

Celdas de Combustible: Perspectivas para la aplicación en la Generación Distribuida

Francisco M. González-Longatt

Resumen— Este artículo presente un resumen de las ecuaciones elementales que definen el comportamiento de dinámica lenta de las celdas de combustible, además de mostrar consideraciones sobre la eficiencia de las celdas ante condiciones operativas: temperatura, presión y utilización de combustible. Además se construye paso a paso el modelo de una celda de combustible de óxido sólido tomando en consideración la ecuaciones termodinámicas que definen el comportamiento de dinámica lenta. El modelo desarrollado, resulta ser simple e incluye la dinámica electroquímica de la celda lo que lo hace susceptible a ser una herramienta para la simulación.

Palabras claves—Celda de combustible, generación distribuida, simulación dinámica, seguimiento de carga.

I. INTRODUCCIÓN

La desregulación y la liberación de las ataduras de los mercados en algunos países a lo largo del mundo han dado nuevas perspectivas para la especialización de pequeños negocios en la generación de energía. Típicamente, los generadores de pequeña escala conectando en algún punto de la red de distribución son denominados generación distribuida (GD). Por ahora, la GD comprende una pequeña fracción de la capacidad total, sin embargo, se espera que en un futuro muy cercano la situación cambie a favor de la GD. Algunos pronósticos apuntan que para el año 2010 aproximadamente el 30% de la nueva capacidad instalada sea GD [1].

Varias tecnologías están siendo usadas en aplicaciones de GD con un variado grado de éxito. Algunos de ellos son: turbinas eólicas, plantas hidráulicas a pequeña escala, biomasa, micro turbinas, arreglos fotovoltaicos, y celdas de combustible CdC. Una CdC es un dispositivo que convierte directamente la energía química del combustible en energía eléctrica. Recientes avances en la tecnología de las CdC han mejorado significativamente las características técnicas y económicas de esta tecnología [2]. Ambientalmente amigables, operación prácticamente libre de ruido, y una muy alta eficiencia combinado con

posibilidad del uso de variedad de combustibles, hace de las CdC una muy buena competidora en el futuro mercado de la electricidad [3]. Además de todo esto, se debe resaltar que los generadores basados en el proceso de CdC exhiben otras importantes propiedades como su tamaño compacto, modularidad, y controlabilidad [4]-[6]. Hay, sin embargo, algunos retos tecnológicos asociados con la tecnología de celda de combustible lo cual puede representar ciertas dificultades [3]. Sin embargo, las plantas de CdC pueden transformarse de una gran parte de la generación mixta en el futuro [8]. Este artículo encierra fundamentalmente dos aspectos: un resumen de las ecuaciones termodinámicas que gobiernan el desempeño de las CdC y el desarrollo de un modelo dinámico para una CdC. Este es una aproximación apoyado en correlaciones termodinámicas, y definido por un pequeño número de parámetros, que predicen el comportamiento Eléctrica de la CdC antes de varias condiciones operativas: temperatura, presión, y utilización de los gases.

Este artículo está organizado de la siguiente forma. La siguiente sección establece una descripción y clasificación de las CdC. En la sección II se presenta un análisis de la eficiencia de conversión de electricidad, ideal y real, de la CdC, para mostrar luego el desempeño de la CdC y la dependencia de esta a la temperatura, presión y uso de combustible. La sección IV contiene los supuestos, las ecuaciones y el modelo paso a paso de dinámica lenta para una SOFC. Las conclusiones de este artículo son presentadas en la sección V.

II. DESCRIPCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

La celda de combustible son los dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de una reacción directamente en la energía eléctrica [13]. El principio operacional general de una celda de combustible fue descubierto por el físico amateur inglés William Grove en 1839. Sin embargo, el potencia comercial de la tecnología de celdas de combustible fue solo reconocido en la década de 1960, cuando las celdas de combustible fueron aplicadas con éxito en la industria espacial [15]. En simples términos, la celda de combustible produce energía eléctrica al alimentar un combustible gaseoso rico en hidrogeno al ánodo, y suministrar un oxidante (aire) al cátodo, e introduciendo un electrolito para permitir el intercambio de iones (Fig. 1). Las reacciones

Manuscrito recibido el 7 de Octubre de 2004

F. M. G. L. Autor está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Carretera Nacional Maracay-Mariara Frente a Base Aérea Mariscal Sucre, Núcleo Maracay, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-243-5546954, Fax: +58-244-5546923, E-mail: fglongatt@ieeee.org.

electroquímicas que tienen lugar en los electrodos resultan en una corriente eléctrica en el circuito externo.

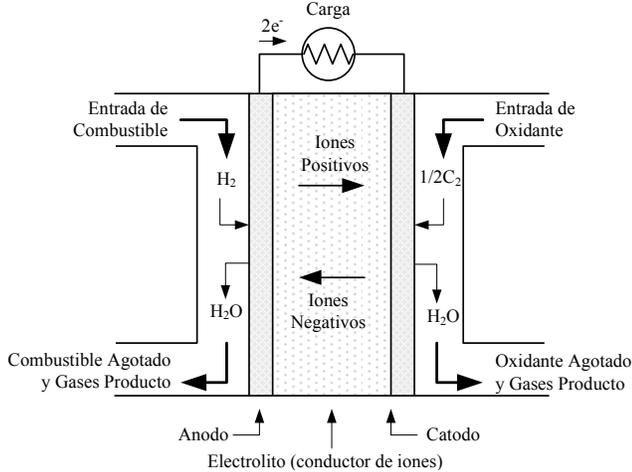


Fig. 1. Estructura de una celda de combustible.

La efectividad de este proceso es fuertemente dependiente del tipo de electrolito para crear la reactividad química necesaria para el transporte de iones [3]. Las CdC pueden ser agrupadas en diferentes categorías en función de algunos criterios. La más común clasificación es según el tipo de electrolito [13]:

- CdC Alcalinas (AFC).
- CdC Metanol Directo (DMFC).
- CdC de Carbonato Fundido (MCFC).
- CdC de Ácido Fosfórico (PAFC).
- CdC de Oxido Sólido (SOFC).
- CdC de Membrana de Intercambio de Protón (PEMFC).

Considerando la temperatura de operación las CdC quedan agrupadas en: baja temperatura (PEFC, AFC, PAFC) y alta temperatura (MCFC, ITSOFC y TSOFC) (Fig. 2.)

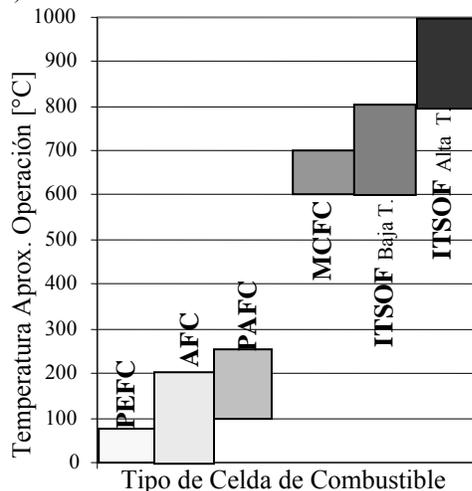


Fig. 2. Temperatura Aproximada de Operación para diferentes tipos de CdC.

Otra importante distinción es el método usado para producir el hidrogeno para la reacción de la celda: reforma interna (MCFC, ITSOFC y TSOFC) y reforma externa (PEFC, AFC, PAFC). Las CdC son sensibles a ciertos contaminantes del combustible que deben ser minimizados en el gas de combustible. (Tabla 2)

TABLA 1
SUMARIO DE LAS PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LOS TIPOS DE CdC [15]

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	ISOFC
<i>Electrolito</i>	Membrana de intercambio de protones	Hidróxido de Potasio Movilizado o Inmovilizado	Acido Fosforico Liquido Inmovilizado	Carbonato Fundido Liquido Inmovilizado	Cerámica	Cerámica
<i>Temp. de Operación</i>	80°C	65°C-220°C	205°C	650°C	600°C 800°C	800-1000°C
<i>Portador de Carga</i>	H+	OH-	H+	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	O ²⁻
<i>Reformador Externo para CH₄</i>	Si	Si	Si	No	No	No
<i>Componentes primario de la celda</i>	Basado en Carbón	Basado en Carbón	Basado en Grafito	Basado en Acero Inoxidable	Cerámica	Cerámica
<i>Catalizador</i>	Platino	Platino	Platino	Niquel	Perovskites	Perovskites
<i>Manejo de productos de agua</i>	Vapor	Vapor	Vapor	Productos Gaseosos	Productos Gaseosos	Productos Gaseosos
<i>Manejo de producto de calor</i>	Proceso de gas + Medio de Calent.	Proceso de gas + Calculo Electrolito	Proceso de gas + Medio de Calent.	Reforma Interna + Proceso de Gas	Reforma Interna + Proceso de Gas	Reforma Interna + Proceso de Gas

TABLA 2
SUMARIO DEL IMPACTO DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES DE COMBUSTIBLES EN PEFC, AFC, PAFC, MCFC, ITSOFC Y SOFC

Especie de Gas	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
<i>H₂</i>	Combustible					
<i>CO</i>	Veneno (50 ppm por pila)	Veneno	Veneno (<0.5%)	Combustible ^a	Combustible	Combustible
<i>CH₄</i>	Diluyente	Veneno	Diluyente	Diluyente ^b	Combustible ^a	Combustible ^a
<i>CO₂ y H₂O</i>	Diluyente	Veneno	Diluyente	Diluyente	Diluyente	Diluyente
<i>H₂S y COS</i>	No hay estudios a la fecha	Veneno	Veneno (<50 ppm)	Veneno (<0.5 ppm)	Veneno	Veneno (<1.0 ppm)

^a: En realidad, CO con H₂O, se cambia en H₂ y CO₂, y CH₄, reforman con H₂O y CO, reforma más rápido que un combustible en el electrodo.

^b: Un combustible en el reformador interno de MCFC.

III. RENDIMIENTO DE LA CdC

Una aplicación específica de CdC requiere de evaluar el impacto de variables, como la temperatura, la presión, y componentes de gas, sobre el funcionamiento de CdC a fin de predecir como las celda interactúan con el sistema eléctrico. Los principios termodinámicas junto con el diseño de la CdC fundamentan la operación y rendimiento de la celda de combustible. Es importante mencionar que numerosos son los textos que presentan un análisis detallado sobre la complejidad de los fenómenos termodinámicos que se tiene lugar en las celdas de combustible, y en el presente trabajo solo se muestra un enfoque simple y conciso.

A. Rendimiento Ideal

Este es definido por el potencial Nernst, representado como el voltaje de la celda. La ecuación de Nerst provee la relación entre potencial estándar ideal (E^0) para la reacción de la celda y el potencial de equilibrio ideal (E), a otras temperaturas y presiones parciales de reactantes y productos.

Este depende de las reacciones electroquímicas que ocurren con diferentes combustibles y oxígeno es mostrado en la tabla siguiente. Las reacciones globales de la celda correspondiente a cada electrodo individual mostradas en la Tabla 3, y en la Tabla 4 se muestra forma correspondiente forma de la ecuación de Nernst. El potencial estándar ideal

de una celda de combustible H₂/O₂ es (E⁰) 1.229 Voltios con agua líquida producida y 1.18 con agua y productos gaseosos.

TABLA 3

RELACIONES ELECTROQUÍMICAS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE		
Celda de Combustible	Reacción del Anodo	Reacción del Cátodo
Membrana de Intercambio de Protones y Ácido Fosfórico	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	½ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Alcalina	H ₂ + 2(OH) ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻	½ O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2(OH) ⁻
Carbonato Fundido	H ₂ + CO ₃ ⁼ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻ CO + CO ₃ ⁼ → 2CO ₂ + 2e ⁻	½ O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ⁼
Oxido Sólido	H ₂ + O ⁼ → H ₂ O + 2e ⁻ CO + CO ₃ ⁼ → CO ₂ + 2e ⁻ CH ₄ + 4O ⁼ → 2H ₂ O + CO ₂ + 8e ⁻	½ O ₂ + 2e ⁻ → O ⁼

CO: Monóxido de Carbono e⁻: Electron H₂O: Agua
CO₂: Dióxido de Carbono H⁺: Ion de Hidrogeno O₂: Oxigeno
CO₃⁼: Ion Carbonato H₂: Hidrogeno OH⁻: Ion de Hidroxilo

TABLA 4

REACCIONES DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE Y SUS CORRESPONDIENTES ECUACIÓN DE NERNST	
Reacciones de la Celda	Equación de Nernst
H ₂ + ½O ₂ → H ₂ O	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \left[\ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right) + \ln(P_{O_2}^{1/2}) \right]$
H ₂ + ½O ₂ + CO ₂ ^(c) → H ₂ O + CO _{2(a)}	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \left[\ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}(P_{CO_2})^{(a)}} \right) + \ln(P_{O_2}^{1/2}(P_{CO_2})^{(a)}) \right]$
CO + ½O ₂ → CO ₂	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \left[\ln \left(\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}} \right) + \ln(P_{O_2}^{1/2}) \right]$
CH ₄ + 2O ₂ → 2H ₂ O + CO ₂	$E = E^0 + \frac{RT}{8F} \left[\ln \left(\frac{P_{CH_4}}{P_{H_2O}^2 P_{CO_2}} \right) + \ln(P_{O_2}^2) \right]$

^(a) Anodo P: Presión de gas
^(c) Catodo R: Constante de gas universal
E: Equilibrio de potencial T: Temperatura absoluta.

La ecuación de Nerst para la reacción de hidrogeno, establece que el potencial ideal de celda a una temperatura dada puede ser incrementada por presiones mas altas (operativas y de reactantes) de hecho, mejoras han sido vistas a mas altas presiones.

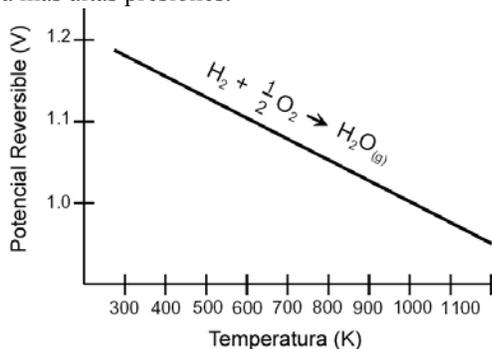


Fig. 3. Potencial Ideal de una celda de combustible H₂/O₂ como una función de la temperatura

La Fig. 3 muestra la relación de E⁰ a la temperatura de la celda, se consideran productos gaseosos de agua, por lo que E es menor a 1.229 Voltios.

B. Rendimiento Real

Grandes y complejos modelos son usados para caracterizar la operación real de CdC basados en detalles

del diseño (dimensiones físicas, materiales, etc.) junto con consideraciones físicas (fenómeno de transporte, electroquímica, etc.). Tales modelos pueden resultar incomodo y consumidores de tiempo en el análisis de sistemas. Una aproximación prudente es desarrollar correlaciones basadas en modelación termodinámica; que predicen el rendimiento de varias condiciones operativas de la celda son cambiadas, tales como temperatura, presión, y gases constituyentes.

La energía eléctrica de una CdC, se obtiene cuando una corriente razonable es manejada, pero la potencia real de la celda es disminuido desde su potencial de equilibrio debido a las pérdidas irreversibles, frecuentemente denominadas: sobrepotencial (*overpotential*) o sobrevoltaje (η), como se muestra en la Figura 4.

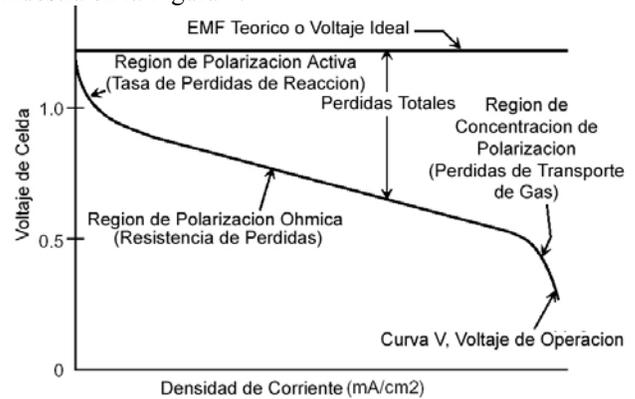


Fig. 4. Característica Ideal y real del Voltaje/Corriente de la Celda de Combustible

Estas pérdidas resultan en un voltaje de la celda (V) para una celda de combustible que es menor que el potencial ideal, E (V= E - Losses). Las pérdidas, son originadas primariamente por tres fuentes:

1) *Activación de polarización* (η_{act}).

Esto esta muy relacionado con las relaciones electroquímicas y químicas, en que ambos casos envuelven una barrera de activación que debe ser sobrepasada por las especies reaccionante. Para una reacción electroquímica con $\eta_{act} \geq 50-100mV$, η_{act} es descrito por la forma general de la *ecuación de Tafel*.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \tag{1}$$

Donde α es el coeficiente de transferencia de electrón de la reacción en el nodo siendo diseccionado e i_0 , es el cambio en la densidad de corriente

2) *Polarización Ohmica* (η)

Ocurren debido a la resistencia al flujo de iones en el electrolito y la resistencia a fluir de electrones a través de los materiales de los electrodos, esta es expresado por la Ley de Ohm.

$$\eta_{ohm} = iR \tag{2}$$

Donde i es la corriente que fluye a través de la celda y R es la resistencia total de la celda, el cual incluye la resistencia electrónica, iónica y de contacto

3) Polarización de concentración (η_{conc}).

Proviene de la pérdida de potencial debido a la inhabilidad del material que rodea para mantener la concentración inicial del volumen de fluido. A densidades de corrientes reales, un lento transporte de reactantes/productos desde/para la reacción electroquímica es el mayor contribuyente para la polarización de concentración:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (3)$$

4) Polarización Total

En cada electrodo es la suma de η_{conc} , η_{act} . El efecto de polarización es cambiar el potencial del electrodo ($E_{electrodo}$) a un nuevo valor ($V_{electrodo}$).

$$V_{electrodo} = E_{electrodo} \pm |\eta_{electrodo}| \quad (4)$$

El resultado neto de la corriente que fluye en el celda de combustible es incrementar el potencial del ánodo y disminuir el potencial del cátodo, de este modo se reduce el voltaje de la celda.

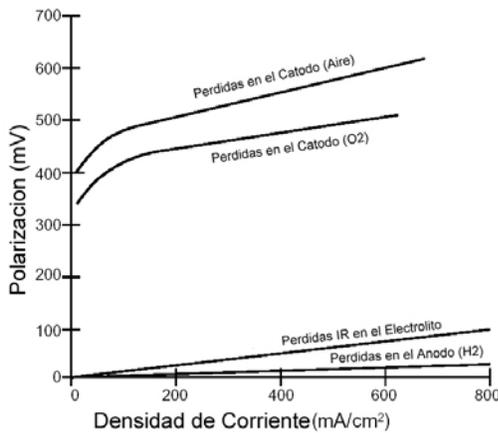


Fig. 5. Contribución a la Polarización del Ánodo y Cátodo. La contribución de las dos mitades de las formas de curvas de polarización son típicas para varios tipos de CdC (Fig. 5, caso PAFC).

5) Voltaje de la Celda

Este incluye las contribuciones de potencial de ánodo y cátodo y la polarización óhmica:

$$V_{celda} = V_{catodo} - V_{anodo} - Ri \quad (5)$$

Realizando las respectivas sustituciones de los potenciales de ánodo y cátodo, resulta:

$$V_{celda} = E_{catodo} - |\eta_{catodo}| - (E_{anodo} - |\eta_{anodo}|) - Ri \quad (6)$$

C. Desempeño de la CdC

El desempeño de una celda de combustible es afacetado por las condiciones operativas (tales como temperatura, utilización de reactantes, densidad de corriente) y otros factores (impurezas, vida de la celda) que influyen en el potencial ideal de la celda y la magnitud de las pérdidas de voltaje. El cambio en las condiciones operativas puede disminuir los costos de la celda, pero incrementa los costos de los sistemas alrededor de la misma. Usualmente, un compromiso en los parámetros operativos son necesarios para lograr requerimientos de aplicación, obtener bajos costos del sistema, y lograr una vida aceptable de la celda.

Un punto de diseño a alta densidad de corriente permitirá una celda de combustible a bajo costo de capital para ser usado en conjunto, pero resulta de una baja eficiencia del sistema (debido al bajo voltaje de la celda) y acompañado de un alto costo de operación.

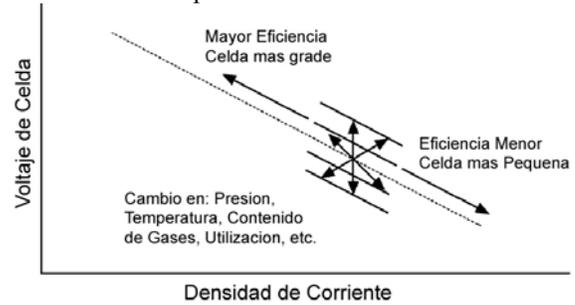


Fig. 6. Flexibilidad de Puntos de Operación de acuerdo a los Parámetros de la Celda [13]

D. Dependencia del Voltaje a la Temperatura, presión, Utilización de Combustible

El potencial reversible decrece con incrementos en la temperatura pero los voltajes de operación de esas celdas de combustible realmente incrementan con la temperatura de operación.

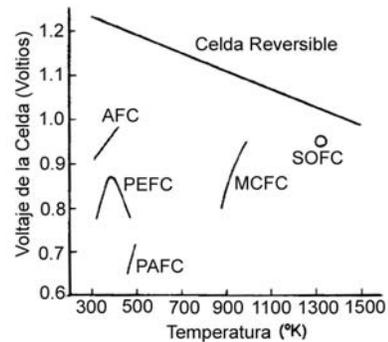


Fig 7. Dependencia del voltaje de operación inicial con la temperatura para celdas típicas [13]

El incremento en la presión posee algunos efectos beneficiosos en el rendimiento de una celda de combustible debido a que la presión parcial del reactante, solubilidad del gas, y la rata de transferencia de masa son más altas.

Por su parte la utilización de reactantes y la composición de gas posee un gran impacto en el desempeño de la celda de combustible. Esto es aparente desde la ecuación de Nernst, donde el combustible y gases oxidantes que contienen altas presiones parciales de reactantes electroquímicos producen un alto voltaje de celda.

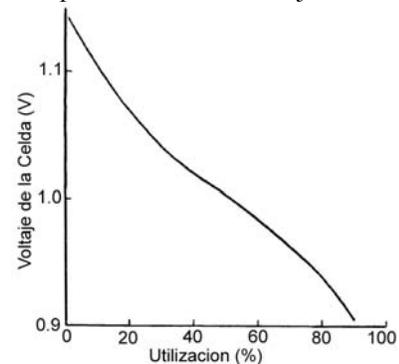


Fig. 8. Variación en el Voltaje reversible como una función de la utilización de reactante [13]

IV. MODELO DE UNA SOFC

Un sistema de generación de potencia por CdC posee las siguientes tres partes fundamentales [3]:

- *Procesador de combustible.* Este convierte combustibles tales como el gas natural y gases subproductos en hidrogeno.
- *Sección de potencia (CdC).* Es la encargada de la generación de electricidad. Hay numerosas celdas de combustibles electroquímicas en esta sección.
- *Acondicionar de potencia.* Es el encargado de convertir la potencia DC producida por la celda a una salida AC. Esta sección incluye el control de corriente, voltaje y frecuencia.

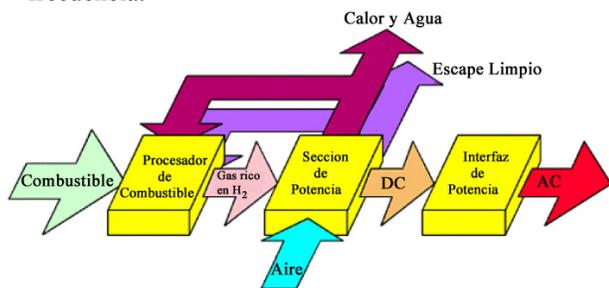
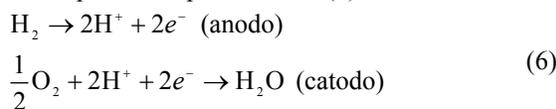


FIG. 9. Estructura de una planta de celda de combustible.

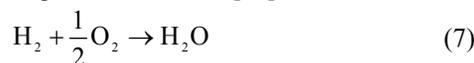
Este artículo se focaliza en la construir el modelo teórico de una SOFC con la expectativa que la respuesta dinámica de otros tipos de celdas de combustible sean similares. La referencias [3] y [14] provee un modelo dinámico básico de la sección de potencia de SOFC usado para el análisis del desempeño durante la operación normal, de modo, que algunas estrategias de control del sistema de CdC, funciones de respuesta del procesador de combustible y la sección de potencia son agregadas para modelar el sistema de generación SOFC.

A. Principio de Operación

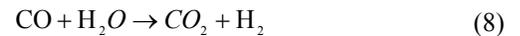
Las reacciones químicas (Fig. 10) directamente involucradas en la producción de electricidad en una SOFC, pueden ser simplificadas para obtener (6).



Siendo la reacción global de la celda [13]:



La relación estequiométrica del hidrogeno al oxigeno es de 2 a 1. El exceso de oxigeno es siempre tomado en el hidrogeno de entrada para reaccionar con oxigeno mas completamente. El CO y metano (CH₄) pueden ser usados como combustibles en la SOFC. Los diseños actuales de las SOFC, y el uso de gas combustible que contiene agua, hacen a la reacción química de desdoblamiento de CO favorable [13].



Basado en esto, se asume que solo H₂ y O₂ entran a la celda de combustible.

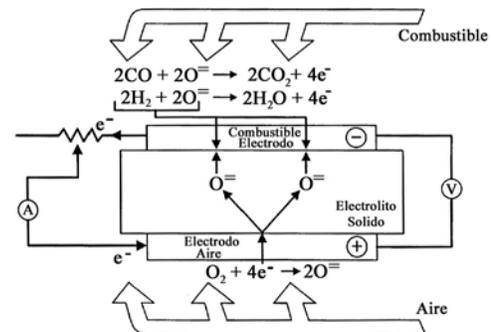


FIG. 10. Principio de operación de una SOFC.

B. Utilización de Combustible y Corriente

La utilización (U_f) se refiere a la fracción del combustible total u oxidante, introducido en la celda de combustible que reacciona electro químicamente [14].

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (9)$$

Típicamente, un 80-90% de utilización de combustible es empleada [14], dado la siguiente ecuación:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0}{2F} = 2K_r I_{fc}^r \quad (10)$$

Para cierto flujo a la entrada de hidrogeno, la demanda de corriente de la celda de combustible puede ser restringida en el rango [3]:

$$\frac{U_{min} q_{H_2}^r}{2K_r} \leq I_{fc}^{in} \leq \frac{U_{max} q_{H_2}^r}{2K_r} \quad (11)$$

El flujo de corriente de salida en el sistema de celda de combustible puede ser medido, así el flujo de combustible puede ser controlado por el control de U_f a 85%, tal que [8]:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I_{fc}^r}{U_{opt}} \quad (12)$$

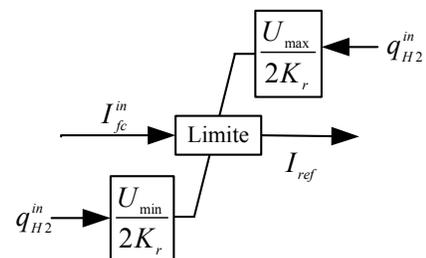


Fig. 11. Diagrama de Bloque para I_{ref}

C. Dinámica Lenta de la SOFC

La referencia [3], [8], [14] muestran un análisis detallado del comportamiento dinámico de la reacción de la SOFC. Aplicando este enfoque a (2) y tomando en cuenta las siguientes premisas:

- Los gases en la celda de combustible son ideales, y solo se considera O₂ y H₂.

- Es suficiente definir una solo valor de presión en el interior de los electrodos. Se obvia, posible caídas de presión internas.
- La dinámica de la temperatura en la celda de combustible es muy lenta, con lo que se considera estable todo el tiempo.
- La ecuación de Nerst es aplicable, para determinar el potencial de la celda.

Las ecuaciones principales que describen la dinámica lenta de la SOFC pueden ser escritas como [3], [14].

$$\frac{dI_{fc}^r}{dt} = \frac{1}{T_e} [-I_{fc}^r + I_{ref}] \quad (13)$$

El tiempo de respuesta de corriente eléctrica en las celdas de combustible es generalmente rápido y principalmente asociado con la velocidad a la cual la reacción química es capaz de restaurar el cambio que ha sido llevado a cabo en la carga. Esta función de respuesta dinámica es también modelada como una función de transferencia de primer orden con una constante de tiempo de T_e . Para cierto flujo a la entrada de hidrogeno, la corriente de referencia de la celda de combustible puede ser restringida en el rango:

$$I_{ref} = \begin{cases} q_{H_2}^{in} \frac{U_{max}}{2K_r}, & \text{si } I_{fc}^{in} \geq q_{H_2}^{in} \frac{U_{max}}{2K_r} \\ q_{H_2}^{in} \frac{U_{min}}{2K_r}, & \text{si } I_{fc}^{in} \leq q_{H_2}^{in} \frac{U_{min}}{2K_r} \\ I_{fc}^{in} = \frac{P_{ref}}{V_{fc}^r} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (14)$$

La respuesta química en el procesador de combustible es usualmente lenta y esta relacionado con el tiempo para cambiar los parámetros químicos de la reacción luego de un cambio en el flujo de reactantes.

$$\frac{dq_{H_2}^r}{dt} = \frac{1}{T_f} \left[-q_{H_2}^{in} + \frac{2K_r}{U_{opt}} I_{fc}^r \right] \quad (15)$$

Esta función dinámica de respuesta es modelada como una función de transferencia de primer orden con una constante de tiempo a T_f .

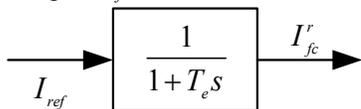


Fig. 11. Diagrama Bloque para Respuesta de la Corriente

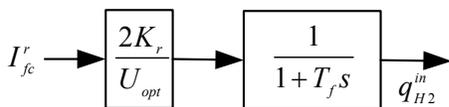


Fig. 12. Diagrama de Bloque para Procesador de Combustible

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{1}{T_{H_2}} \left[-p_{H_2} + \frac{1}{K_{H_2}} [q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}^r] \right] \quad (16)$$

$$\frac{dp_{H_2O}}{dt} = \frac{1}{T_{H_2O}} \left[-p_{H_2O} + \frac{2K_r I_{fc}^r}{K_{H_2O}} \right] \quad (17)$$

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{1}{T_{O_2}} \left[-p_{O_2} + \frac{1}{K_{O_2}} \left[\frac{1}{r_{H_2O}} q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}^r \right] \right] \quad (18)$$

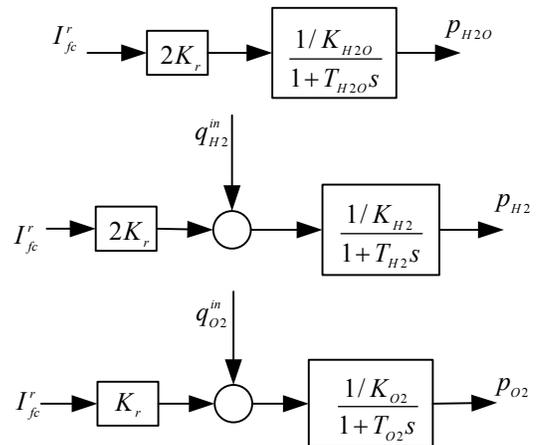


Fig. 13. Diagrama de Bloque para Reaccionantes de H_2 , H_2O y O_2

La capacidad de potencia pico es la relación de la potencia entregada teórica y la potencia nominal en el sistema de celda de combustible. Esto solo determinado con el área disponible de la celda de combustible. Para la mas alta eficiencia posible total y el comportamiento dinámico de seguimiento de la carga, p_k debe ser lo mas grande posible. Como este valor es directamente proporcional al área efectiva de la celda de combustible por una constante de salida, consideraciones de costos restringen el mas alto valor con siendo preferidos valores entre 130 y 180% [3]. En la práctica este valor tan alto es restringido por la seguridad de operación. Con el objetivo de prevenir el daño del electrolito, la diferencia de presión entre el hidrogeno y el oxigeno que pasa a través del ánodo y el compartimiento de gas del cátodo debe estar por debajo de 4kPa bajo condiciones normales de operación y 8kPa bajo condiciones transitorias. El sistema de celda de combustible del valor de r_{H_2O} debe ser ajustado con la idea de mantener la diferencia de presión por debajo de 4kPa bajo condiciones normales. De tal modo, el flujo de entrada del oxigeno es controlado para mantener r_{H_2O} , por el control del compresor de aire. El valor instantáneo (E) de la FEM de la celda es obtenido de la ley de Nerst [13] en términos de las presiones, y donde se considera las perdidas ohmicas.

$$V_{fc}^r = N_0 \left(E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} [p_{O_2}]^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \right) + r I_{fc}^r \quad (19)$$

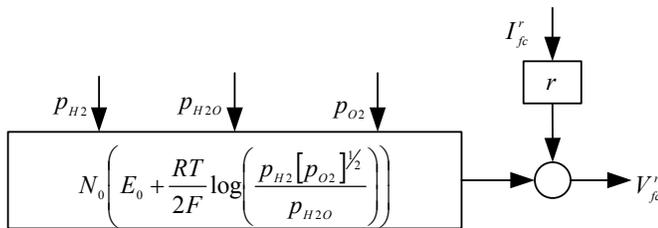


Fig. 14. Diagrama de Bloque para la Ecuación de Nerst incluyendo las pérdidas ohmicas

V. CONCLUSIONES

Este artículo recoge un resumen de las ecuaciones termodinámicas básicas que definen el desempeño de una celda de combustible. La ecuación de Nerst, y la energía de Gibbs, muestran la dependencia que existe en el voltaje instantáneo de la CdC de condiciones operativas como: temperatura, presión y uso de combustible entre otros. De igual modo se construyó un modelo simplificado para una SOFC, que considera las correlaciones termodinámicas antes mencionadas, y que constituye una herramienta muy simple en parámetros y variables para la simulación de la dinámica lenta electro-química de la celda.

APÉNDICE

Lista de Símbolos

q_{in}^in, q_{in}^r	Flujo de hidrogeno de entrada o reacción respectivamente, kmol/s.
$p_{H_2}, p_{O_2}, p_{H_2O}$	Presión parcial de hidrogeno, oxigeno o agua respectivamente, atm.
I_{fc}^in, I_{fc}^r	Demanda de corriente del sistema de celda de combustible o corriente de salida, respectivamente.
V_{fc}^in, V_{fc}^r	Voltaje de entrada del sistema de celda de combustible o voltaje de salida real, respectivamente
ΔP	Diferencia entre la potencia generada, y la potencia demandada P_D .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.-M. Borbely, “**Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium**”, CRC Press, 2001.
- [2] J. H. Hirschenhofer, “**Fuel Cell Status: 1996**”, IEEE AES Magazine, March 1997.
- [3] Y. Zhu and K. Tomsovic, “**Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells**”, Electric Power Systems Research 62(2002), pp. 1-11.
- [4] R. Anahara, S. Yokokawa, and M. Sakurai, “**Present status and future prospects for fuel cell power systems**,” *Proc. IEEE*, vol. 81, pp. 399–408, Mar. 1993.
- [5] D. J. Hall and R. G. Colclaser, “**Transient modeling and simulation of tubular solid oxide fuel cells**,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, to be published.
- [6] M. D. Lukas, K. Y. Lee, and H. Ghezal-Ayagh, “**Development of a stack simulation model for control study on direct reforming molten carbonate fuel cell power plant**,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, to be published.
- [7] E. Hirst and B. Kirkby, “**Creating competitive markets for ancillary services**”. ORNL/CON-448, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 1997.
- [8] C.J. Hatziadoniou, A.A. Lobo, P. Pourbohrat and M. Daneshdoost. “**A Simplified Dynamic Model of Grid-Connected Fuel Cell Generators**”. *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 17, N 2, April 2002.
- [9] N. Hadjsaid, J.-F. Canard, and F. Dumas, “**Dispersed generation impact on distribution networks**,” *IEEE Comput. Applicat. Power*, pp. 22–28, Apr. 1999.
- [10] M. K. Donnelly, J. E. Dagle, D. J. Trudnowski, and G. J. Rogers, “**Impacts of the distributed utility on transmission system stability**,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 741–746, May 1996.
- [11] J. Appleby and F. R. Foulkes, Eds., **Fuel-Cell Handbook**, New York: Van Nostrand Reinhold, 1989, pp. 41-3–41-15.
- [12] L. J. Blomen and M. N. Mugerwa, Eds., **Fuel Cell Systems**, New York: Plenum, 1993, pp. 37–69.
- [13] EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, “**Fuel Cell Handbook**”, Fifth Edition, 2000.
- [14] J. Padullis, G.W. Ault, J.R. McDonald, “**An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation**”, *J. Power Sources* 86 (2000) 495_500.
- [15] F. González, “**Modelo Dinámico para Celda de Combustible: Aplicación en Generación Distribuida**”. I Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, ICIBELECT 2004, ULA Mérida, 2 al 5 Mayo 2004.