

# MEDIDAS DE SUTENTABILIDAD PARA PROCESOS INDUSTRIALES CON ENFOQUE A ENERGÍAS ALTERNATIVAS: CELDAS DE COMBUSTIBLE

Herrera Villagomez Luis Ricardo (1); Correa Durán Mónica Stephen (2)  
Danahe Marmolejo Correa (3)

<sup>1</sup> Bachillerato General, Universidad de Guanajuato | rhv1805@gmail.com

<sup>2</sup> Licenciatura en ingeniería Química Petrolera, División, Universidad popular de Chontalpa | www.monii\_121022@hotmail.com

<sup>3</sup> Departamento de física, División de ciencias e ingenierías, campus león, Universidad de Guanajuato  
| d.marmolejocorrea@ugtomx.onmicrosoft.com

## Resumen

El siguiente artículo deja en claro que "La exergía resulta un indicador de eficiencia útil y eficaz en los procesos industriales, permitiendo la búsqueda de mejoras". Los actuales indicadores utilizados por los países más avanzados no cubren la necesidad de seguir una ruta sostenible, utilizando las leyes de la física se puede llegar a un indicador más eficiente que los actuales, otorgando oportunidades de mejora a los procesos industriales. Se utilizó el esquema de una celda de combustible MCFC para hacer las suposiciones de teóricas y se comparó la eficiencia exérgica con el potencial eléctrico ideal.

## Abstract

The following article makes clear that "exergy is an indicator of useful and effective efficiency in industrial processes, enabling the search for improvements." Current indicators used by the most advanced countries do not cover the need to follow a sustainable path, using the laws of physics can become more efficient than current indicator, providing opportunities for improvement to industrial processes. the outline of a MCFC fuel cell was used to make theoretical assumptions and exergic efficiency compared to the ideal electric potential.

### Palabras Clave

Exergy; Efficiency; Indicators; Processes;

## INTRODUCCIÓN

Actualmente se realizan esfuerzos de varias dependencias del gobierno, instituciones internacionales y agrupaciones de científicos por disminuir las consecuencias de nuestros patrones de consumos tanto en productos, recursos y energía. La única manera de lograr esto es cambiando el rumbo de nuestras fuentes de suministro hacia una ruta sostenible, es decir *“Satisfaciendo las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las del futuro para atender sus necesidades”*.

La forma principal de conocer y analizar el desarrollo de procesos y/o fenómenos es a través de indicadores, estos en su mayoría están relacionados con el “consumo/producción” o el “producción/costos” no es utilizado de manera oficial alguno relacionado con la eficiencia en la producción de la energía, utilizando las leyes de la física podríamos buscar algún otro indicador más capaz y eficiente en arrojar datos precisos y confiables, que nos lleven hacia el camino del desarrollo sostenible siendo aplicado en procesos industriales y en la generación de energía.

En el desarrollo de la investigación nos basaremos en las siguientes bases teóricas

Del informe: *“Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías”* realizado en conjunto por el Organismo Internacional de la Energía Atómica, el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, la Agencia Internacional de la energía, la Eurostat y la Agencia Europea de Medio Ambiente [1]. En 2009 e impreso en Viena. Toda la base teórica de las celdas de combustible será tomada del IEE del informe de Ulises Cano castillo [2]. Tomaremos la teoría y deducción de fórmulas de potencial eléctrico del trabajo de tesis de maestría de los Ingenieros Enrique Escobedo Hernández y Luis Alberto Zamora Campos. Cuernavaca, Morelos, México 2008. [3]El informe de la IIE de Ulises Cano Castillo. [4] El trabajo de maestría de Néstor Ramírez Morales.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. (Imagen 1) Por ejemplo, puede generar electricidad combinando hidrógeno y oxígeno

electroquímicamente sin ninguna combustión. Estas celdas no se agotan como lo haría una batería, ni precisan recarga, ya que producirán energía en forma de electricidad y calor en tanto se les provea de combustible. En la práctica, la corrosión y la degradación de materiales y componentes de la celda pueden limitar su vida útil. La manera en que operan es mediante una celda electroquímica consistente en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrólito. El oxígeno proveniente del aire pasa sobre un electrodo y el hidrógeno gas pasa sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón; al ocurrir esto, el hidrógeno oxidado (ahora en forma de protón) y el electrón toman diferentes caminos migrando hacia el segundo electrodo llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrólito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor externo (carga). Al final de su camino ambos se vuelven a reunir en el cátodo donde ocurre la reacción de reducción o ganancia de electrones del oxígeno gas para formar agua junto con el hidrógeno oxidado. Así, este proceso produce agua 100% pura, corriente eléctrica y calor útil, por ejemplo, energía térmica.

A diferencia de las máquinas de combustión cuya eficiencia está regida por el ciclo de Carnot y limitada por la temperatura, la eficiencia teórica de las celdas de combustible está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en una reacción electroquímica con la cantidad de material reactivo, es decir, con la cantidad de combustible. La mayor ventaja de las celdas de combustible descansa realmente en el hecho de que no están limitadas por la temperatura, lo cual les otorga el gran beneficio de alcanzar altas eficiencias.

Tipo de celda	Electrólito	Aplicación inmediata	(MW)	Disponible comercialmente	Eficiencia com. eléctrico (cogeneración)	Temp. de operación/ electrocatalizador
PEM	Membrana de intercambio protónico	Generación distribuida, transporte y aplic. móviles	Hasta 0.25	1997 (-1 kW) 2002 (transp.) 2001 (250 kW)	>40% (>70%)	80C/Pt
PAFC	Ácido fosfórico	Generación distribuida, cogeneración y transporte	0.2 - 10	1996 (200 kW) 1992 (transp.)	40% (80%)	200 C/Pt
MCFC	Carbonato fundido (sal fundida "iónóvil")	Generación distribuida, cogeneración, poten. central	0.25 - 100 (y mayor)	1997 2000	45% (70%)	650C/Ni
SOFC	Oxido sólido (cerámico)	G. distrib. poten. central	1 - 10 (y mayor)	2000	> 50% (> 80%)	1000C/perosquitas

Imagen 1, comparación de celdas de combustible.

**Tabla 1: Indicadores Energéticos de Desarrollo Sustentable. Tomada de artículo 1**

Nombre del Indicador	Datos de los indicadores	
	Descripción	Componentes
1. ECO 2	Uso de energía por unidad de PIB	Uso de energía (suministro total, de energía primaria, consumo final total y uso de electricidad).
2. ECO 3	Eficiencia de la conversión y distribución de energía	Pérdidas en los sistemas de transformación incluidas las pérdidas en la generación, transmisión y distribución de electricidad.
3. ECO 6	Intensidades energéticas de la industria	Uso de energía en el sector industrial y por rama de manufacturas
4. ECO 7	Intensidades energéticas del sector agrícola	Uso de energía en el sector agrícola – Valor agregado correspondiente
5. ECO 8	Intensidades energéticas del sector comercial/de los servicios	Uso de energía en el sector de los servicios/comercial – Valor agregado correspondiente
6. ECO 9	Intensidad energética de los hogares	Uso de energía en los hogares y por usos finales clave. Número de hogares, superficie edificada, personas por hogar, propiedad de aparatos electrodomésticos
7. ECO 10	Intensidades energéticas del transporte	Uso de energía en el transporte de pasajeros y de carga, y por modalidad Pasajeros/km recorridos y toneladas/km de carga transportada, y por modalidad
8. ECO 12	Porcentaje de energía no basada en el carbono en la energía y electricidad	Suministro primario, generación de electricidad y capacidad de generación por energía no basada en el carbono. Suministro total de energía primaria, generación total de electricidad y capacidad total de generación
9. ENV 1	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por la producción y uso de energía, per cápita y por unidad de PIB	Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por la producción y uso de energía Población y PIB
10. ENV 3	Emisiones de Contaminantes atmosféricos procedentes de los sistemas energéticos	Emisiones contaminantes a la atmósfera

Se realiza un balance de energía en una planta de potencia, en este caso una celda de combustible MCFC. Posteriormente un análisis exergico y aplicar un indicador propuesto para medir la eficiencia exergetica con el fin de buscar mejoras. Estudiaremos los diferentes índices de sustentabilidad y hacer un análisis crítico sobre

ellos. Equipararemos conceptos de la segunda ley de la termodinámica con la sustentabilidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Realizaremos un balance de energía con ayuda del diagrama de la celda (imagen 1), posteriormente un análisis exergico y lo compararemos con el potencial eléctrico ideal de la celda, haciendo por último el cálculo de la eficiencia exergica y buscando posibilidades de mejora.

$$\Delta H_{H_2O} m_{H_2O} + \Delta H_{H_2} m_{H_2} + \Delta H_{O_2} m_{O_2} = Q_4 + \Delta H_{\text{productos}} m_{\text{productos}}$$

$$\Delta H = \Delta Q = mCp\Delta T$$

$$Ex = m \left[ Cp(T_1 - T_0) - T_0 Cp \ln \left( \frac{T_1}{T_0} \right) \right]$$

$$E_{Nernst} = E^0 + \frac{-\Delta S^0}{zF} (T - T_0) + \frac{RT}{zF} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{CO_2}^{-2}}{p_{H_2O} p_{CO_2}} \right] + \frac{RT}{zF} \ln \left[ \frac{p_{CO_2} p_{CO_2}^{-2}}{2p_{CO_2}} \right] + \frac{RT}{zF} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{CO_2}}{p_{H_2O} p_{CO_2}} \right] + \frac{RT}{zF} \ln \left[ \frac{p_{CO_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{CO_2}^2} \right]$$

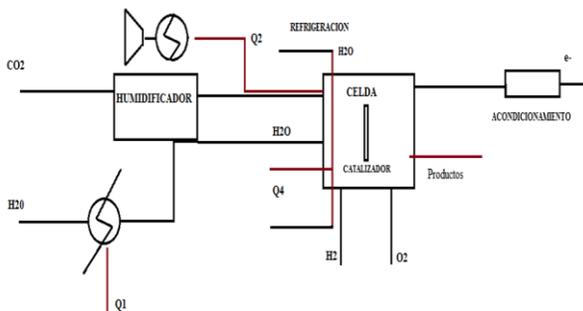


Diagrama De celda (Imagen 2)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis individual de cada indicador:

Indicador **ECO 2** - Utilizado para medir el uso de energía por unidad de PIB con el fin de conocer las intensidades energéticas sectoriales y expresar la relación general entre la utilización de la energía y el desarrollo económico. No es un indicador real de eficiencia energética sino uno basado en el consumo y costos de producción. Debe ser difícil de aplicar de forma global por las concentraciones demográficas, la disponibilidad de energía y las diferencias en interpretaciones.

Indicador **ECO 3** - Utilizado para medir la eficiencia de la conversión y distribución de energía, incluida

la eficiencia de los combustibles fósiles para la generación de la electricidad, eficiencia en la refinación del petróleo y las pérdidas producidas durante la transmisión y distribución del gas. Se mide en porcentajes, energía producida/ energía consumida y se calculan las pérdidas en la línea de transmisión. Mejorar la distribución de la energía es un buen paso hacia energía de calidad. Indicador **ECO 6** - Utilizado para medir la utilización de energía por unidad de producto y las tendencias energéticas. En el sector industrial es donde mayormente se consume la energía, este indicador ayuda a clasificar la industria por sectores o productos donde los costos energéticos son mayores. Tiene una estrecha relación con el desarrollo sostenible, ya que la mejora en la eficiencia energética, así como la reducción de su intensidad en los procesos industriales y la optimización de recursos son objetivos importantes

Indicador **ECO 7** - El uso de energía por unidad de valor agregado es una de las formas de medir las necesidades energéticas por unidad de producto en el sector agrícola. La disponibilidad de energía es un factor clave a fin de incrementar la productividad agrícola y mejorar la vida rural. Indicador **ECO 8** - El sector de servicios no requiere tanta energía como el sector industrial, conserva las mismas unidades que los otros indicadores. Actualmente un gran número de países tratan de reducir el consumo eléctrico de sus sistemas de refrigeración iluminación e informática. Esa es la finalidad del Indicador. Indicador **ECO 9** - Se utilizada para supervisar el uso de energía en el sector de los hogares. Las residencias tienen patrones de consumo muy marcados. La mejora de eficiencia energética en este sector constituye una prioridad para muchos países, debido a que se traduce en una utilización más efectiva de los recursos energéticos y una reducción de los impactos ambientales negativos, utiliza las mismas unidades que el resto de los indicadores ECO.

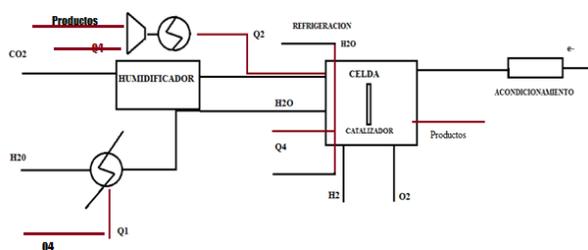
Indicador **ECO 10** - El transporte en uno de los principales consumidores de energía sobre todo en forma de derivados del petróleo, lo que convierte al transporte en el principal motor de la demanda de petróleo a nivel global. Este está al servicio del sector económico y del sector social, pero su uso repercute también en el agotamiento, en la contaminación del aire y en el cambio climático.

Indicador **ECO 12** - Utilizado para medir el porcentaje de fuentes de energía no basado en el carbono y en la generación de electricidad por métodos alternos y la capacidad de generación. El fomento de la energía y de la electricidad procedente de fuentes alternas reviste la máxima prioridad del desarrollo sostenible. El incremento de este indicador se traduce en una reducción de emisiones. Se incluyen fuentes de energía renovables, los combustibles no fósiles y la energía nuclear.

Indicador **ENV 1** - Mide emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la producción y uso de energía per cápita y por unidad de PIB. Se incluyen gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y N<sub>2</sub>O.

Indicador **ENV 3** - Emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de todas las actividades relacionadas con la energía, incluidos la producción de electricidad y el transporte. Los principales motivos de la preocupación creciente son las emisiones de sustancias acidificantes, como óxidos de azufre y de nitrógeno; gases formadores de ozono (precursores del ozono), como los compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono (CO); así como las partículas finas. Sus unidades son toneladas.

El balance de energía del anterior sistema nos arroja, tomando como entalpía de referencia al ambiente, -271.8857 KJ. Que es la energía salida del sistema y aprovechable y el análisis exergetico nos da "586.258 - 222.285 = 363.973" así nos damos cuenta de la gran pérdida de exergía en el sistema, generalmente este ocurre por las diferencias de temperatura entre el sistema y el sumidero. Entonces la propuesta de mejora sería recircular las corrientes de salida por los canales previos, es decir el humidificador y los calentadores.



Mejoras propuestas (imagen 3)

El potencial eléctrico de nuestra celda es 1.87 V/mol, el ideal para este sistema es 1.03 a una temperatura de 923 °K, esto tendría repercusiones al calcular la eficiencia ideal de nuestra celda, más el análisis exergetico nos revela mejor que estos datos como volver más eficiente el proceso.

## CONCLUSIONES

La exergía resulta un indicador de eficiencia útil y eficaz en los procesos industriales, permitiendo la búsqueda de mejoras.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Dra. Danahe por su paciencia a lo largo de la estancia, gracias a la maestra Juárez Juárez por todo su apoyo para la realización del verano.

## REFERENCIAS

- [1] Organización Internacional de la Energía Atómica, Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías, julio 2008, 193, 13-120
- [2] Ing. Escobedo Hernández E. y Ing. Zamora Campos L. A. Cuernavaca, Modelado Dinámico de Celdas de Combustible, Trabajo de tesis, Morelos, México 2008
- [3] Ing. Cano Castillo U., 1999, Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica, boletín IIE, 208-215
- [4] Ramírez Morales N. 2004, "LA TECNOLOGIA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU INTERFASE ELECTRÓNICA DE POTENCIA PARA APLICACIONES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES", trabajo de tesis 28-140