



## **Estimación de la Eficiencia asociada a la Producción de Hidrógeno con Energía Solar Concentrada**

### **Estimation of Efficiency in the Hydrogen Production with Concentrated Solar Power**

**Valle-Hernández, J. y López-Pérez, P.**

Programa Educativo de Ingeniería en Energía; Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo; C.P.  
43860 Tolcayuca, Hidalgo.

[jvalle@upmh.edu.mx](mailto:jvalle@upmh.edu.mx)

#### **Resumen**

En el presente trabajo se evalúan dos procesos de producción de hidrógeno que emplean radiación solar concentrada como fuente de energía. Estos procesos son la electrolisis de alta temperatura y el ciclo termoquímico Yodo – Azufre. En este trabajo se describen los procesos, se analizan termodinámicamente y se obtienen sus eficiencias. Un modelado y simulación dinámica se realizará posteriormente. La electrolisis de alta temperatura involucra vapor sobrecalentado a más de 850° C, temperatura alcanzada por medio de concentradores solares, que permite disociar la molécula del agua de forma más eficiente. Mientras que el ciclo termoquímico Yodo – Azufre requiere dos niveles térmicos, el mayor de ellos a 850° C para la descomposición del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el menor aproximadamente a 360° C para la descomposición del HI, por lo que también se propone utiliza un concentrador solar para suministrar la energía térmica requerida para alcanzar dichas temperaturas. Ambos proceso tiene como productos únicamente hidrógeno y oxígeno, y alcanzan eficiencias superiores al 23 %. Estas eficiencias pueden mejorarse utilizando ciclos termoquímicos que operan a mayores temperaturas, lo anterior ha originado que procesos de producción de hidrogeno con energía concentrada sean muy prometedores.

Palabras clave: Ciclo Termoquímico, Electrolisis de Alta Temperatura, Energía Solar, Producción de Hidrógeno.



## **I. Introducción**

El uso de energías convencionales basadas principalmente en carbón y petróleo, ha representado el factor más importante de emisiones de gases contaminantes, especialmente de los denominados gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>, que contribuyen al grave problema del calentamiento global. Debido a la necesidad de reducir el nivel de contaminantes presentes en la atmósfera se requiere buscar nuevas soluciones que contribuyan al mejoramiento de estos problemas sin recurrir a limitaciones en la producción de energía, ya que esto implicaría un retraso en el desarrollo social, económico, tecnológico, científico y cultural.

Teniendo en cuenta que los beneficios e intereses en el uso de energías no convencionales como solución energética, a la problemática descrita anteriormente, van más allá de la reducción de costos, además de que el mayor uso de éstas brinda la oportunidad de reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles, se plantea entonces la necesidad de tener un vector energético que permita la introducción de fuentes alternas de energía. El combustible que se propone como acto importante en este vector es el hidrógeno.

El hidrógeno además de satisfacer, como lo hace actualmente, los procesos de la industria de refinación de combustibles, en el futuro su aplicación cobrará importancia como materia prima en la obtención de compuestos petroquímicos como sustitutos del petróleo; combinado con el monóxido de carbono obtenido del proceso de gasificación se obtiene un sustituto del gas natural



(Syngas) que puede utilizarse en la generación de energía eléctrica mediante el proceso de ciclo combinado y como producto, previamente purificado, para las celdas de combustible para auto transporte. También puede ser un portador de energía liberada de fuentes alternas.

El objetivo general de este trabajo fue determinar si los procesos para la producción de hidrógeno, que aplican conceptos innovadores, a partir de procesos termoquímicos que utilizan concentradores solares como fuente de energía, son viables energéticamente y ambientalmente para su producción industrial. Demostrar que estos procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno, para su uso como vector energético, son eficientes y competitivos, contribuirían a la reducción de contaminantes de efecto invernadero debido a que usan únicamente agua como materia prima y energía solar como fuente de energía. El alcance en esta primera etapa es sólo cualitativo.

## **II. Desarrollo Metodológico**

La metodología consistió en analizar por separado el concentrador solar y los procesos de producción de hidrógeno. Una vez obtenida la temperatura de operación del concentrador solar, aproximadamente 900° C, se determina la potencia a la que se obtiene dicha temperatura. Con los valores de potencia y temperatura del concentrador solar se realiza el análisis energético de los dos procesos de producción de hidrógeno y se estiman sus eficiencias.

### *Concentrador Solar.*

Existe una gran variedad de colectores concentradores, pero todos ellos pueden clasificarse en dos categorías básicas; los de enfoque y los fijos o semifijos. Los concentradores de enfoque constan fundamentalmente de tres partes: el concentrador ó sistema óptico, el receptor donde se encuentra el absorbedor, material a calentar, y un mecanismo de seguimiento para el sol. Los de enfoque necesitan forzosamente un mecanismo para seguir el sol y con ello se pueden lograr altas temperaturas en el absorbedor. Los fijos o semifijos no necesitan del mecanismo para seguir el sol, pero sólo se obtienen temperaturas moderadas con ellos. Debido a que los procesos de producción de hidrógeno que analizaremos requieren temperaturas aproximadas a los 850° C, los concentradores solares que se deben emplear son del tipo que enfocan y siguen la trayectoria del sol.

Para determinar la temperatura que puede alcanzar un concentrador solar debemos determinar la razón de concentración,  $C$ . Esta se define como la relación entre el área efectiva de apertura  $A_a$ , área de captación solar del sistema óptico, y el área del receptor  $A_r$ . Así,

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

Esta razón de concentración tiene un límite máximo que depende de si la concentración se hace en un concentrador circular como un paraboloide o en uno lineal como un concentrador cilíndrico parabólico. Así, mediante un análisis basado en la segunda ley de la termodinámica aplicada al intercambio de radiación entre el sol y el receptor<sup>1</sup>, obtenemos que la razón de concentración máxima para un concentrador circular o de superficie de revolución  $C_{max,c}$ , viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{\max,c} = \left( \frac{A_a}{A_r} \right) = \frac{1}{\text{sen}^2 \theta_s} \quad (2)$$

mientras que para un concentrado lineal o cilíndrico,  $C_{\max,l}$ , es igual a:

$$C_{\max,l} = \left( \frac{A_a}{A_r} \right) = \frac{1}{\text{sen} \theta_s} \quad (3)$$

donde  $\theta_s$  es la mitad del ángulo subtendido por el sol y es igual a  $0.27^\circ$ . Por lo tanto, para un concentrador circular, la razón máxima de concentración posible es de 45,000; mientras que para un concentrador lineal el máximo es sólo de 212.

Entre más alta es la temperatura a la cuál la energía necesita ser concentrada, más alta debe ser la razón de concentración y también más precisos deben ser los componentes ópticos del concentrador, del receptor y del mecanismo de seguimiento del sol.

Por otra parte, el balance energético para un receptor perfectamente aislado, que no se refrigerase por ningún otro medio que no fuese la emisión de radiación correspondiente a su propia temperatura – sin pérdidas por conducción o convección-, sería:

$$\varepsilon_{ef} \cdot \sigma \cdot T_{\max}^4 = \alpha_{ef} \cdot C_{\max} \cdot G \quad (4)$$

donde  $\alpha_{ef}$  y  $\varepsilon_{ef}$  son la absorptancia y la emitancia efectivas del receptor, respectivamente;  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann. ( $\sigma = 5,6705 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ );  $G$  es la irradiación solar total que incide sobre el concentrador, multiplicada por la razón de concentración  $C$ . Por lo tanto, la máxima temperatura que puede alcanzar el concentrador solar, llamada temperatura estacionaria o temperatura adiabática media, es:

$$T_{m\acute{a}x} = \left( \frac{\alpha_{ef} \cdot C_{max} \cdot G}{\varepsilon_{ef} \cdot \sigma} \right)^{0.25} \quad (5)$$

La ecuación (4) puede representarse gráficamente, de forma que se puede obtener la temperatura máxima de un colector en equilibrio ( $\alpha_{ef} = \varepsilon_{ef}$ ) en función de la razón de concentración para un valor de irradiación fijo. La Figura 1 muestra la gráfica temperatura vs razón de concentración para un valor de irradiación  $G = 1350 \text{ W/m}^2$ .

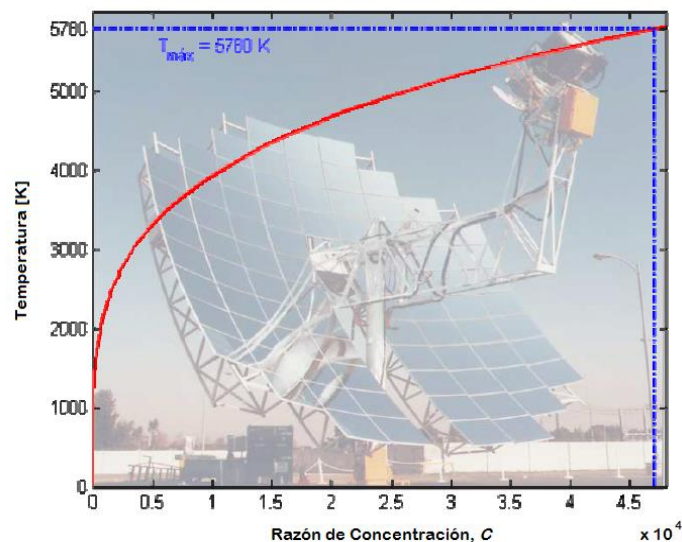


Figura 1. Gráfica de la Temperatura vs Razón de Concentración<sup>2</sup>

Debido a que los procesos de producción de hidrógeno que analizamos requieren temperaturas de  $850^\circ \text{C}$ , temperatura del absorbedor, consideraremos una temperatura de  $1178 \text{ K}$  y una irradiancia promedio de  $900 \text{ W/m}^2$ . Por lo que el concentrador solar parabólico debe tener una razón de concentración máxima de:

$$C_{\max} = \frac{\varepsilon_{ef} \cdot \sigma \cdot T_{\max}^4}{\alpha_{ef} \cdot G} = \frac{5,6705 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} * (1178 \text{ K})^4}{900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = 122$$

### *Electrolisis de Alta Temperatura.*

La electrólisis del agua es una tecnología conocida, en la que se lleva investigando muchos años. De forma teórica se puede afirmar que la electrólisis del agua se produce cuando se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito:



(6)



(7)



(8)

El proceso de electrólisis puede ocurrir tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, en cuyo caso, en lugar de agua, lo que se tiene es vapor. El proceso a alta temperatura además de emplear energía eléctrica para separar la molécula del agua, requiere energía térmica para llevarla hasta vapor sobrecalentado lo que mejora considerablemente su eficiencia. La electrólisis de alta temperatura requiere una entrada de energía eléctrica menor, lo cual se explica de forma gráfica en la figura 2, que muestra la dependencia del proceso de electrólisis con la temperatura.

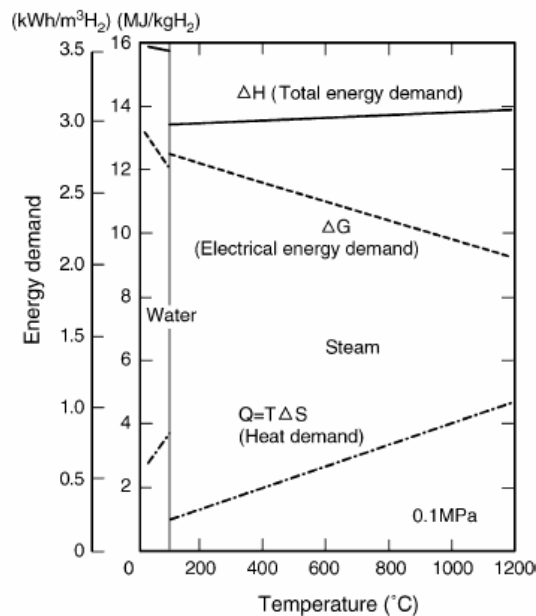


Figura 2. Demanda de energía para la electrólisis del agua y del vapor<sup>3</sup>.

La energía total que se requiere ( $\Delta H$ ) para la disociación, bien sea de agua o de vapor, es la suma de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) y de una cierta cantidad de energía calorífica ( $T\Delta S$ ). La demanda de energía eléctrica,  $\Delta G$ , disminuye conforme aumenta la temperatura. Es por ello que la electrólisis del vapor puede producir hidrógeno con una potencia eléctrica menor que la que se requiere para el caso del agua a temperaturas inferiores.

En la figura 3 se muestra de forma esquemática el acoplamiento entre una central termosolar de torre y una planta de electrólisis a alta temperatura del vapor, ambas conformadas por concentradores solares.



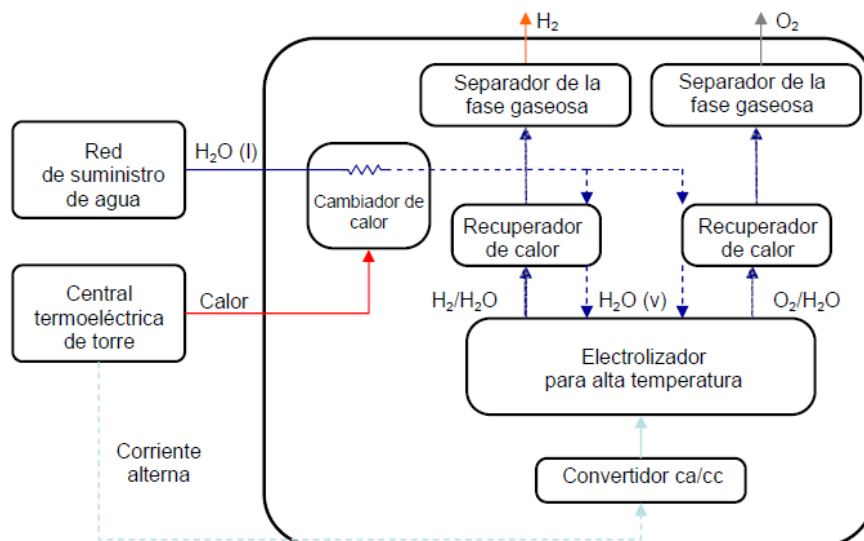


Figura 4. Planta de producción de hidrógeno solar por electrólisis a alta temperatura

### *Ciclo Termoquímico Yodo - Azufre.*

El ciclo termoquímico Yodo – Azufre fue desarrollado por General Atomics en los años 70 y para operar requiere básicamente de dos niveles térmicos, uno a  $850^\circ C$  para la descomposición del  $H_2SO_4$  y otro a aproximadamente  $360^\circ C$  para la descomposición del HI, tal como se muestra en el diagrama simplificado de la Figura 5.

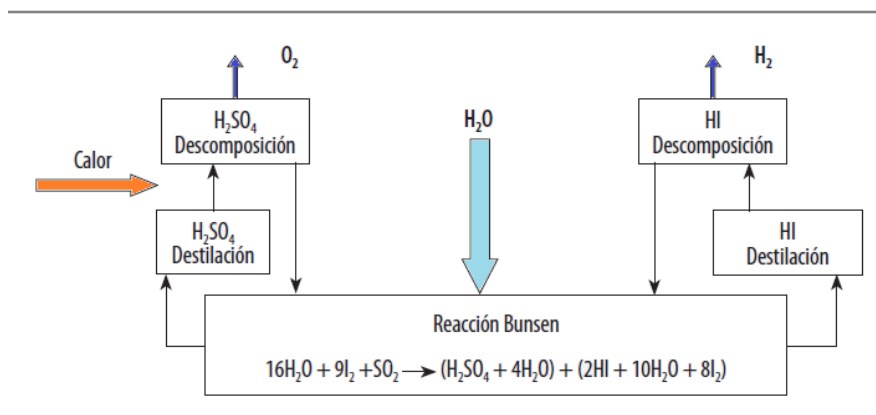
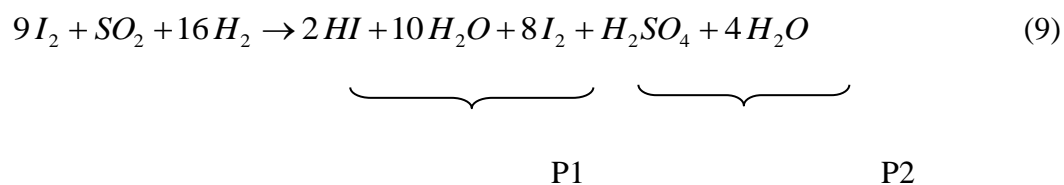


Figura 5. Proceso de producción de hidrógeno a partir del ciclo termoquímico Yodo – Azufre<sup>4</sup>.

El núcleo del proceso es la reacción Bunsen, Ecuación (2) y que transcurre a 120° C.



Tras esta reacción se realizan dos procesos de destilación, uno sobre los productos P1 y otro sobre los P2. La destilación sobre P1 produce HI y se verifica a 230° C; con el HI separado se procede a su descomposición según la reacción (10), que ocurre a aproximadamente 360° C y que es donde se obtiene el hidrógeno.



La destilación sobre los productos P2, a 360° C, produce  $H_2SO_4$ , que finalmente es descompuesto a 850° C según la reacción (11). Esta reacción es la que fija la demanda de calor de alta temperatura del proceso.



El proceso descrito supone un ciclo porque el  $SO_2$  y el  $H_2O$  producto de la reacción (11) y el  $I_2$  producto de la reacción (10) se dirigen hacia la reacción Bunsen, que sólo consume del exterior  $H_2O$ . Como productos del ciclo se produce  $H_2$  y  $O_2$ . Se observa que atendiendo sólo a las entradas y salidas de especies se verifica la reacción global propia del proceso de termólisis, ecuación (12).



### III. Análisis de Resultados

El análisis energético se realizó en base a datos teóricos de los procesos, tomados de la literatura, y considerando una eficiencia del concentrador parabólico de 60 % a una temperatura de operación de 900° C, considerando una irradiancia de 800 W/m<sup>2</sup> y una razón de concentración máxima  $C_{max} = 200^5$ .

La figura 6 muestra el balance energético de un sistema de concentración solar que se utiliza como concentrador de energía térmica solar y como fuente de energía primaria para la generación de electricidad. Las pérdidas en un sistema solar de alta temperatura son asociadas a: Factor Coseno (20%), Reflectividad Heliostatos (10%), Sombras (1%), Bloqueos (1%), Transmisividad atmosférica (5%), Desbordamiento de flujo (3%) y Rendimiento térmico del receptor (10%)<sup>6</sup>.

Los resultados del análisis se han resumido en los siguientes párrafos, una exposición más detallada de estos se presenta en otro trabajo.

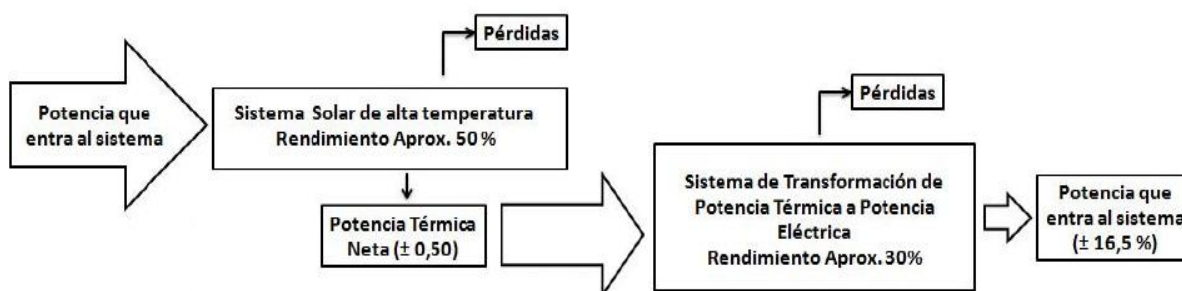


Figura 6. Balance Energético de un Sistema Solar de alta Temperatura.

La electrolisis de alta temperatura, a 850° C, requiere 23 % menos de energía eléctrica que la electrolisis simple, esto se ve reflejado en una mejor eficiencia global que resulta de aproximadamente 24 %, ocho por ciento mayor que la de la electrolisis simple. Esta mayor eficiencia se debe a un menor coste energético global, lo cual tiene una explicación sencilla; la energía que se suministra en forma de calor no está sometida al límite impuesto por el rendimiento del ciclo ideal de Carnot en la conversión de energía térmica a electricidad. Esta ventaja también va a ser aprovechada por los ciclos termoquímicos de producción de hidrógeno.

El ciclo termoquímico Yodo – Azufre tiene una eficiencia, calculada a partir del poder calorífico inferior PCI del hidrógeno, de aproximadamente el 60%. Y dado que el proceso termosolar tiene una eficiencia de aproximadamente el 65%, la energía global del ciclo alimentado con energía solar es de alrededor del 38%.

Este ciclo termoquímico aunque también opera a 850°C tiene la ventaja, sobre la electrólisis, de no requerir consumo eléctrico, con lo que resulta muy adecuado para la producción simultánea de hidrógeno y electricidad, redundando así en una mayor flexibilidad para adaptarse a las demandas del mercado.

#### IV. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten asumir que la producción de hidrógeno centralizada de procesos de alta temperatura basados en energía solar concentrada es una buena opción para producir combustibles sintéticos amigables con el ambiente. El uso de concentradores solares para la producción de hidrógeno son viables energética y técnicamente; las eficiencias globales de los procesos son de aproximadamente el 24% para la electrolisis de alta temperatura, y del

38% para el ciclo termoquímico yodo-azufre. A partir del análisis energético se pudo observar que los procesos termoquímicos para la obtención de hidrógeno son más eficientes que los de electrolisis, esto debido a que al utilizar la radiación solar concentrada como fuente de calor para el proceso a alta temperatura su eficiencia energética no está limitada por la conversión intermediaria de calor a electricidad.

En conclusión podemos decir que los procesos termoquímicos, y aún los de electrolisis de alta temperatura, constituyen una opción atractiva para la producción masiva de hidrógeno y combustibles sintéticos, ya que a pesar de las relativamente bajas eficiencias energéticas que tienen hay que considerar que la fuente primaria que utilizan es completamente renovable y accesible. La producción de hidrógeno a partir de procesos de alta temperatura con energía solar concentrada es más sustentable que la que requiere capturar y el almacenar CO<sub>2</sub> por involucrar combustibles fósiles. Cabe mencionar que el presente trabajo es parte de la justificación teórica de un proyecto experimental de mayor alcance.

## V. Referencias

<sup>1</sup> Duffie, John A. y Beckman, William A., “Solar Engineering of Thermal Process” , Wiley Interscience, 1980.

<sup>2</sup> Glatzmaier, G., Blake, D., Showalter, S., “Assessment of Methods for Hydrogen production using Concentrated Solar Energy ”. NREL/TP-570-23629. Enero, 1998.

<sup>3</sup> Hino, R., Haga, K., Aita, H., and Sekita, K., “R&D on hydrogen production by high-temperature electrolysis of steam”. Nuclear Engineering and Design (2004).

<sup>4</sup> Linares-Hurtado, J.I. y Moratilla-Soria, B.Y., “El Hidrógeno y la Energía”, Colección: Avances de Ingeniería - Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Reina, 33. 28004 Madrid, España, 2007.

<sup>5</sup> González-Veasco, J., “Energías Renovables”, Editorial Reverté, ISBN: 978-84-291-7912-5, Loreto 12-15 Barcelona, España, 2009.

<sup>6</sup> Quinteros-Grijalva, J., “Estudio teórico y experimental de colector solar parabólico para generación de energía eléctrica”. Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2003.