
Análisis Preliminar de un Sistema Generador de Hidrógeno Basado en Energía Nuclear en el Sitio de Laguna Verde

Alain Flores y Flores

Facultad de Ingeniería-UNAM

Circuito Interior – Ciudad Universitaria

alain_fyf@yahoo.com

Juan Luis François Lacouture

Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares.

Facultad de Ingeniería-UNAM

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec. Mor.

jlfl@fi-b.unam.mx

Resumen

La escasez de combustible fósiles en el futuro próximo, así como la creciente demanda de energéticos y el alto costo de la producción de combustibles alternos, nos obliga a aprovechar al máximo el combustible fósil con el cual contamos y buscar la forma de producir combustibles alternos a un bajo costo y mejor aún si estas fuentes de suministro son confiables y no contaminantes.

Se propone una solución a la escasez de combustible; utilizar la energía térmica liberada de algún reactor nuclear adecuado para poder obtener un combustible más limpio y relativamente barato como lo es el hidrógeno.

En primer lugar se buscaron los métodos para producir hidrógeno utilizando energía térmica, después se analizó la temperatura liberada por los reactores nucleares existentes así como los diseños avanzados, de acuerdo a esta temperatura liberada se estableció que los métodos más factibles para producir hidrógeno eran el de reformado con vapor de agua del gas natural (metano) y el del ciclo termoquímico S-I, y los reactores nucleares que suministran la energía térmica para esta producción son los de gas de alta temperatura.

Una vez establecidos los procesos y los reactores adecuados, se analizó el sitio de L.V., con relación al espacio libre para poder colocar el reactor y la planta productora de hidrógeno, así como la dirección en la que soplan los vientos dominantes y los poblados cercanos al sitio, se realizó un análisis de alguna explosión de tanques que pudieran almacenar hidrógeno y el daño que pudieran causar dependiendo de la distancia a la que se encontrarán del incendio.

Por último se realizó una evaluación de costos de capital y de operación para los dos métodos de producción de hidrógeno.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la tendencia de crecimiento poblacional en el mundo y con esto el crecimiento de la demanda de combustible es imprescindible el considerar una fuente de combustible amplia, económica y limpia. Es por eso que este trabajo va orientado en hacer un análisis para aprovechar al máximo los recursos del país para producir hidrógeno ya que este podría ser la energía transportable del futuro, por sus virtudes de sustentabilidad; por la limpieza de su combustión (no produce el principal "gas de efecto invernadero", el CO₂, generando solamente agua como desecho), por su enorme relación energía a peso (39.4 Kwh por Kg de H₂); y por la simplicidad de su conversión a energía eléctrica según la demanda instantánea (mediante celdas a combustible o "fuel cells"). En este trabajo se presenta primeramente una descripción de los principales métodos para producir hidrógeno, posteriormente se identifican los principales reactores nucleares con posibilidades de producir hidrógeno, enseguida se presenta un análisis preliminar del sitio de Laguna Verde considerando algunos aspectos de seguridad y finalmente se muestran algunos costos de generación de hidrógeno por medios nucleares.

2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

En esta sección se describen a grandes rasgos algunos de los procesos para generar hidrógeno, con base a la descripción se elegirá a los más adecuados para poder ser acoplados a un reactor nuclear y producir hidrógeno.

2.1. Descomposición Electroquímica o Electrólisis

La descomposición electroquímica del agua o electrólisis se usa extensivamente para la producción industrial de grandes volúmenes de hidrógeno; consiste en hacer reaccionar sus iones en electrodos polarizados, utilizando corriente continua, obteniéndose como resultado en la zona catódica hidrógeno molecular en estado gaseoso y en la anódica oxígeno en iguales condiciones. El principal problema de la obtención de hidrógeno a partir de la descomposición electroquímica del agua es el alto costo energético, por lo que se precisa contar con fuentes primarias accesibles, de bajo costo y preferiblemente no fósil.

La forma de producir la energía eléctrica para poder realizar la electrólisis es la que origina una modificación en el nombre de la técnica de producción así se tiene la fotoelectrólisis en la que se utilizan fotoceldas que absorben la radiación solar generando energía eléctrica y con esta se realiza la electrólisis, también se pueden utilizar aerogeneradores, energía hidroeléctrica, geotérmica, combustión de biomasa, energía nuclear y cualquier otro proceso capaz de producir energía eléctrica para después realizar la electrólisis.

La Electrólisis del agua empleando Fuentes Alternas de Energía, como la solar y la eólica constituye una excelente alternativa para su producción en el futuro. Ya que si

comparamos el costo del hidrógeno producido por electricidad convencional, de \$30 USD/MBTU contra el producido por las actuales celdas solares comerciales que es de \$ 72 USD/MBTU, encontramos que existe una gran diferencia entre ellos, en la que no se refleja el daño ecológico que las fuentes convencionales provocan. Por ello dicho costo debe ser abatido empleando celdas solares que sean más eficientes y estables que con las actuales.

2.2. Descomposición Directa.

A temperatura de 2 500°C (4 500°F) el agua se descompone en H₂ y O₂. Para lograr tales temperaturas pueden utilizarse concentradores solares como fuente suministradora de calor. El problema aquí consiste en evitar la recombinación del hidrógeno y el oxígeno.

2.3. Ciclos Termoquímicos.

Una termólisis directa del agua, requiere temperaturas mayores a los 2500°C, lo cual no es practico bajo condiciones normales, el proceso se divide en diferentes reacciones parciales, cada una necesita un nivel bajo de temperatura. La energía térmica requerida es de 800 a 900 °C.

Un ciclo termoquímico es un ciclo limitado de Carnot significando que esas temperaturas altas podrían mejorar la conversión eficiente.

El potencial más considerable lo tiene el proceso azufre - yodo (SI) el cual fue investigado primero en General Atomics, San Diego, E.U., por muchos años demostrando su viabilidad. El proceso SI consiste en los siguientes tres pasos:



Comprendiendo el consumo de agua de la reacción exotérmica de Bunsen, la descomposición endotérmica de yoduro de hidrógeno en una célula de electro diálisis produce hidrógeno, y la descomposición térmica del ácido sulfúrico produce oxígeno. En la descomposición de H₂SO₄ y HI se encontró que este procedimiento causa problemas de corrosión severos. Según los estudios analíticos, puede esperarse una eficacia de 40 - 50% bajo condiciones de operación óptimas. General Atomics da una figura de 47% . El proceso de SI (Ver figura 1) fue diseñado para ser acoplado con un reactor de alta-temperatura o un reactor de fusión originalmente y más recientemente también con una planta termal solar. El ciclo se ha verificado a escala en el laboratorio en Japón y después se podrá conectar a un reactor de prueba de alta temperatura (HTTR) para demostración.

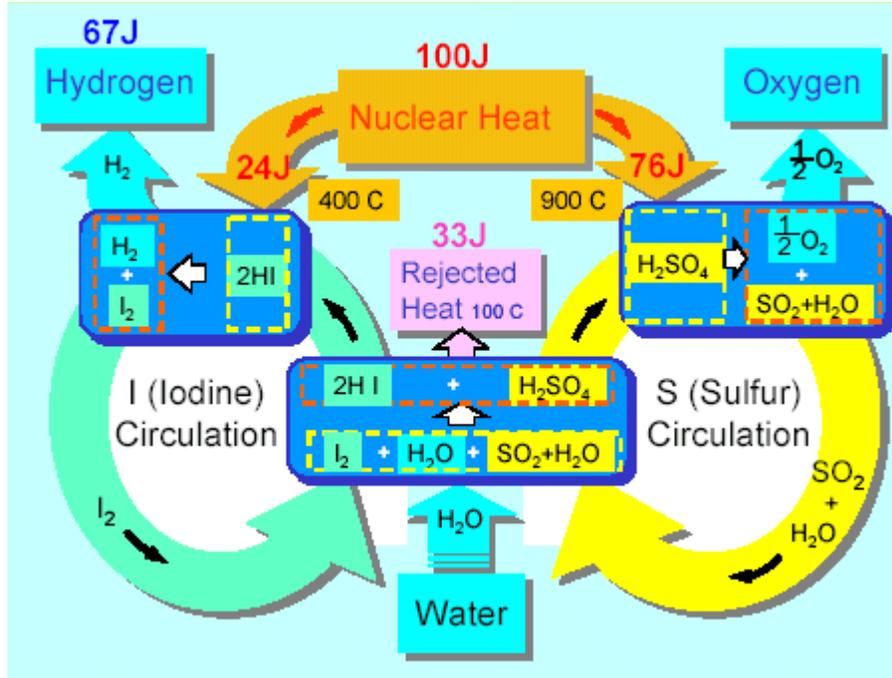


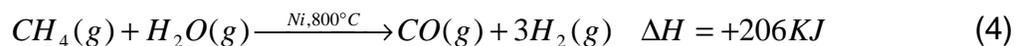
Figura 1. Proceso SI en el cual se obtienen hidrógeno y oxígeno.[1]

2.4. Reformado.

Hay otras rutas sintéticas más adecuadas para la obtención del hidrógeno a escala industrial. Uno de ellas es el proceso catalítico de reformado del vapor de hidrocarburos, este proceso entra en el grupo de producción por ciclos termoquímicos. Es el método utilizado para producir la mayor parte del hidrógeno. El reformado con vapor de agua del gas natural representa alrededor de las tres cuartas partes de la producción total de hidrógeno. El proceso se basa en la reacción del vapor de agua y el metano a alta temperatura sobre un catalizador. Otros gases que contienen hidrocarburos también son adecuados para la producción de hidrógeno; tal es el caso de diferentes gases (biogases) procedentes de la fermentación anaerobia de biomasa y residuos.

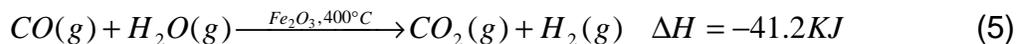
Este es un proceso que transcurre en varias etapas:

- (1) Reacción endotérmica catalizada entre el metano (gas natural) con vapor de agua a alta temperatura produciendo una mezcla de CO e H₂ llamada syngas:



La mezcla gaseosa así obtenida es difícil de separar ya sea física o químicamente (es necesario enfriar hasta -205 °C antes de que el CO pueda condensar).

(2) Para aumentar el rendimiento y facilitar también la separación posterior, el CO se oxida a CO₂. Para ello, la mezcla es enfriada y se le inyecta vapor de agua de nuevo, esta vez sobre un catalizador de Fe₂O₃.



La reacción global es por tanto:



El problema de separar el dióxido de carbono de la molécula de hidrógeno es más sencillo. Hay varias formas de abordar la separación:

(1) Medios físicos. Una opción es enfriar la mezcla por debajo de la temperatura de condensación del CO₂ (-78°C) muy diferente a la del H₂ (-253°C).

(2) Medios químicos. El CO₂ es un óxido ácido que reacciona con una disolución de carbonato potásico para dar el carbonato ácido de potasio. Calentando éste se puede regenerar el carbonato:

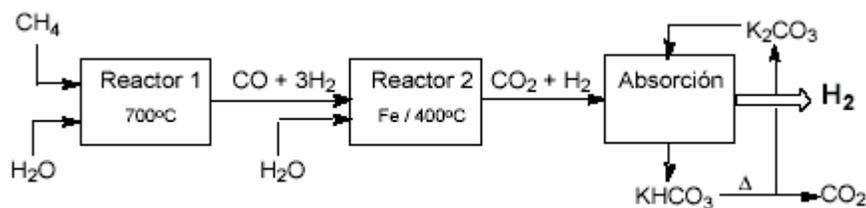
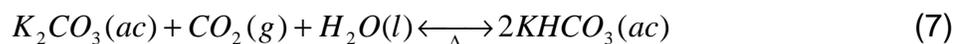
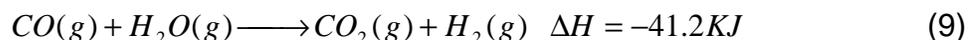
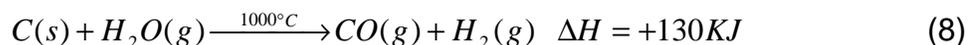


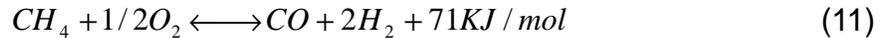
Figura 2. Esquema gráfico del proceso de reformado.

Una alternativa al metano es la utilización de cualquier otro hidrocarburo o incluso carbón (más abundante):

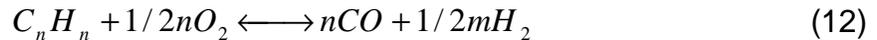


2.5. Oxidación Parcial.

Este proceso es capaz de convertir metano y otros hidrocarburos más pesados que la nafta, catalizada o no catalizada, donde el proceso de reformado no es aplicable.



o para cualquier hidrocarburo en general:

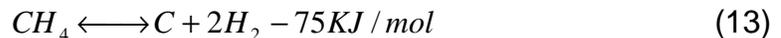


El proceso catalítico trabaja alrededor de los 600°C usando una alimentación de metano o nafta.

El proceso no-catalítico trabaja a una temperatura entre 1100 y 1500°C y una presión en el rango de 2 a 6 Mpa usando hidrocarburos del metano al aceite pesado y el carbón. El oxígeno puro se toma de un paso de descomposición aéreo debido a la dificultad para limpiar el hidrógeno del nitrógeno.

2.6. Ruptura Térmica.

Una alternativa para el reformado del metano es un simple paso de descomposición termocatalítico o “ruptura térmica”. El metano y otros hidrocarburos se descomponen a temperaturas entre 700 y 980°C y, si no está presente el aire, forma hidrógeno y carbón:



Este proceso ha sido practicado desde hace muchos años en la producción de carbón negro para la vulcanización del neumático de caucho y para la industria de la imprenta. A pesar de la ventaja que ningún dióxido del carbono se forma, es considerada a menudo una reacción no deseada debido a la formación de carbono sólido.

3. SELECCIÓN DEL REACTOR NUCLEAR

El proceso de ciclo termoquímico como el del ciclo S-I y el de reformado de vapor de metano se pueden acoplar a un reactor nuclear de alta temperatura cercana a los 900°C o superiores, en el de reformado de vapor de metano se utilizará el gas natural, ya que este lo contiene en abundancia. Enseguida se muestra una tabla comparativa que relaciona el tipo de reactor con las temperaturas alcanzadas.

Tabla I. Temperaturas alcanzadas de algunos reactores.

TIPO DE REACTOR.	TEMPERATURA ALCANZADA [°C]
Reactor de agua presurizada PWR	325
Reactor de agua en ebullición BWR	285
Reactor de agua pesada presurizada PHWR ó CANDU	290
Reactor Avanzado enfriado por Gas AGR	650
Reactor de Agua Ligera moderado con Grafito RBMK	290

Debido a que la temperatura de estos reactores no es suficiente para romper el enlace covalente de la cadena C_nH_m de los hidrocarburos se investigó sobre la existencia de nuevos diseños de reactores.

3.1. Diseños Avanzados.

Una forma de atender a las necesidades energéticas futuras es aumentar gradualmente el despliegue tecnológico de la energía nuclear, introduciendo diseños avanzados en los sistemas de suministro de energía del mundo entero. En este contexto, cabe señalar que por diseño avanzado se entiende el diseño de una central de interés o mérito actual, pero que todavía no ha sido construida ni explotada; dichos diseños avanzados pueden, a su vez, dividirse en diseños evolutivos y de desarrollo. Un diseño evolutivo es un descendiente del diseño de una central existente que presenta las mejoras y modificaciones del diseño efectuadas con base en el aprovechamiento de la experiencia e incluye nuevos adelantos tecnológicos; el diseño evolutivo de una central requiere a lo sumo ensayos técnicos y confirmatorios previos al despliegue comercial. Por otra parte, el diseño de desarrollo incluirá diferencias más significativas con respecto a los diseños de centrales existentes, y puede requerir igualmente la construcción de una planta de demostración y/o planta prototipo antes del despliegue comercial en gran escala. Un diseño de desarrollo que incluye cambios radicales en el diseño puede denominarse diseño innovador, y representa, por lo tanto, una subcategoría especial de diseños de desarrollo.

Actualmente se desarrollan tres tipos básicos diseños avanzados: reactores refrigerados por agua, reactores rápidos y reactores refrigerados por gas, que se examinan a continuación.

Dentro de los diseños avanzados, los que más posibilidades tienen de poder producir hidrógeno en corto plazo son los de gas de alta temperatura los cuales se describirán a continuación.

3.2. Reactores refrigerados por gas. [2]

Los reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR) se vienen desarrollando desde hace mucho tiempo, y aunque ya se han construido varias centrales prototipo o de demostración, no se ha logrado tener pleno éxito en su explotación. El HTGR es básicamente un reactor moderado por grafito con un gas (helio) como refrigerante. El gas helio (He) inerte y el diseño especial del combustible hacen posible su funcionamiento a temperaturas considerablemente superiores a las de los reactores refrigerados por agua, lo que permite, a su vez, producir a una temperatura (861.11 °C) y presión (7 Mpa) mucho más alta el vapor destinado a los generadores convencionales accionados por turbina de vapor, lográndose así una mejora considerable de la eficiencia térmica de la central, o producir calor industrial en régimen de alta temperatura para aplicaciones especiales. En la Figura 3 se presenta un diagrama de un HTGR acoplado a un turbogenerador.

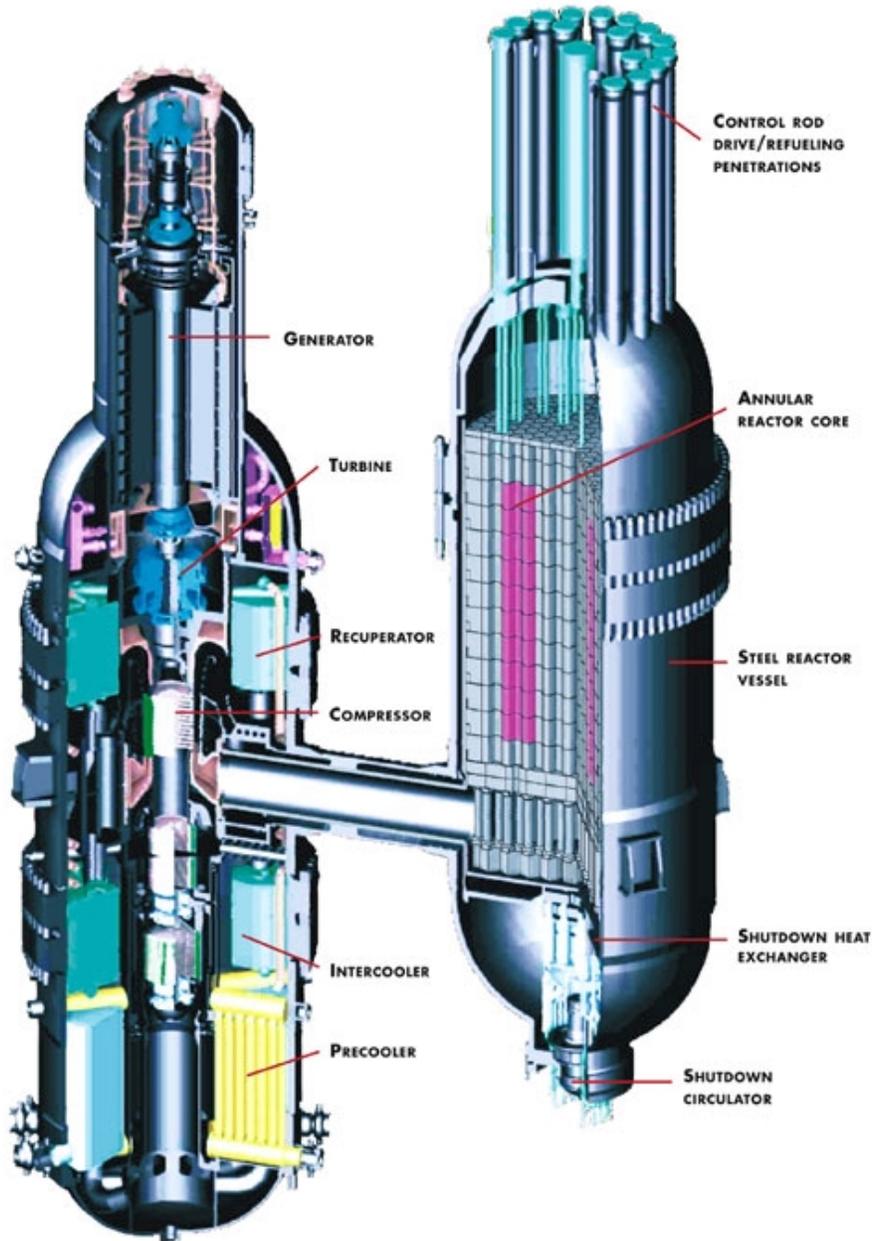


Figura 3. Corte transversal de un HTGR acoplado a un turbogenerador.

En los últimos años, los trabajos de desarrollo se han centrado en unidades modulares pequeñas, visto que los experimentos y análisis han demostrado que dichas unidades pueden lograr un grado excepcional de autoprotección.

A diferencia del combustible de los reactores de agua ligera (LWR), el combustible HTGR no está contenido en agujas de combustible revestidas de metal, sino en partículas de combustible. Estas partículas miden entre 0.2 y 0.6 mm y consisten en una mezcla de óxido o carburo de uranio o torio o uranio/torio. A fin de retener los

productos de fisión, cada partícula está revestida con varias capas de material cerámico resistente a altas temperaturas (ver Figura 4). Las partículas se dispersan de manera homogénea en una matriz de grafito que se comprime ulteriormente en elementos esféricos, bolas, o en forma de barras, que se introducen en los canales de combustible de un bloque de grafito de agujeros múltiples. Las partículas permanecen intactas y retienen prácticamente todos los productos de fisión hasta una temperatura de unos 1600 °C. Estas partículas no se funden a una temperatura umbral dada y sólo fallan gradualmente en condiciones de accidente; por lo tanto, no se puede producir una liberación súbita de los productos de fisión.



Figura 4. Combustible del HTGR.

Los futuros trabajos de desarrollo de los HTGR se centrarán en los estudios para mejorar el comportamiento y prolongar la vida útil de las centrales. Con respecto a lo primero, actualmente se realizan considerables esfuerzos en relación con el denominado ciclo de turbina de gas, en el que el gas en régimen de alta temperatura pasa directamente a una turbina de gas, lo que permite obtener una eficiencia térmica muy elevada y prever costos energéticos reducidos, así como en lo que atañe a la producción de calor industrial en régimen de muy alta temperatura.

3.3 Reactor Modular de Cama de Esferas (Pebble Bed Modular Reactor-PBMR) [3]

En la década de 1950, el Dr. Rudolf Schulten ("padre" del reactor *Pebble Bed*) tuvo la idea de compactar al carburo de silicio revestido de gránulos de uranio como una bola

dura de billar (ver Figura 5), las esferas de grafito serian usadas como combustible para un nuevo tipo de reactor a alta temperatura enfriado por helio.



Figura 5. Comparación del PBMR con una pelota de tenis.

La idea fue aceptada y se construyó en Alemania un reactor *pebble bed* de demostración (el AVR) de 15 MW. Operó exitosamente por 21 años.

Entonces, en la ola intensiva antinuclear, por lo sucedido en Chernobil, sentimiento que barrió Europa particularmente Alemania, la idea fue olvidada. Ahora la idea ha resurgido en África del Sur.

El sistema principal de potencia del PBMR consiste en dos partes principales. Estas son el reactor, donde la energía térmica es generada por una reacción nuclear, y la unidad de conversión de potencia, donde la energía térmica se convierte en trabajo mecánico y después a energía eléctrica por medio de un ciclo termodinámico y un generador. El funcionamiento de estas dos unidades principales se describe más adelante.

3.3.1. Funcionamiento del Reactor

El PBMR es un reactor de alta temperatura (HTR), refrigerado por helio y utiliza grafito como moderador. El PBMR consiste en un vasija vertical de acero a presión, de 6 m de diámetro y 20 m de alto. La vasija de presión está revestido con una capa de ladrillos de grafito. Esta capa de grafito sirve como un reflector exterior para los neutrones generados por la reacción nuclear y un medio para transferir el calor pasivo. El ladrillo de grafito se taladra con agujeros verticales para alojar los elementos de control. Este reflector de grafito contiene al centro. El centro es la región del reactor en que la reacción nuclear tiene lugar. El centro del PBMR es de 3.7 m de diámetro y 9.0 m de altura. El centro consiste en dos zonas, la zona interna que contiene aproximadamente 150,000 esferas de grafito, y la zona exterior (el annulus) contiene aproximadamente 380,000 esferas de combustible. La reacción nuclear tiene lugar en el annulus de combustible. El helio fluye a través del *pebble bed* y remueve el calor generado por la

reacción nuclear del centro. Este helio es el mismo gas que se usa como el fluido de trabajo en la unidad de conversión de potencia, de aquí en adelante se tiene un ciclo directo de gas.

3.3.2. Operación de la Unidad de Conversión de Potencia.

La unidad de conversión de potencia del PBMR esta basada en el ciclo termodinámico Brayton (turbina de gas) y se muestra en el diagrama siguiente (Figura 6), en donde se describe su operación.

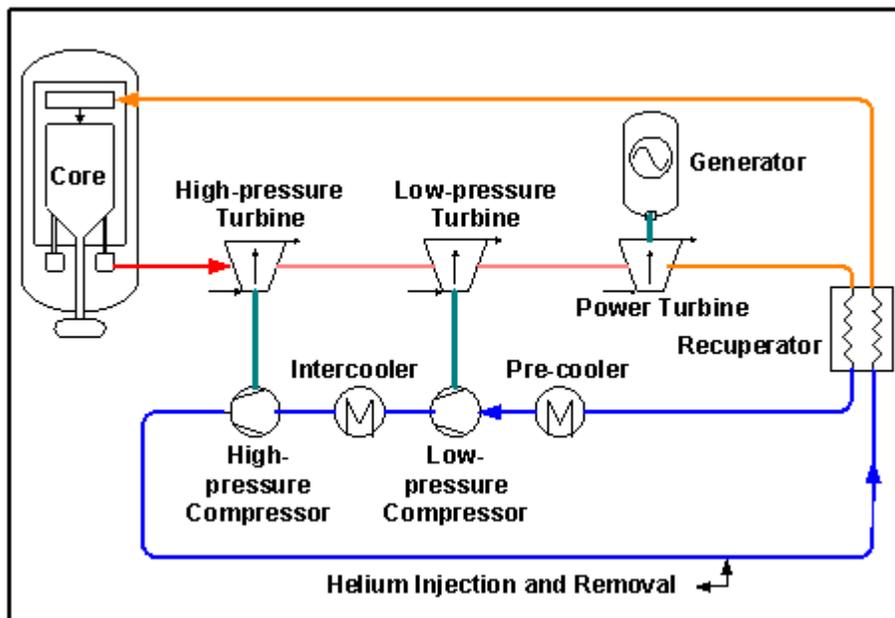


Figura 6. Esquema de generación utilizando el PBMR (Ciclo Brayton).

3.3.3. Como trabaja el PBMR.

El helio entra en el reactor a una temperatura de aproximadamente 500 °C y a una presión de aproximadamente 8.4 MPa. Se mueve entre las esferas de combustible calientes que se extienden hacia abajo, recoge el calor de las esferas de combustible que han elevado su temperatura por la reacción nuclear, el helio sale del reactor a una temperatura de aproximadamente 900 °C, se expande en la turbina de alta presión; esta turbina forma parte del turbo de alta presión. El tubo de alta presión maneja el compresor de alta presión, después el helio fluye a través de la turbina de baja presión que es parte de la unidad turbo de baja presión. La turbina de baja presión maneja el compresor de baja presión.

El helio se expande en la turbina de potencia; esta turbina mueve al generador.

A estas alturas, el helio todavía está a una temperatura alta fluye entonces a través del lado primario del recuperador dónde transfiere el calor al gas de baja temperatura

regresando al reactor (también refiérase al último paso), se refrigera el helio que atravesó el lado primario del recuperador por medio de un pre-refrigerador. Esto aumenta la densidad del helio y mejora la eficacia del compresor, el helio se encuentra comprimido por el compresor de baja presión. El helio se refrigera en el inter-refrigerador, este proceso aumenta la densidad y mejora la eficacia del compresor, el compresor de alta presión comprime el helio a 8.5 MPa. El vapor de helio a alta presión fluye a través del recuperador dónde es pre-calentado para después ser devuelto al reactor.

4. ANÁLISIS DEL SITIO DE LAGUNA VERDE.

En esta sección se realiza un análisis del sitio de la Central LV, determinando el área disponible y la ubicación de la población que rodea a la central.

Enseguida se muestra un mapa del sitio de LV, para tener una mejor apreciación del sitio.

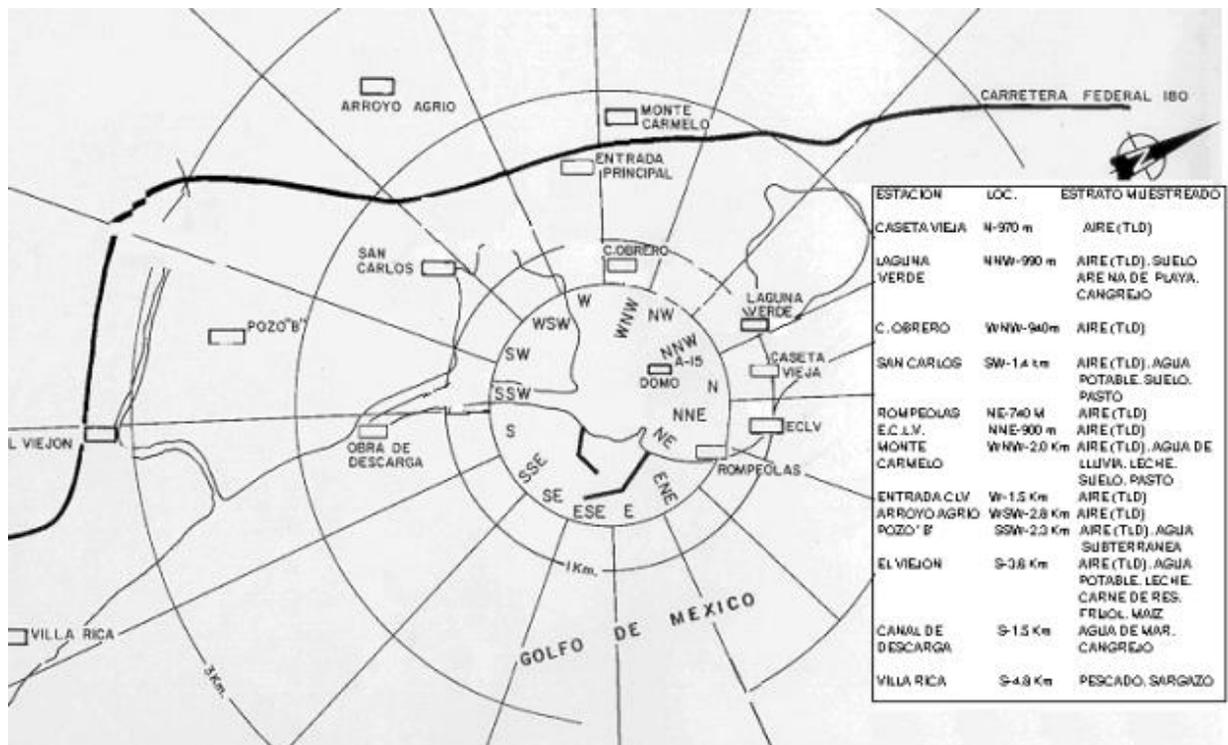


Figura 7. Mapa de la CNLV (3 Km).

En la figura 7 se muestran los poblados más cercanos a LV que sería Monte Carmelo, San Carlos en el cual se encuentran 2 habitantes.

En la propiedad de CFE dentro de LV se tiene un área restringida de 600m a la redonda del reactor nuclear, la planta de hidrógeno y el lugar donde se puede

almacenar podrían colocarse fuera de esta zona de restricción, pero debemos de tomar en cuenta las construcciones que ya están edificadas en LV como el comedor, el centro de información, el centro de capacitación, etc. Por lo que no podría colocarse ahí ni la planta de hidrógeno ni la zona de almacenamiento, tenemos que pensar en colocarlo en otra parte, un sitio interesante para analizar el sitio de producción y almacenaje sería a un lado de la laguna del otro lado de los edificios, pero el inconveniente es que los vientos dominantes soplan del lugar donde se colocaría la planta productora y el sitio de almacenamiento hacia el reactor y los edificios, por lo que sí ocurriera una explosión las llamas y la radiación de energía térmica (ver tabla III) se orientará hacia los edificios provocando daños mas severos que si se colocara en otro lugar dentro de LV.

La tabla II muestra las variables y sus unidades para realizar el análisis.

Tabla II. Variables y sus unidades para el análisis de radiación de energía. [4]

Fracción de radiación	n.
Calor de combustión	Hc [J/Kg]
Masa	m [Kg]
Radio de la bola de fuego	r [m]
Duración de la bola de fuego	t [s]
Energía radiada	Qr [J]
Potencia radiada	Qr/t [KW]
Flujo de radiación de calor	qR [KW/m ²]
Distancia del centro de la bola de fuego	r [m]
Area hemiesfera	A [m ²]

Si se pudieran almacenar 10 mil toneladas de hidrógeno y esta masa almacenada se incendiará los resultados serian los mostrados en la tabla III, se compara la misma cantidad de propano y la misma situación de incendio, para comparar la energía radiada en ambos casos.

Tabla III. Resultados del análisis de radiación de energía, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias.

Para m=1E+7			
r	A	qR Propano	qR Hidrogeno
500	3141632	228.7253189	426.712287
1000	12566528	57.18132972	106.6780718
1500	28274688	25.41392432	47.41247633
2000	50266112	14.29533243	26.66951794
2500	78540800	9.149012755	17.06849148
3000	113098752	6.35348108	11.85311908
3500	153939968	4.66786365	8.708414021
4000	201064448	3.573833107	6.667379485
4500	254472192	2.823769369	5.268052926
5000	314163200	2.287253189	4.26712287

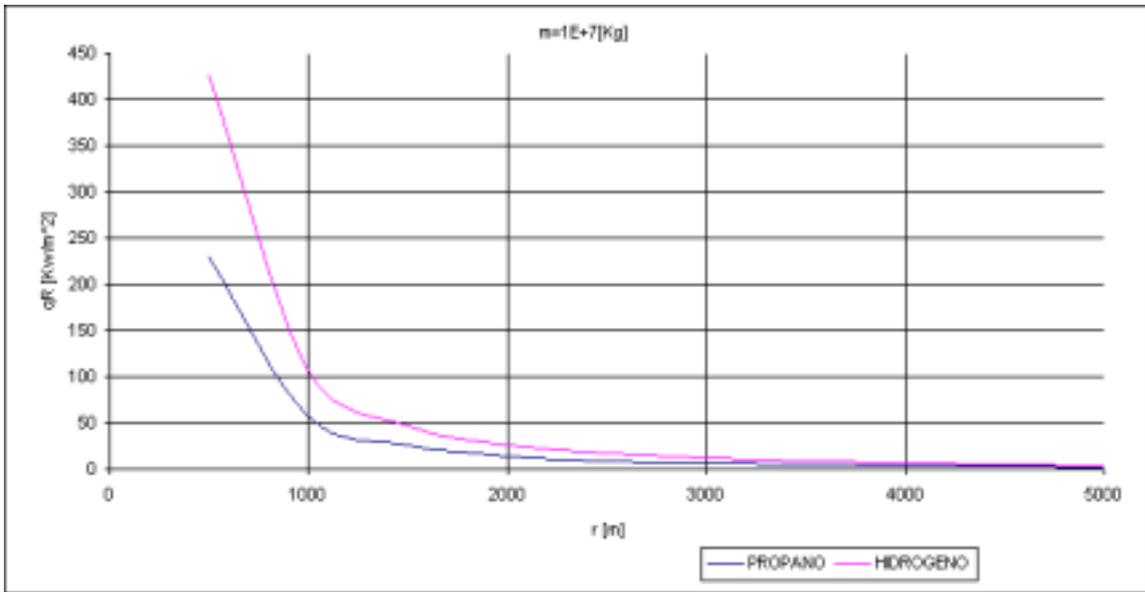


Figura 9. Gráfica comparativa flujo de calor propano e hidrógeno $m=10$ mil Tons.

Este mismo análisis se realizó para diferentes cantidades de hidrógeno y de propano para comparar la magnitud de la energía radiada, con base a la masa almacenada. Se analizó para una masa de 10 mil toneladas, 5 mil toneladas y 2 mil 500 toneladas, los resultados se graficaron en la figura 9, 10 y 11 respectivamente.

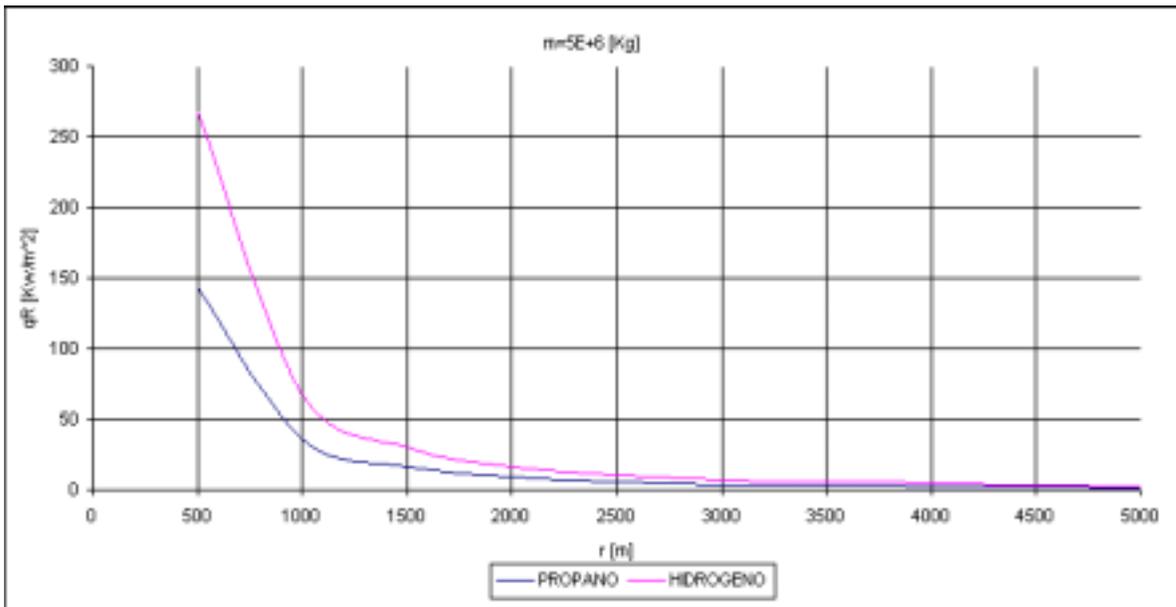


Figura 10. Gráfica comparativa flujo de calor propano e hidrógeno $m=5$ mil Tons.

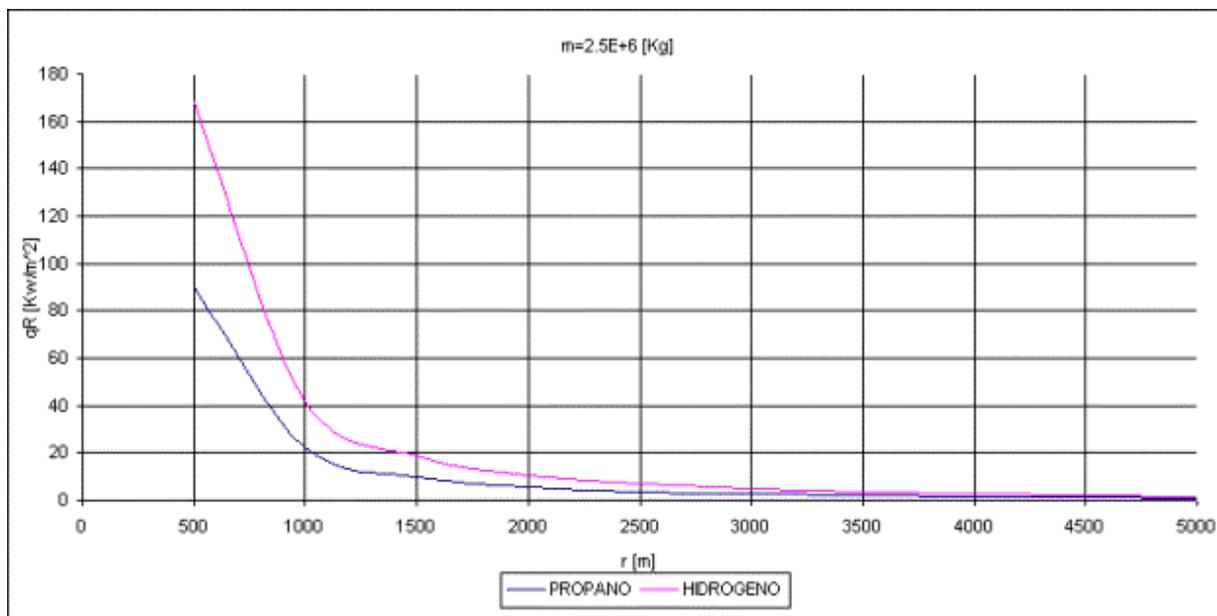


Figura 11. Gráfica comparativa flujo de calor propano e hidrógeno m=2.5mil Tons.

Los efectos causados dependiendo del nivel de radiación de energía térmica se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. Efectos del flujo de calor en la salud humana y la central. [4]

Flujo de Calor (Kw/m ²)	Efecto.
1.75	Se alcanza el umbral del dolor después de 1 minuto.
2	Daño al aislante de PVC de los cables.
5	Se alcanza el umbral del dolor después de 15 segundos.
6.4	Se alcanza el umbral del dolor después de 8 segundos, quemaduras de segundo grado después de 20 segundos.
12.5	La madera se enciende en una exposición prolongada en presencia de llama
15	Límite para materiales de construcción clase 2 .
16	Severas quemaduras después de 5 segundos.
25	La madera se enciende en una exposición prolongada.
30	Limite para materiales de construcción clase 1.

Dependiendo de la masa de hidrógeno que se desee almacenar y la distancia de la zona de almacenamiento, serian los efectos que se causarían en los seres humanos y en los edificios, el poblado más cercano a LV se encuentra a mas de 1Km de distancia, por lo tanto los efectos causados para los habitantes de dicho poblado serian mínimos; pero ahora se encuentra el problema de los vientos que agravaría el problema si ocurriera un incendio en la planta productora o la zona de almacenamiento.

Entonces no se puede colocar del lado de los edificios por que provocaría un daño a estos y a las personas que se encuentren ahí y si se coloca del otro lado de la laguna se tiene el problema de los vientos dominantes que atraerían la mayor parte de la energía térmica al edificio del reactor.

5. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO. [5]

La tabla V muestra unos costos preliminares de un reactor HTGR (MHR) produciendo hidrógeno por los métodos de reformado y el S-I.

Tabla V. Comparación de costos para el proceso SI y de reformado.

COSTO DE CAPITAL	SI	REFORMADO
GT-MHR \$/KWt	468	468
MHR \$/KWt	371	371
CICLO INTERMEDIO \$/KWt	43	43
PLANTA DE H \$/KWt	255	53.43
TOTAL DE LA PLANTA \$/KWt	669	467.43
COSTO DE OPERACIÓN		
GT-MHR \$/MWth	5	5
MHR \$/MWth	4.5	4.5
CICLO INTERMEDIO \$/MWth	0.1	0.1
PLANTA DE H \$/MWth	2.2	2.2
TOTAL DE LA PLANTA \$/MWth	6.8	6.8
Costo de capital \$/MWth	11.5	8.035
Costo de operación.\$/MWth	6.8	6.8
Costo total \$/MWth	18.3	14.835
Costo del H2 \$/Kg	1.42	1.15

Como se puede apreciar el costo menor es para el de reformado, pero hay que considerar que produce CO₂ y que esto cuesta si hay que "capturarlo" y "secuestrarlo", se incrementaría el costo del hidrógeno 5 centavos de dólar, por lo tanto el costo total del hidrógeno por el proceso de reformado sería alrededor de 1.35 \$/KWt, mientras que para el proceso S-I se puede vender el O₂ que genera este proceso y eso lo convierte más competitivo.

6. CONCLUSIONES

La producción de hidrógeno a gran escala por medios nucleares es una opción viable en el futuro, requiere aún bastante trabajo de investigación, en particular el método S-I (más prometedor por ser más limpio). Probablemente la opción de utilizar el sitio de LV no sea el más adecuado, dado la cercanía de la población y lo reducido del sitio más el efecto de los vientos dominantes y la necesidad de colocar un reactor de alta temperatura.

El trabajo aquí presente propone una solución para la escasez de combustible, aprovechar al máximo los recursos del país para generar una fuente de combustible amplia, económica y limpia, como lo es el hidrógeno, el problema es hacerlo costeable y producirlo a gran escala. Con los avances en los diseños de los nuevos reactores nucleares, ese problema puede ser librado, los nuevos reactores llamados de alta temperatura hacen posible utilizar esa energía térmica para romper los enlaces covalentes que existen entre las cadenas de carbono e hidrógeno que componen a estos hidrocarburos, liberando así al hidrógeno que podría ser almacenado o transportado para su uso. Aún falta mucho por hacer, ya que si bien es cierto que la producción de hidrógeno a gran escala es posible deben tomarse las precauciones necesarias para poder transportarlo y almacenarlo, desarrollar más tecnología en ductos, tanques, pipas, etc., y empezar a producir celdas de combustible de gran eficiencia y bajo costo. Los costos del hidrógeno por el proceso de reformado son costeables y más baratos que otros procesos como el S-I, que produce hidrógeno a un costo de 1.42 dólares/Kg, pero este costo podría disminuir si se vende el oxígeno que también se genera. En el proceso de reformado se genera aparte del hidrógeno, dióxido de carbono que es el principal causante del efecto invernadero y un gran contaminante en nuestro país, pero existen procesos para limitar este problema. Por ejemplo, el secuestro de carbono incrementaría al costo del proceso de reformado 20 centavos de dólar/kg, lo cual sigue siendo costeable, y tal vez en el futuro se pueda utilizar el hidrógeno para mover vehículos, generar electricidad en nuestra casa y en fin se podría desarrollar nuevas tecnologías en que aplicar este combustible.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ing. Alejandro Cortés Carmona Jefe del Área de Impacto Radiológico Ambiental de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias por su apoyo en este trabajo.

REFERENCIAS

1. M. Ogawa, "Nuclear Production of Hydrogen", *IEA Renewable Energy Working Party Seminar*, Paris, Francia 3 de Marzo del 2003, memorias en CD.
2. "Gas Turbine - Modular Helium Reactor" <http://www.ga.com/gtmhr/index.html> (2003)
3. "Pebble Bed Modular Reactor" <http://www.pbmr.co.za> (2003)

4. H. R.Greenberg, J.J. Cramer, *Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, E.U. (1991)
5. K. R. Schultz, L. C. Brown, G. E. Besenbruch, C. J. Hamilton," Large-Scale Production of Hydrogen by Nuclear", *National Hydrogen Association Meeting*, Washington DC, March 2003.