estado Estacionario y Transitorio

En simulaciones estacionarias, el sistema se modela hasta que alcanza un equilibrio estable. En OpenFuelCell2, este tipo de simulación se configura en los archivos de control (*system/controlDict*) ajustando el número de iteraciones y cambiando los rangos de tiempo a simular. En simulaciones transitorias, se evalúan los cambios en el tiempo, como el impacto de una fluctuación de temperatura o presión. Esto se habilita configurando los términos dependientes del tiempo en *controlDict*.

6. Resultados y análisis simulación

En este estudio, se evaluó el desempeño de una SOFC bajo diferentes condiciones de operación, con un enfoque en el impacto de la temperatura sobre las variables clave del sistema. Para analizar el comportamiento del sistema, se realizaron simulaciones que permitieron obtener perfiles de voltaje, corriente, y temperatura en función de la posición dentro de la celda. Además, se generaron curvas de polarización para caracterizar las pérdidas electroquímicas totales. A continuación, se presentan los resultados obtenidos. Dado que el eje X representa la posición en una celda SOFC, los gráficos analizados reflejan cómo las variables clave del sistema (voltaje, corriente, temperatura, etc.) varían a lo largo de su longitud. Este enfoque es esencial para entender la distribución espacial de los fenómenos electroquímicos.

6.1 Gráfico de Voltaje (V) vs. Posición (X)

En la figura 5 se observa la grafica voltaje vs. Posicion en metros. El comportamiento observado, donde el voltaje es mayor a 773 K y menor a 1073 K, puede explicarse por una combinación de factores, como el aumento de pérdidas térmicas y tensiones mecánicas a temperaturas más altas, así como una mayor degradación de los materiales en condiciones extremas. Aunque 1073 K mejora la cinética de reacción y la conductividad iónica, también intensifica las tensiones térmicas, los gradientes de temperatura y las pérdidas de combustible en regiones finales de la celda. Por el contrario, 773 K proporciona un equilibrio entre estabilidad térmica y eficiencia electroquímica, compensando las pérdidas óhmicas y mejorando el rendimiento. Este análisis es respaldado por trabajos como el de Zeng et al., que destacan la importancia de controlar los gradientes térmicos y evitar tensiones excesivas para mantener la estabilidad operativa en SOFCs.

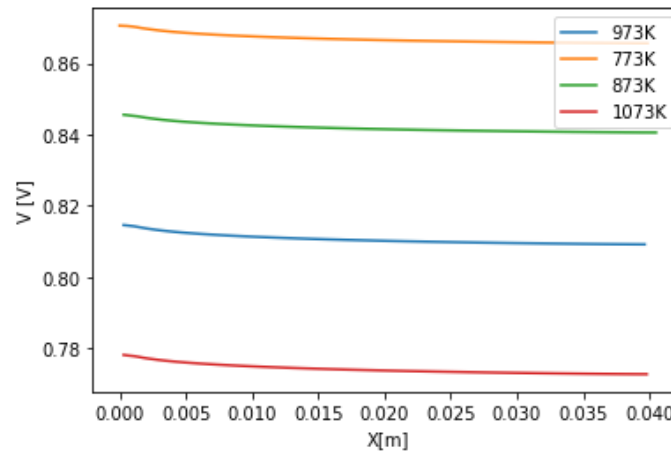


Figura 9: Voltaje versus. Posición a lo largo de la SOFC. Fuente: Elaboración Propia.

Además, como se observa en la figura 6, el voltaje disminuye levemente a medida que se avanza a lo largo de la longitud de la celda. Este comportamiento se debe al consumo del combustible y a las pérdidas electroquímicas acumuladas en el sistema. Además, a temperaturas más altas, el voltaje se mantiene más estable a lo largo de la celda, indicando menores pérdidas ohmicas y mejores condiciones electroquímicas.

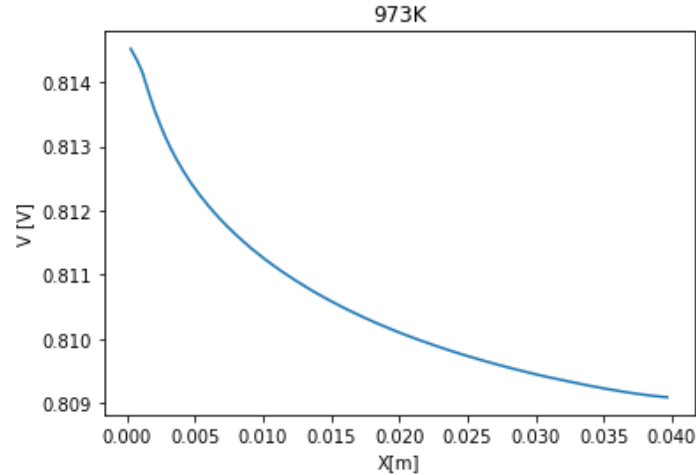


Figura 10: Voltaje versus. Posición a lo largo de la SOFC. Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente figura se observa que la celda SOFC de sigue el mismo comportamiento que la simulación generada.

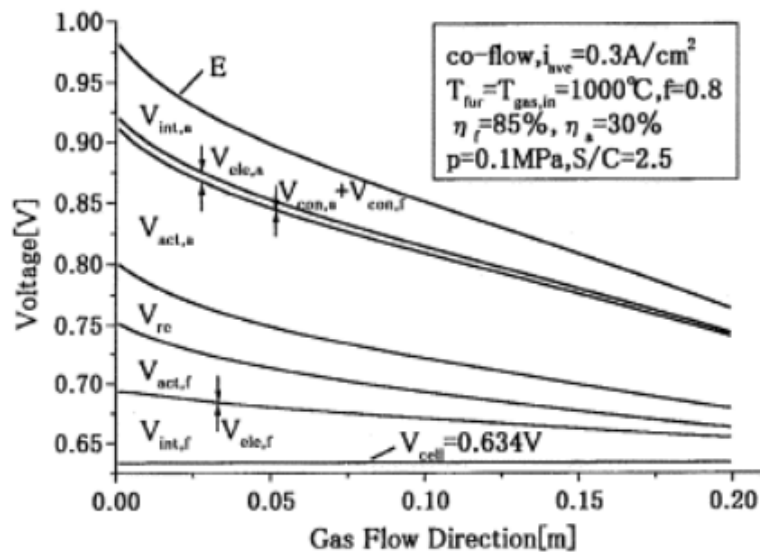


Figura 11: Voltaje versus. Posición a lo largo de la SOFC. Fuente: Iwata et al. (2000).

6.2 Gráfico de Densidad de corriente (I) vs. Posición (X)

La densidad de corriente aumenta inicialmente en función de la longitud X , ya que las reacciones electroquímicas convierten el combustible en electricidad. En temperaturas más altas, el incremento de corriente es más rápido debido a la mayor actividad catalítica y conductividad iónica. Hacia el final de la celda, la corriente puede estabilizarse o incluso disminuir ligeramente si el combustible se agota.

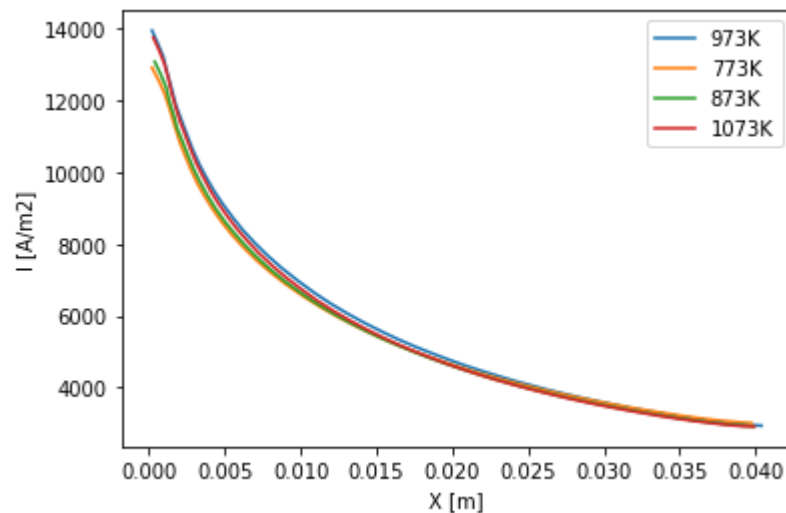


Figura 12: Densidad de corriente versus. Posición a lo largo de la SOFC. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 1: densidades de corriente promedio según las temperaturas.

Temperatura (K)	I promedio (A/m ²)
773	6450.695497
873	6430.566403
973	6719.804980
1073	6648.301342

En la siguiente figura se observa que la celda SOFC de sigue el mismo comportamiento que la simulación generada.

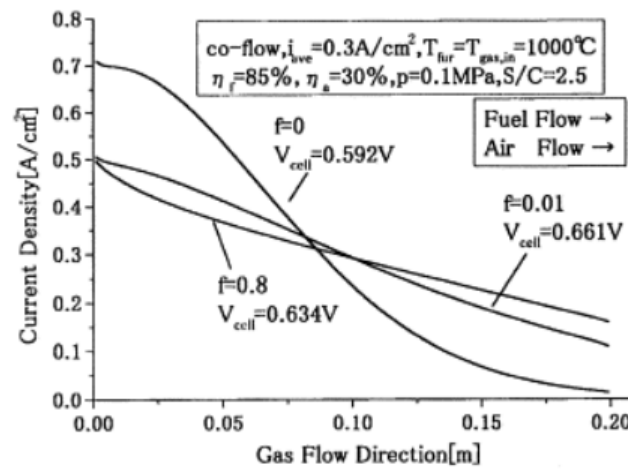


Figura 13: Densidad de corriente versus. Posición a lo largo de la SOFC. Fuente: Iwata et al. (2000).

6.3 Curva de Polarización

En una SOFC, las regiones iniciales contribuyen más al voltaje máximo, mientras que las regiones finales pueden estar limitadas por la disponibilidad de combustible o gradientes térmicos.

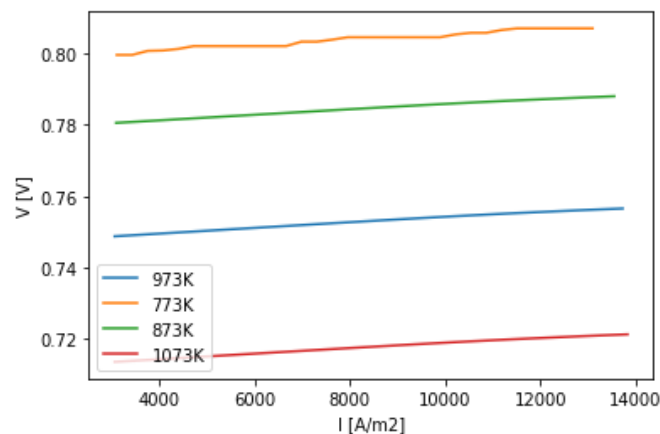


Figura 14: Voltaje versus. Densidades de corriente. Fuente: Elaboración Propia.

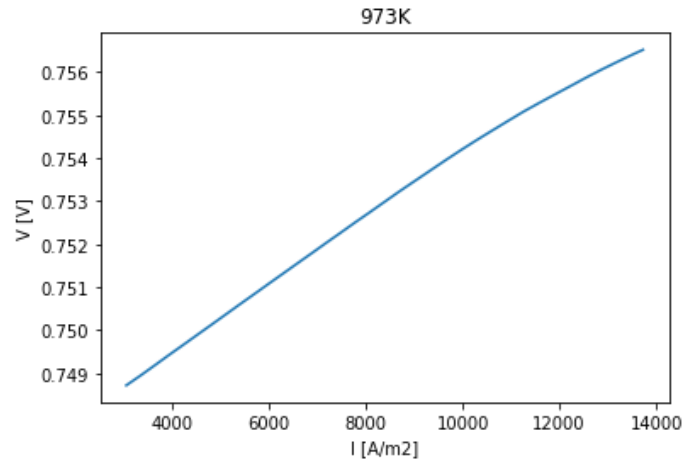


Figura 15: Voltaje versus. Densidades de corriente. Fuente: Elaboración Propia.

6.4 Gráfico de Temperatura (T) vs. Posición (X)

A temperaturas iniciales más altas, los gradientes son más pronunciados, lo que puede causar tensiones térmicas.

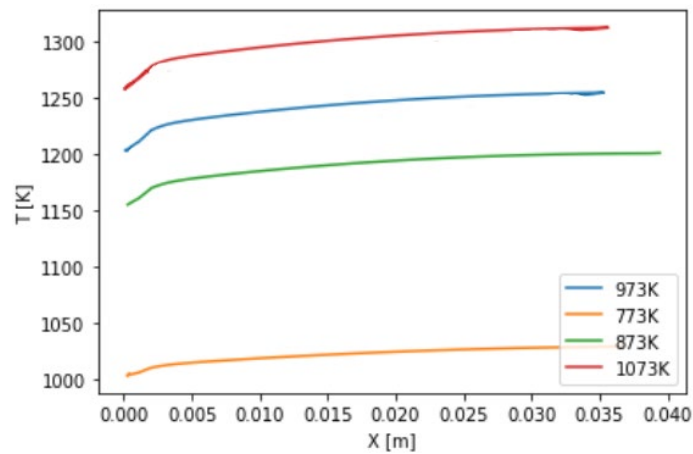


Figura 16: Temperaturas versus. Posición a lo largo de la SOFC. Fuente: Elaboración Propia.

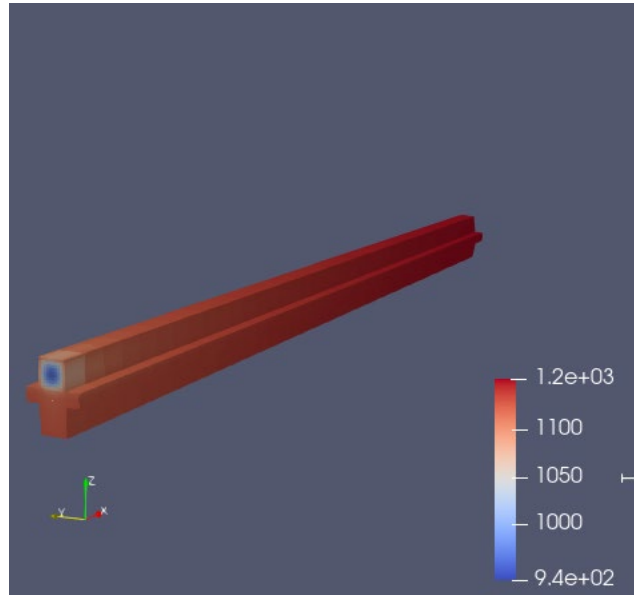


Figura 17: Foto de gradiente de temperatura en *paraview*. Fuente: Elaboración Propia.

Al realizar estas simulaciones, se puede explorar cómo las condiciones iniciales afectan el rendimiento de la SOFC, lo que les permite entender mejor los balances energéticos y las dinámicas de operación.

7. Conclusiones

Este proyecto permitió evaluar el desempeño de una SOFC bajo distintas temperaturas, destacando el impacto crítico de la temperatura sobre variables clave como el voltaje, la corriente y los gradientes térmicos. Se concluye que operar a temperaturas moderadas, como 773 K, ofrece un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y estabilidad estructural, minimizando las pérdidas térmicas y mecánicas asociadas con temperaturas más altas.

La tecnología SOFC destaca por su alta eficiencia energética, flexibilidad en el uso de combustibles como hidrógeno y biogás, y bajas emisiones contaminantes. Estas características posicionan a las SOFC como una solución viable para la generación de energía limpia y sostenible en sectores residenciales, industriales y comerciales (Singh et al., 2021).

Las recomendaciones para la implementación es integrar SOFC en sistemas híbridos con turbinas de gas o de vapor para maximizar la eficiencia energética, especialmente en industrias con alta demanda de calor y electricidad simultánea.

Los principales desafíos de la implementación de las SOFC es reducir los costos de producción de las SOFC, especialmente en materiales como electrolitos cerámicos y electrodos catalíticos, para hacerlas económicamente competitivas (Martínez-Coronado et al., 2012). Además de debe mejorar la durabilidad de los materiales y reducir los gradientes térmicos internos mediante diseños optimizados y estrategias de gestión térmica.

La producción de SOFC enfrenta una barrera social significativa debido a la dependencia de materiales escasos, como tierras raras (itrio, escandio, gadolinio) y metales como níquel y cobalto. Estos materiales se encuentran principalmente en países en desarrollo, donde su extracción y procesamiento pueden generar impactos negativos como degradación ambiental, conflictos sociales y explotación laboral. Esta situación no solo plantea desafíos éticos, sino que también genera resistencia social en las comunidades afectadas, dificultando el desarrollo sostenible de la cadena de suministro.

Además, la concentración geopolítica de estos recursos estratégicos en un número limitado de países crea vulnerabilidades para las naciones que buscan implementar SOFC en sus sistemas energéticos. Países sin acceso directo a estos materiales enfrentan mayores costos y desafíos logísticos, lo que limita su capacidad para adoptar esta tecnología. Superar estas barreras requiere diversificar las fuentes de materiales mediante reciclaje, incentivar la investigación de alternativas sostenibles, y establecer acuerdos internacionales que garanticen prácticas éticas y sostenibles, promoviendo beneficios económicos justos para las comunidades productoras.

En el contexto chileno, las SOFC podrían aprovecharse en proyectos de generación distribuida, especialmente en regiones con alto potencial de producción de biogás a partir de residuos agrícolas y urbanos. Establecer programas de incentivos gubernamentales para promover la investigación y el desarrollo de esta tecnología, reduciendo barreras económicas iniciales.

8. Referencias

- Abdalla, A. M., Hossain, S., Petra, P. M., Ghasemi, M., & Azad, A. K. (2020). Achievements and trends of solid oxide fuel cells in clean energy field: a perspective review. *Frontiers in Energy*, 14(2), 359–382. <https://doi.org/10.1007/s11708-018-0546-2>
- Bessler, W. G., Gewies, S., Willich, C., Schiller, G., & Friedrich, K. A. (2010). Spatial Distribution of Electrochemical Performance in a Segmented SOFC: A Combined Modeling and Experimental Study. *Fuel Cells*, 10(3), 411–418. <https://doi.org/10.1002/fuce.200900083>
- Corigliano, O., Pagnotta, L., & Fragiaco, P. (2022). On the Technology of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Energy Systems for Stationary Power Generation: A Review. *Sustainability*, 14(22), 15276. <https://doi.org/10.3390/su142215276>
- Díaz, B., Celentano, D., Molina, P., Sancy, M., Troncoso, L., & Walczak, M. (2024). On the validation and applicability of multiphysics models for hydrogen SOFC. *Journal of Power Sources*, 607, 234493. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2024.234493>
- Fernandes, M. D., Bistrizki, V., Domingues, R. Z., Matencio, T., Rapini, M., & Sinisterra, R. D. (2020a). Solid oxide fuel cell technology paths: National innovation system contributions from Japan and the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109879. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109879>
- Fernandes, M. D., Bistrizki, V., Domingues, R. Z., Matencio, T., Rapini, M., & Sinisterra, R. D. (2020b). Solid oxide fuel cell technology paths: National innovation system contributions from Japan and the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109879. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109879>
- İnci, M. (2022). Future vision of hydrogen fuel cells: A statistical review and research on applications, socio-economic impacts and forecasting prospects. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102739. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102739>
- Iwata, M., Hikosaka, T., Morita, M., Iwanari, T., Ito, K., Onda, K., Esaki, Y., Sakaki, Y., & Nagata, S. (2000). Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distributions. *Solid State Ionics*, 132(3–4), 297–308. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00645-7](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00645-7)
- Lysunenko, N. O., Brodnikovskiy, Y. M., Mokiichuk, V. M., Polishko, I. O., Brodnikovskiy, D. M., Chedryk, V. I., & Vasylyev, O. D. (2021). The Influence of Hydrogen Concentration in an Ar–H₂ Mixture on the Electrical Properties of Solid Oxide Fuel Cells. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 60(5–6), 352–359. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00245-x>
- Martínez-Coronado, R., Aguadero, A., Pérez-Coll, D., Troncoso, L., Alonso, J. A., & Fernández-Díaz, M. T. (2012). Characterization of La_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.5}Ti_{0.5}O_{3–δ} as symmetrical electrode material for intermediate-temperature solid-oxide fuel cells. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 37(23), 18310–18318.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.09.033>

Rathore, S. S., Biswas, S., Fini, D., Kulkarni, A. P., & Giddey, S. (2021). Direct ammonia solid-oxide fuel cells: A review of progress and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(71), 35365–35384. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.08.092>

Singh, M., Zappa, D., & Comini, E. (2021). Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27643–27674. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.06.020>

Zeng, Z., Qian, Y., Zhang, Y., Hao, C., Dan, D., & Zhuge, W. (2020). A review of heat transfer and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks. *Applied Energy*, 280, 115899.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115899>

Zhang, S., Hess, S., Marschall, H., Reimer, U., Beale, S., & Lehnert, W. (2024). openFuelCell2: A new computational tool for fuel cells, electrolyzers, and other electrochemical devices and processes. *Computer Physics Communications*, 298, 109092.
<https://doi.org/10.1016/J.CPC.2024.109092>