

ESTUDIO TEÓRICO DE LA COGENERACIÓN CON CELDAS DE COMBUSTIBLE PARA LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS

César A. Isaza^{1*}, Isaac Pilatowsky², Rosenberg J. Romero³, Wilfrido Rivera²

¹Grupo de Energía y Termodinámica, Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1° No. 73-34, Medellín, Colombia.

²Centro de Investigación en Energía – UNAM, C.P. 34, Temixco 62580, Mor. México

³Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas – UAEM, Av. Universidad 1001, C.P. 62210, México

*Tel (574)412-5246, Fax (574)411-1207, cesar.isaza@correo.upb.edu.co

RESUMEN

Las celdas de combustible se utilizan generalmente para producir electricidad como resultado de reacciones electroquímicas entre un combustible y un oxidante. Sin embargo, una considerable cantidad de calor residual y agua, se expulsan a la atmósfera como un subproducto de la reacción total en las celdas de combustible. Con el fin de aumentar la eficiencia de celdas de combustible, una parte del calor residual producido por una PEMFC se puede utilizar como una fuente de calor de un sistema de refrigeración por absorción para el enfriamiento de un cuarto frío, logrando temperaturas entre 5-10°C, suficientes para alcanzar las condiciones requeridas en el almacenamiento de muchos tipos de frutas y verduras. De esta manera, es posible diseñar un sistema de cogeneración para la producción de electricidad, calefacción y refrigeración con el propósito de conservar alimentos. En este trabajo, se ha desarrollado un modelo matemático para determinar las condiciones de operación óptima de un sistema de refrigeración por absorción, que usa como sustancia de trabajo una solución de monometilamina/agua, la cual tiene la particularidad de requerir bajas temperaturas de generación (menores a 80°C); obtenido del calor residual de una PEMFC H₂/O₂ de 2.5 kW de potencia nominal.

* Presentación oral del trabajo

1.- Introducción

Los sistemas de autogeneración eléctrica o de algunos de producción en las industrias, descargan diferentes tipos de energía térmica, tales como: agua caliente, vapor o gases de combustión. Los sistemas de refrigeración por absorción pueden aprovechar estas fuentes de energía, aumentando la eficiencia total de generación de energía y reduciendo costos de operación.

La producción simultánea de energía eléctrica, calor y frío es una forma de cogeneración o poligeneración [1], también conocida como CHP (Cooling, Heat and Power, por sus siglas en inglés). En la figura 1 se presentan algunas de las alternativas de calor de desecho a partir de sistemas de generación de potencia que pueden ser potencialmente usadas para producir calor y frío.

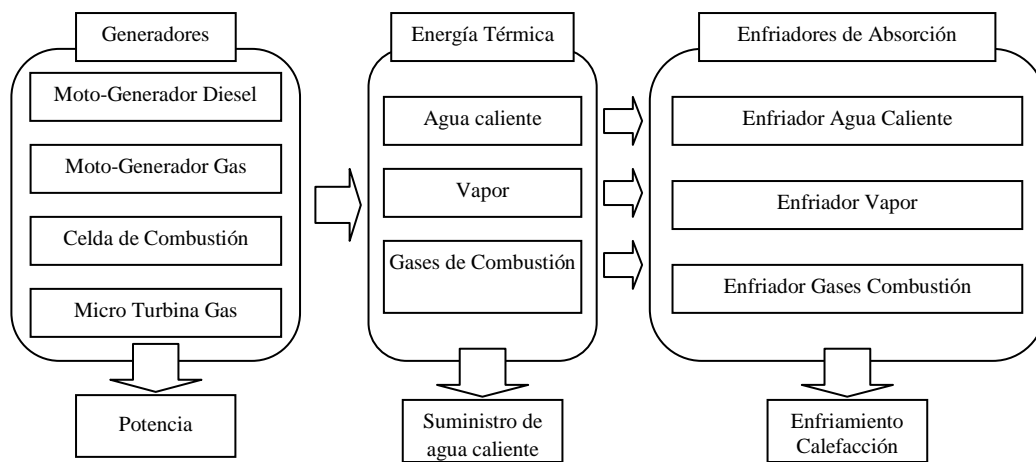


Figura 1. Tipos de calores residuales en sistemas de generación y sistemas de refrigeración por absorción (Ishimatsu 2007)

De acuerdo con reportes de la Agencia Internacional de Energía [2], la eficiencia global de una central de generación es alrededor del 35% y la de una caldera para la producción de calor ronda el 90%. Comparando con un sistema de cogeneración, este puede alcanzar una eficiencia global del 85%, resultando en ahorros de combustible de hasta el 35% (ver figura

2), lo que se traduce directamente en un beneficio económico en costos de combustible y reducción de emisiones de CO₂.

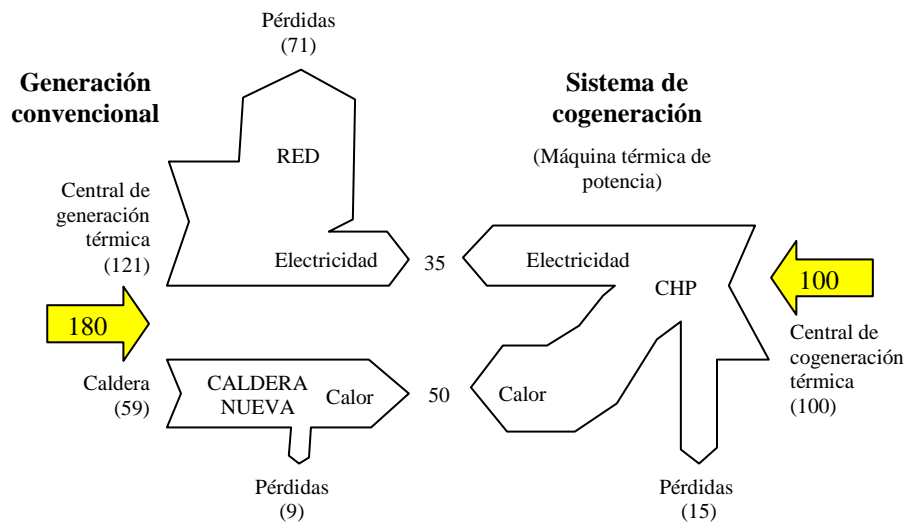


Figura 2. Sistema convencional vs Cogeneración [2]

Entre las diferentes alternativas de generación de potencia eléctrica, las celdas de combustión, se consideran una de las tecnologías más eficientes y limpias. Estas poseen características que las hacen especialmente atractivas para ser integradas en sistemas CHP, junto con los sistemas de refrigeración por absorción.

2.- Principio de operación de una celda de combustión PEMFC

Las celdas de combustión convierten energía química directamente en energía eléctrica, sin involucrar sistemas de conversión de energía térmica a mecánica. Por lo tanto, la eficiencia de las celdas de combustión puede exceder el límite de Carnot aún cuando operan a temperaturas relativamente bajas (80°C) [3]. Existen diferentes tecnologías de celdas de combustión, caracterizadas por las condiciones de operación, composición y aplicaciones [4]. Todas estas pueden usar hidrogeno como combustible, alcanzando eficiencias de hasta el 60%. Las elevadas eficiencias, su confiabilidad y modularidad, hacen que las celdas de combustión sean aptas para muchas aplicaciones; además, poseen un excelente desempeño a cargas parciales y no generan emisiones atmosféricas ni acústicas.

Aunque las celdas de combustión no son motores térmicos, estas pueden producir calor. Dependiendo del tamaño del sistema, la temperatura del calor recuperado y los requerimientos del caso particular, esta energía térmica puede ser desechada o usada para producir vapor, agua caliente o en algunos casos, producir frío a través de un sistema de refrigeración térmico (Figura 3).

Las celdas de combustión tipo PEMFC son particularmente atractivas en aplicaciones de producción de frío, ya que pueden operar cerca de la temperatura ambiente, es fácil de encender y parar, además que puede operar con una gran variedad de combustibles [5]. En este trabajo la PEMFC analizada es operada con hidrógeno y oxígeno (H_2/O_2).

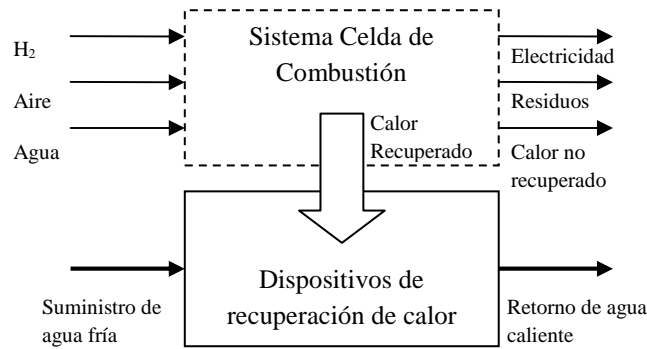
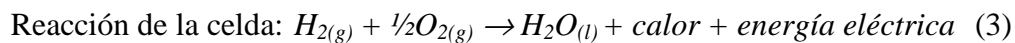
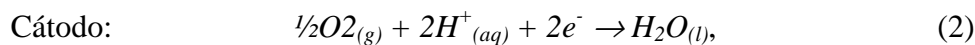
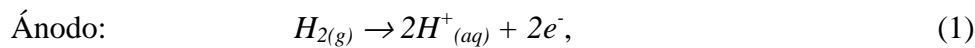


Figura 3. Recuperación de calor en una celda de combustión

Las reacciones electroquímicas básicas que ocurren en una PEMFC para productor potencia eléctrica son [6]:



La curva característica corriente-voltaje (I-V) de una celda PEMFC puede ser modelada usando ecuaciones empíricas que toman en cuenta sobre-potenciales debido a la ecuación

de Tafel, resistencias en la membrana de intercambio de protones y limitaciones de transporte de masa [7].

La influencia de la temperatura, la presión y las condiciones de reacción sobre el desempeño de una PEMFC es difícil de modelar, sobre todo por la baja linealidad en condiciones de corriente alta. Sin embargo, si el objetivo es tener una predicción exacta de cero a corrientes medio altas, que es el rango de operación de una PEMFC real, entonces la Ecuación 4 es adecuada [8].

$$U = U_o - b \log I - RI \quad (4)$$

Donde:

U	Voltaje por celda, mV
U_o	Voltaje de circuito abierto por celda, mV
I	Densidad de corriente, mA cm ⁻²
b	Pendiente de Tafel, mV dec ⁻¹
R	Resistencia, Ω cm ²

La Ecuación 4 es apropiada especialmente para predecir la curva I - U en celdas PEMFC H₂/O₂, ya que presentan un comportamiento más lineal que las celdas PEMFC H₂/Aire. Sin embargo, la predicción del voltaje puede ser adecuada en celdas de combustión H₂/Aire, cuando el flujo de aire en el lado del cátodo es mayor que el propio flujo estequiométrico.

Entre tanto, la presión del hidrógeno y el oxígeno en una celda PEMFC H₂/O₂, permanece relativamente constante durante toda su operación. Adicionalmente en una celda PEMFC H₂/Aire, generalmente se usa un ventilador para forzar el aire atmosférico a pasar por el lado del cátodo. Por lo tanto, la influencia de la presión en el comportamiento de la curva I - U es limitada.

De este modo, la temperatura es la principal variable que debe ser considerada en el modelo matemático. Los parámetros U_o , b y R de la Ecuación 4, deben ser linealizados en función de la temperatura.

3.- Desempeño en celdas de combustión tipo PEMFC

El desempeño de una PEMFC depende de las variaciones de temperatura, ya que la conductividad de la membrana (protón) es fuertemente dependiente de su grado de hidratación y por lo tanto la temperatura de la membrana así como la presión de saturación del vapor es una función exponencial de la temperatura [9].

En la figura 4 se presenta el comportamiento de la eficiencia de una celda de combustión de PEMFC H_2/O_2 de 2.5 kW, de 26 celdas en serie, con un área de sección transversal de 300 cm^2 operando a tres diferentes temperaturas (70, 50 y $35\text{ }^\circ\text{C}$).

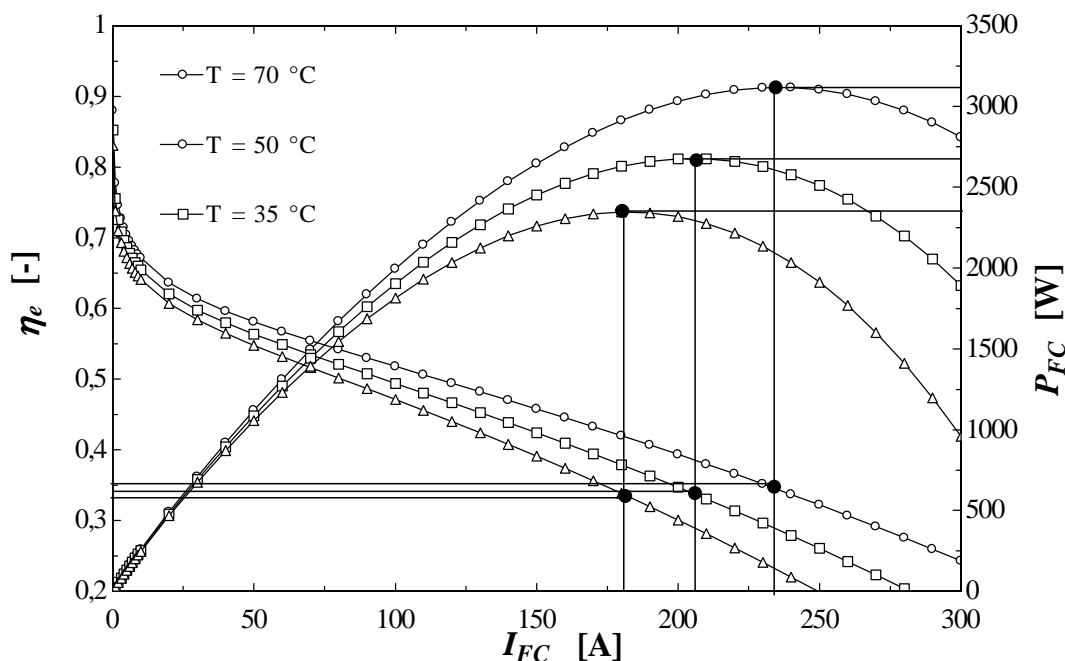


Figura 4. Eficiencia energética y potencia para una celda PEMFC¹

Las curvas de la figura 4 presentan el punto de máxima potencia, los límites máximos de operación práctica para tres temperaturas de operación. A una temperatura de operación de $70\text{ }^\circ\text{C}$, la máxima potencia (3119 W) ocurre a 235 A y 13.2 V, presentando una eficiencia

¹ Condiciones de prueba: presión $H_2 = 3.77\text{ bar}$, presión $O_2 = 4.46\text{ bar}$, Flujo $H_2 = 1.02$ veces el estequiométrico, Flujo $O_2 > 1$ veces el estequiométrico.

energética de 0.34; entre tanto para una temperatura de 35 °C, la máxima potencia (2347 W) ocurre a 182.2 A y 12.8 V, con una eficiencia de 0.33. El ejemplo anterior demuestra que existe una diferencia relativamente pequeña entre la eficiencia óptima o el voltaje de operación ideal para la máxima potencia y las condiciones de temperatura de operación altas y bajas.

La evaluación del desempeño permite establecer los rangos de operación prácticos a diferentes temperaturas, tales como la corriente máxima a partir de la cual ya no es conveniente operar la celda de combustión y el voltaje adecuado para la aplicación específica.

4.- Cogeneración en celdas de combustión

Una PEMFC produce una cantidad similar de calor residual a la potencia eléctrica generada, tal que el rendimiento de conversión energética a electricidad es alrededor del 80%. Para una celda de combustión PEMFC H₂/O₂ evaluada, en condiciones de temperatura de operación de 70 °C y 18 V, genera 2.5 kW y disipa un promedio de 2,8 kW de calor.

El modelo termodinámico de la celda de combustión comienza con las ecuaciones de energía que permiten balancear el calor generado de la celda con el calor removido de esta. El calor generado en una celdas de combustión, sin sufrir un cambio de fase, incluye: calores entrópicos de reacción (55%), el calor reversible de reacciones electroquímicas (35%) y calor de Joule (10%) [9]. El calor total (Q_{total}), de una celda de combustión puede ser estimado a partir del cálculo del calor reversible evacuado (Q_{rev}) y el calor de generación irreversible (Q_{irrev}), tal como se expresa en la Ecuación 5.

$$\begin{aligned} Q_{total} = Q_{rev} + Q_{irre} &= \left(-T \frac{\partial U_o}{\partial T} \right) \cdot I \cdot A_{react} + (U_o - U) \cdot I \cdot A_{react} \\ &= \left(U_o - T \frac{\partial U_o}{\partial T} \right) \cdot I \cdot A_{react} - U \cdot I \cdot A_{react} \end{aligned} \quad (5)$$

Considerando una celda de combustión de H_2/O_2 , operando a una temperatura (T), presión (P) y una densidad de corriente (I), en un área superficial (A_{react}). El calor reversible (Q_{rev}) permite que la celda opere a diferentes voltajes (U), desde el equilibrio (U_0). El calor irreversible (Q_{irre}) generado es atribuido al fenómeno óhmico y de activación de polarizaciones en la celda de combustión.

Del calor total generado (Q_{total}) será potencialmente útil para el sistema de cogeneración, una fracción denominada calor de enfriamiento (Q_{cool}), necesario para mantener la celda a una temperatura de operación constante y que puede representar el 85%. Parte del calor total generado de la celda de combustión se almacenará (Q_{store}) y otra parte se eliminará por las paredes o evaporación del agua, como calor de pérdidas (Q_{loss}). Tal como se expresa en la Ecuación 6:

$$Q_{total} = Q_{store} + Q_{loss} + Q_{cool} \quad (6)$$

El calor de enfriamiento deberá ser transferido a través de un medio auxiliar, tal como por una corriente de agua. Por lo tanto, partiendo de la teoría básica de transferencia de calor, el calor de enfriamiento puede ser calculado mediante la Ecuación 7:

$$Q_{cool} = m_{cool} C_{cw} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) = UA_{HX} LMTD \quad (7)$$

Donde m_{cool} es el flujo másico de agua de enfriamiento, C_{cw} el calor específico del agua, $T_{cw,i}$ y $T_{cw,o}$ la temperatura del agua a la entrada y salida de la celda de combustión respectivamente. UA_{HX} , el producto del coeficiente global de transferencia de calor por el área de intercambio y $LMTD$ la diferencia media logarítmica de temperatura.

En la figura 5 se hace una representación esquemática de un sistema de cogeneración, donde se acopla un sistema de refrigeración por absorción de una etapa a una celda de combustión tipo PEMFC.

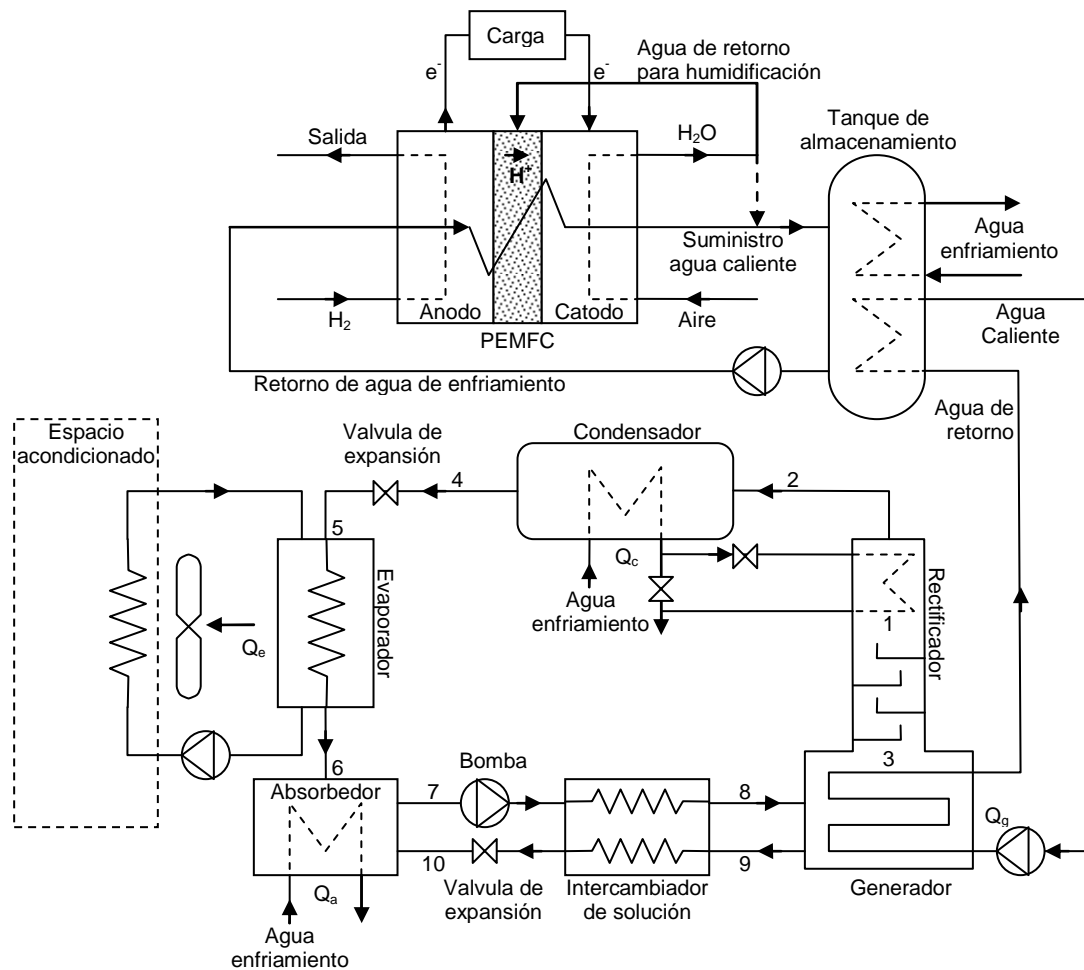


Figura 5. Esquema del sistema de cogeneración [10]

El ciclo de refrigeración por absorción propuesto, tiene como propósito servir como un sistema de enfriamiento para conservación de alimentos, con temperaturas de operación por debajo de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Donde el calor disipado por la celda de combustión para enfriamiento (Q_{cool}), es enviado a un tanque de almacenamiento, que sirve como fuente de agua caliente para un ciclo de refrigeración por absorción que usa como sustancia de trabajo una mezcla de monometilamina-agua (MMA-Agua), el cual tiene la ventaja de operar a temperaturas de generación aptas para ser usadas con fuentes de energía de baja temperatura ($< 80^{\circ}\text{C}$), propicio para el tipo de calor disipado por una celda de combustión tipo PEMFC.

5.- Acoplamiento de una celda de combustión y el sistema de refrigeración por absorción

El ciclo de refrigeración por absorción usando MMA-Agua, es sensible a la temperatura de evaporación, la cual determina la aplicación de enfriamiento para la cual este destinado el equipo [11]. En este sentido, se ha seleccionado un cuarto para la conservación de frutas y hortalizas, donde la temperatura del aire puede oscilar entre 4 y 7 ° C. Para obtener estos niveles de temperatura se espera que la temperatura de evaporación (T_e), se encuentre alrededor de 0°C. Mientras que la potencia de enfriamiento del sistema de refrigeración por absorción (Q_E), depende directamente de la disponibilidad del calor disipado por la PEMFC (Q_{cool}).

Para acoplar el modelo de la celda de combustión y el del ciclo de refrigeración por absorción usando la mezcla MMA-Agua [12], es necesario definir Las variables independientes, tales como: la temperatura de absorción (T_a) y la temperatura de condensación (T_c), fueron fijadas de acuerdo a las condiciones ambientales. Además, de estas depende la composición de la solución concentrada y la temperatura mínima de generación. Por lo tanto, buscando una mínima temperatura de generación (T_g), que se adapte a las fuentes de calor disponibles en una celda de combustión tipo PEMFC, en un rango de 35 a 80 °C. En este sentido se consideró una temperatura mínima de absorción (T_a) y condensación (T_c) de 25°C. Por otro lado, la eficacia del intercambiador de solución (ϵ_{shx}) se ha supuesto de 0.7 y la concentración de la solución (y_r) en 0.98.

La eficiencia del sistema de cogeneración (η_{ce}), relaciona la potencia de enfriamiento en el evaporador (Q_E) y la potencia eléctrica generada por la celda de combustión (P_{FC}), con respecto a la energía aportada por el hidrógeno (ΔH_{H2}). Entre tanto, la eficiencia de la celda (η_e) y el COP del sistema de enfriamiento, se pueden calcular de la siguiente forma:

$$\eta_{ce} = \frac{Q_E + P_{FC}}{\Delta H_{H2}}; \quad \eta_e = \frac{P_{FC}}{\Delta H_{H2}}; \quad COP = \frac{Q_E}{Q_{cool}} \quad (8)$$

En la figura 6 se presenta el comportamiento de la eficiencia del sistema de cogeneración (η_{ce}), la eficiencia de la celda de combustión (η_e), el COP del sistema de enfriamiento y la potencia ; en función de la temperatura de operación, la cual equivale a la temperatura del agua de enfriamiento de la celda o la temperatura de generación en el ciclo de refrigeración por absorción.

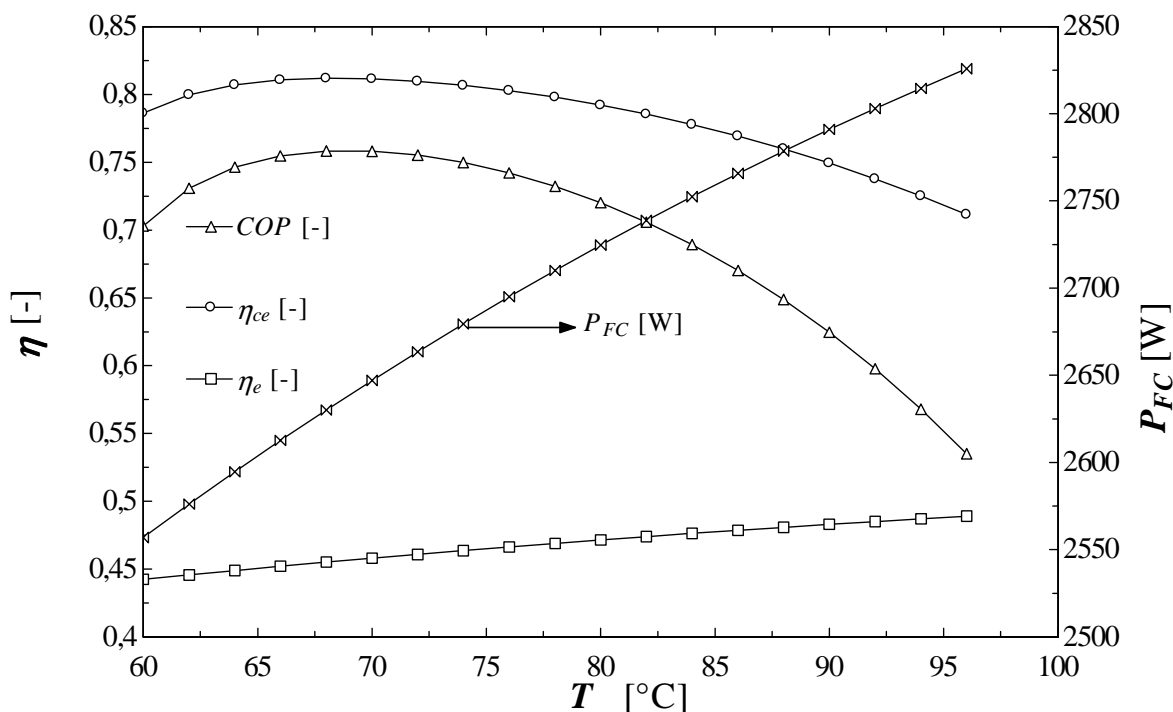


Figura 6. Comportamiento de la η_{ce} , η_e , el COP y la P_{FC} con la temperatura de operación

Es evidente que el COP del sistema de refrigeración por absorción que opera con la mezcla MMA-Agua, es el más sensible a la variación de la temperatura; lo que repercute en la eficiencia global del sistema de cogeneración. También se puede deducir una temperatura óptima de operación de 68,4 °C, lo que permite además estimar unas condiciones ideales de operación para la celda de combustión.

En la tabla 1 se presentan los resultados de las condiciones óptimas de operación de una celda de combustión tipo PEMFC, para generar 2,6 kW de energía eléctrica y producir 2,0 kW de capacidad de enfriamiento, usados para la conservación de alimentos.

Tabla 1. Condiciones óptimas de operación sistema de cogeneración

PEMFC	Valor	Unidad
Potencia salida (P_{FC})	2634	W
Calor total (Q_{total})	3174	W
Calor de enfriamiento (Q_{cool})	2716	W
Eficiencia (η_e)	45	%
Tensión (U)	17.5	V
Corriente (I)	150	A
Consumo de H ₂ (V_{H_2})	1.685	Nm ³ /h
Consumo de O ₂ (V_{O_2})	0.908	Nm ³ /h
Flujo de agua de enfriamiento (m_{cool})	0.233	m ³ /h
Ciclo de refrigeración MMA-Agua		
Capacidad de enfriamiento (Q_E)	2060	W
Calor absorbedor (Q_A)	2727	W
Calor condensador (Q_C)	2156	W
Calor generador (Q_G)	2716	W
Eficiencia ciclo (COP)	0.75	-
Cogeneración		
Eficiencia global (η_{ce})	81	%

Con la información de la tabla 1, se puede tener certeza de las condiciones ideales de operación de la celda de combustión tipo PEMFC, necesarias para alcanzar niveles óptimos de eficiencia energética en el sistema de cogeneración propuesto para la producción simultánea de energía eléctrica y frío para la conservación de alimentos.

Los ahorros alcanzados del sistema integrado de cogeneración pueden representan mas de un 30% del costo de operación, equivalente a 2746 W de energía térmica necesarios para atender el sistema de enfriamiento, con los consabidos impactos económicos y ambientales.

6.- Conclusiones

Se ha evaluado el desempeño de una celda de combustión tipo PEMFC de 2.5 kW de capacidad nominal en función de la temperatura de operación para 70, 50 y 35 °C. Encontrándose que la eficiencia óptima de la celda y el voltaje óptimo de operación para el punto de máxima potencia, no varían considerablemente con la diferencia de temperatura.

Las celdas de combustión tipo PEMFC generan gran cantidad de calor, que debe ser disipado como calor de enfriamiento, a temperaturas entre 20 y 80 °C, el cual es potencialmente aprovechable en sistemas de cogeneración para mover máquinas térmicas de producción de frío.

El ciclo de refrigeración por absorción que usa la mezcla de MMA-Agua es apto para acoplarse a una celda de combustión tipo PEMFC, en un sistema de cogeneración, ya que las temperaturas de generación en el ciclo de refrigeración son compatibles con las del calor disipado de la celda de combustión.

La integración del modelo termodinámico de la celda de combustión tipo PEMFC y el ciclo de refrigeración por absorción ha permitido establecer las condiciones óptimas de operación de la celda para alcanzar las máximas eficiencias de un sistema de cogeneración para producción simultánea de energía eléctrica y frío para la conservación de alimentos.

Los sistemas de cogeneración que integran tecnologías limpias y eficientes, tales como las celdas de combustión y los ciclos de refrigeración por absorción, se presentan como una solución sostenible a la problemática del abastecimiento energético y la búsqueda de tecnologías adecuadas para la cadena de frío.

7.- Agradecimientos

Los autores externan su gratitud COLCIENCIAS y a la IV Reunión de la Comisión Mixta de Cooperación Científica y Técnica entre México y Colombia de la Agencia de

Cooperación Internacional Acción Colombia y la Secretaría de Relaciones Exteriores de México por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación.

8.- Referencias

- [1] Cornoas, A. (2007), *Proceedings of the 1st European Conference on Poligeneration*, Tarragona, España.
- [2] Knight, I. y Ugursal I., (2005), *Residential Cogeneration Systems: A Review of the Current Technologies*. Annex 42 IEA. <http://cogen-sim.net/>.
- [3] Lutz A.E., Larson R.S., Keller J.O. (2002), *International Journal of Hydrogen Energy*, 27 (10), 1103-1111.
- [4] EG&G Services (2000), *Fuel Cell Handbook*, Science Applications International Corporation, U.S. Department of Energy, 5th Ed. USA.
- [5] Dorer, V., Weber, R., y Weber, A. (2005), *Energy and Buildings*, 37 (11), 1132-1146.
- [6] Ferguson A., Ugursal V.I. (2004), *J. of Power Sources*; 137(1): 30-42.
- [7] Chamberlin C. E., Kim J., Lee S.-M., and Srinivasan S. (1995), *Journal Electrochemical Society*, 142 (8), 2670–2674.
- [8] Ulleberg Ø (1998) *Stand-Alone Power Systems for the Future: Optimal Design, Operation & Control of Solar-Hydrogen Energy Systems*. PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. ISBN 82-471-0344-3.
- [9] Hyunchul J., Hua M. and Chao-Y. W., (2005), *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 48 (7), 1303-1315.
- [10] Pilatowsky, I., Romero, R.J., Isaza, C.A., Gamboa, S.A., Rivera, W., Sebastian, P.J., Moreira J. (2007), *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (15), 3174-3182.
- [11] Pilatowsky, I., Rivera, W. y Romero, R.J. (2001), *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 70, 287–300.
- [12] Isaza, C., (2008) *Estudio teórico y experimental del sistema monometilamina - agua para su integración en un ciclo de refrigeración por absorción*. PhD tesis. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.