

4. Generación de hidrógeno mediante una planta termoquímica Yodo-Azufre acoplada a una planta nuclear.

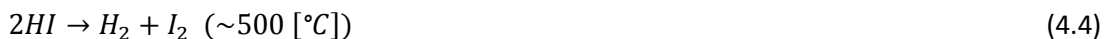
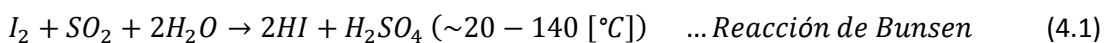
4.1 El proceso Azufre-Yodo.

El proceso S-I tiene como ventajas principales respecto a otros tipos de generación de hidrógeno que es cíclico y no trae consigo generación de GEI's, además de ser puramente termoquímico, por lo que prácticamente no se requiere electricidad para llevarlo a cabo, y debido a esto no se tienen las pérdidas asociadas a la transformación de energía y con esto se incrementa su eficiencia.

En un principio se tenían algunos argumentos en contra de este ciclo, como la creencia de la futilidad en investigación sobre el tema debido a que se pensaba que la tendencia en reactores nucleares sería utilizar neutrones rápidos a menores temperaturas que aquellas necesarias para el ciclo S-I ($\approx 850[^\circ\text{C}]$), así como los posibles cuellos de botella que presentan materiales como el yodo, la gran cantidad de pérdidas del mismo, y la elevada corrosión de los reactivos; haciéndolo muy peligroso para ser aplicado a escala industrial.

Como se ha visto en capítulos anteriores, una de las mejores opciones para llevar a cabo este ciclo es utilizando directamente el calor proveniente de un reactor nuclear (VHTGR), por las temperaturas que éste puede alcanzar. De los dos procesos más prometedores para producción de hidrógeno centralizada y a gran escala: ciclo S-I y HTE, el primero ofrece en general una mayor eficiencia, debido a que emplea directamente la energía térmica del reactor, y no es necesario realizar una primera transformación de ésta a electricidad para posteriormente mandarla al proceso [17].

Consiste de tres etapas mediante las cuales se obtiene el hidrógeno (figura 1), con distintas variantes, cada una de manera que se pueda optimizar todo el ciclo, así como su eficiencia; y básicamente consiste en la generación de ácidos en la reacción Bunsen y en su separación en las otras dos reacciones. Las reacciones se sintetizan de la siguiente manera [2]:



Y se observa que los productos de las reacciones 2 y 3 pueden ser directamente reutilizados en la primera [3].

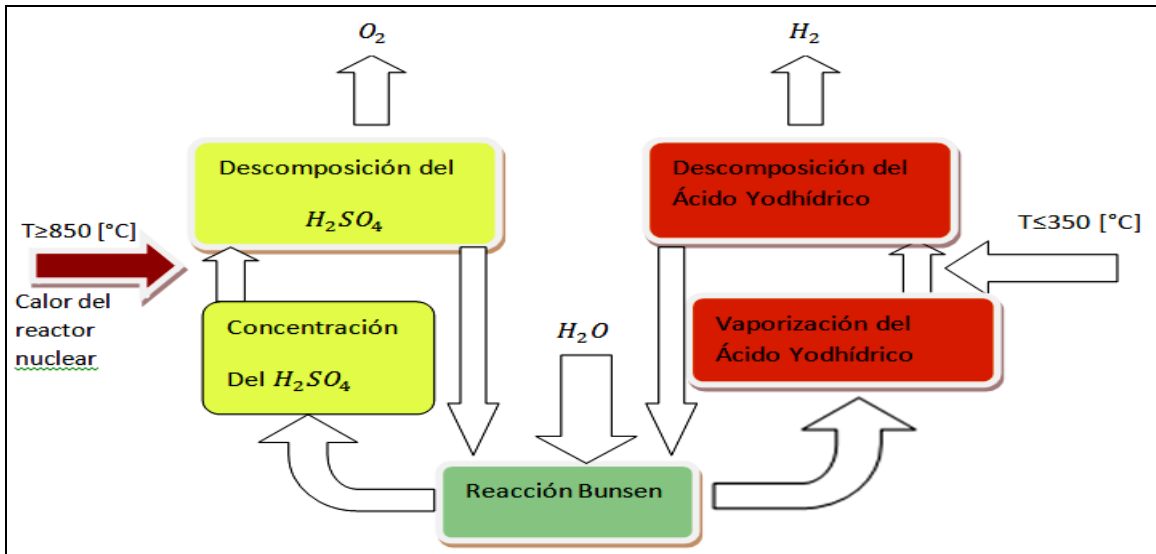


Figura 4.1. Diagrama del ciclo S-I [4].

En la reacción Bunsen se hace reaccionar Yodo con dióxido de azufre, en presencia de agua en exceso (aunque este exceso es desfavorable para la sección de HI, debido al punto azeotrópico de la mezcla), el agua es para propiciar la reacción espontánea y el yodo para inducir la fase de separación. La reacción Bunsen ocurre espontáneamente a 70-120 [°C] aproximadamente.

Se obtiene así ácido yodhídrico (HI) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) en presencia de agua y yodo en fases acuosas inmiscibles. La fase “ligera” contiene 4 moles de agua por mol de ácido sulfúrico, y la “pesada” aproximadamente 5 moles de agua y 4 de yodo por mol de ácido yodhídrico. La cantidad de yodo debe incrementarse hasta cuatro veces respecto al valor estequiométrico para permitir la fase de separación y purificación del ácido [5].

En la segunda etapa se “flashea” el ácido sulfúrico para deshidratarlo, y a continuación se descompone catalíticamente el trióxido de azufre (SO_3). Es en esta etapa donde se requieren las altas temperaturas obtenidas del reactor nuclear para poder llevar a cabo la descomposición (850° o más). La mayor dificultad de todo el proceso está en la reacción 4, ya que el ácido yodhídrico, en presencia del agua en exceso, que se mencionó anteriormente, forma una mezcla azeotrópica²⁴ de 57% w/w²⁵; esto es, que posee un único punto de ebullición y una vez evaporada se comporta como un compuesto puro (la fracción evaporada tiene la misma composición que el líquido), y no es posible separarlos por destilación simple. A partir de dicha mezcla se obtiene hidrógeno y yodo con la descomposición del ácido a temperaturas cercanas a los 500 [°C] aproximadamente, en presencia de catalizadores. Para esto se utiliza comúnmente el trióxido de hierro y moderador de la temperatura de disociación del ácido sulfúrico; de no usarse este catalizador, las temperaturas a

²⁴ Un estado azeotrópico es aquel en el que la composición de cada componente es igual en cada una de las fases coexistentes.

²⁵ “weight by weight”: peso de la sustancia por peso de la solución.

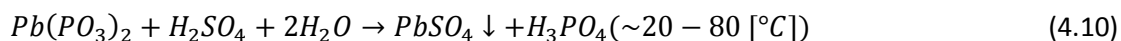
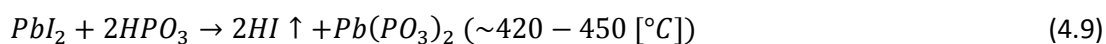
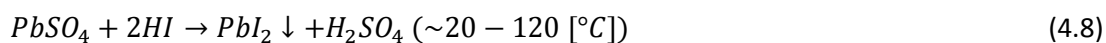
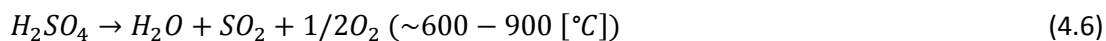
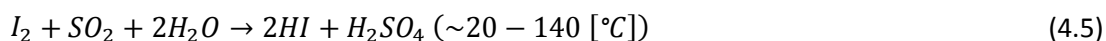
las cuales se llevaría a cabo la reacción sería superior a los 1200 [°C], lo cual redundaría en costos elevados debido a la alta calidad de los materiales a utilizar [6].

Existen diversos métodos para la separación de azeótropos, como la destilación azeotrópica, o la variación de presiones. En ambos casos deben vigilarse los coeficientes de actividad, los cuales se utilizan para las condiciones de equilibrio líquido-vapor [7]. El equilibrio líquido-vapor de la mezcla se presenta cuando ya no hay cambios respecto al tiempo de la temperatura y presión total de la mezcla.

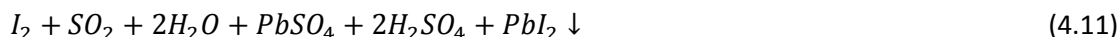
Otra desventaja de esta etapa es que la descomposición del ácido yodhídrico ocurre de manera lenta e incompleta; se deben evaporar 50 moles de agua por mol de hidrógeno producido para la destilación azeotrópica. La entalpía de evaporación es mayor a 2200 [KJ], alrededor de diez veces la entalpía de combustión del hidrógeno producido. Para corregir estos problemas se han propuesto distintas técnicas, como la destilación extractiva (una columna de destilación extractiva representa aproximadamente el 15% del costo capital de la planta); proceso mediante el cual se añade ácido fosfórico para inducir la separación del yodo y poder después usar destilación simple, y la electrodiálisis; con la que, aplicando una diferencia de potencial en una dilución acuosa, es posible extraer sustancias ionizadas disueltas dentro de la misma. La desventaja con la destilación extractiva es que se necesita de grandes cantidades de energía térmica para concentrar el ácido fosfórico [8].

Para reducir la cantidad de yodo necesaria, así como el calor necesario para descomponer el ácido yodhídrico, se ha propuesto formar anhídridos (óxidos no metálicos) obtenidos al utilizar plomo como agente precipitante. El sólido obtenido puede ser separado del líquido con filtración para evitar evaporar y reducir el calor necesario; de esta forma no se necesitan los reactores extractivos, y se tienen ahorros en costo capital de la planta de producción de hidrógeno, y permite reducir asimismo los problemas de corrosión, por tener una menor necesidad de recircular agua, yodo y ácido fosfórico, así como la posibilidad de reducir el tamaño de la planta sin comprometer su rendimiento [9].

Las reacciones completas quedan entonces de la siguiente forma:



Las reacciones 4.2 y 4.3 han quedado sintetizadas en la ec. 4.6, y de la misma forma, las ecs. 4.5 y 4.8 pueden llevarse a cabo simultáneamente como sigue:



Otra propuesta es optimizar los valores estequiométricos de cada una de las tres reacciones de manera que se produzca un exceso de ácido yodhídrico, sobrepasando la mezcla azeotrópica, y con esto es posible separarla con flasheo a menores presiones, lo cual trae consigo una disminución en la energía requerida para la etapa de separación [10].

4.2 Componentes de las plantas y datos de entrada.

El núcleo de un reactor de 1000 [MWt] contiene aproximadamente 75 toneladas de uranio enriquecido. Suponiendo que la carga es proporcional a la potencia nominal, una planta de referencia de 600 [MWt] contendría 45 toneladas del mismo combustible. Para mantener un funcionamiento eficiente en el reactor nuclear, es necesario cambiar alrededor del 30% del combustible gastado anualmente [11] (figura 4.2).

Details of Nuclear Power Plant Fuel																
Number of Types of Fuels used: <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="Add 1"/> <input type="button" value="Remove 1"/>																
TY	Fuel Description	Period of		Initial inventory	Annual Feed	Fresh fuel composition					Spent fuel composition				Show/Edit Details	
		From Year	To Year			NU/LEU	U233	DepU	Pu	Th	NU/LEU	U233	DepU	Pu		Th
				(kg)		(Weight %)										
1	Uranio E	2014	2073	45000	13500	100	0	0	0	0	80	0	20	0	0	

Figura 4.2 Cantidad de combustible requerido y su composición.

Con el diseño de los reactores avanzados se espera que el combustible nuclear requerido sea menor gracias a un mejor quemado. Nuevas tecnologías para el enriquecimiento (centrifugado de gas) requieren hasta 40 veces menos energía que los métodos actuales de difusión gaseosa. La tendencia mundial es usar la centrifugación de gas para todo el proceso de enriquecimiento. En 2002 el 55% del combustible producido fue a base de difusión gaseosa, mientras que el 45% empleó centrifugado [12].

Ya que el VHTGR se encuentra en etapa de diseño conceptual, es necesario hacer estimaciones con base a otro tipo de centrales similares, respecto al tipo y cantidad de algunos materiales, aunque deben hacerse notar diferencias como en los tiempos de construcción, debido a que los VHTGR tienen diseños modulares y esto representa disminuciones considerables en los mismos, además de las diferencias en contenciones y estructuras de seguridad [13].

Como se mencionó antes, en el caso de la planta de generación de H_2 es necesario considerar la construcción y operación de la misma planta y la adquisición de materias primas para el proceso termoquímico [14].

4.3 Análisis de casos.

Para el análisis de casos, se partirá de un costo nivelado de producción de hidrógeno base de 3.024 [\$/Kg], debido a la planta de producción de H_2 [15], y de 2.713[\$/Kg] debidos a los costos de la central nuclear, compuesta por cuatro reactores de 600 [MWt] [15], de acuerdo a las características técnicas de cada planta que se mencionaron en el capítulo 3; además de un costo fijo por transporte de 0.83 [\$/Kg] [16], sumando en total un costo nivelado de producción de hidrógeno de 6.567 [\$/Kg].

En un primer caso se tomarán en cuenta los productos químicos que intervienen directamente en el proceso SI y en la planta nuclear, estimando qué proporción conforman respecto a las inversiones capitales de cada subconjunto, y se estudiará de qué manera afectarían estos directamente al costo nivelado de producción de hidrógeno, en caso de sufrir algún cambio significativo en su precio debido a la variación en la escasez; definida como el cambio en la disponibilidad de un recurso a través del tiempo [17]. La disponibilidad de un recurso puede depender de diversos factores, pero ésta afecta directamente el precio final del producto. Los principales componentes a considerar son:

- **Helio:** Además de fungir como refrigerante principal del núcleo de los reactores nucleares, conforma, junto con el intercambiador de calor intermedio, la interface entre los reactores nucleares y la etapa de descomposición del trióxido de azufre.

Es químicamente estable y tiene una relativamente alta capacidad térmica específica, además de una sección eficaz para la interacción con los neutrones despreciable [18]. El helio se obtiene de depósitos de gas natural por medio de destilación fraccionada; se encuentra en concentraciones de hasta el 7% del volumen total; razón por la cual se puede pensar que, si el gas natural se volviese más escaso, o por otra razón sus precios se elevaran, el suministro de helio podría volverse menos estable y evidentemente su costo se vería afectado. Se hará la asunción de que el VHTGR contiene 3.685 toneladas de Helio [19] en promedio. El costo del helio es de \$2.181 por metro cúbico [20], y teniendo una densidad de $0.1785 \frac{Kg}{m^3}$ [21], se obtiene un costo total de $2.181/0.1785= 12.218$ [\$/Kg].

La tendencia de precios de gas natural en E.E.U.U. ha sido la mostrada en la tabla siguiente:

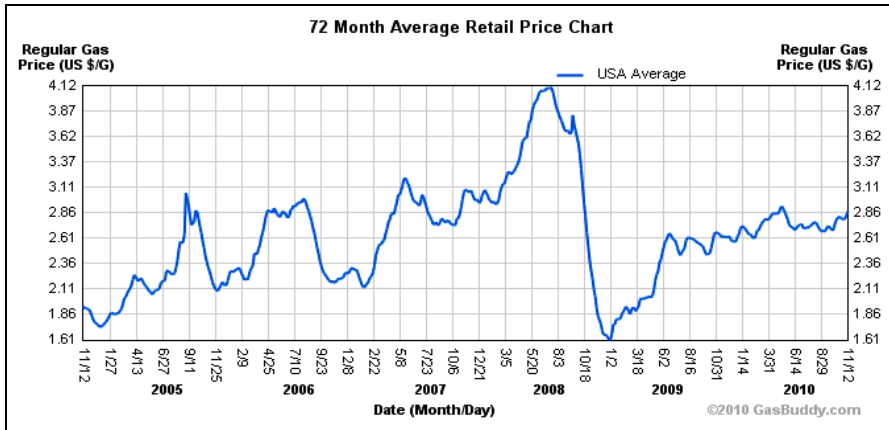


Figura 4.3
Variaciones en
el precio del gas
natural [22].

Suponiendo que la volatilidad de precios del gas natural afectase hasta en un 100% el del helio, y tomando en cuenta el total necesario para los cuatro reactores, éste oscilaría entre:

$12.218 \left[\frac{\$}{Kg} \right] * 3,685 [Kg] = \$45,023.33$ y $12.218 \left[\frac{\$}{Kg} \right] * 2 * 2,685 [Kg] = \$65,610.66$, y el añadir este costo al costo capital específico (CCE) de la planta nuclear, el costo nivelado de producción de hidrógeno (CNPH) se ve afectado de la siguiente manera:

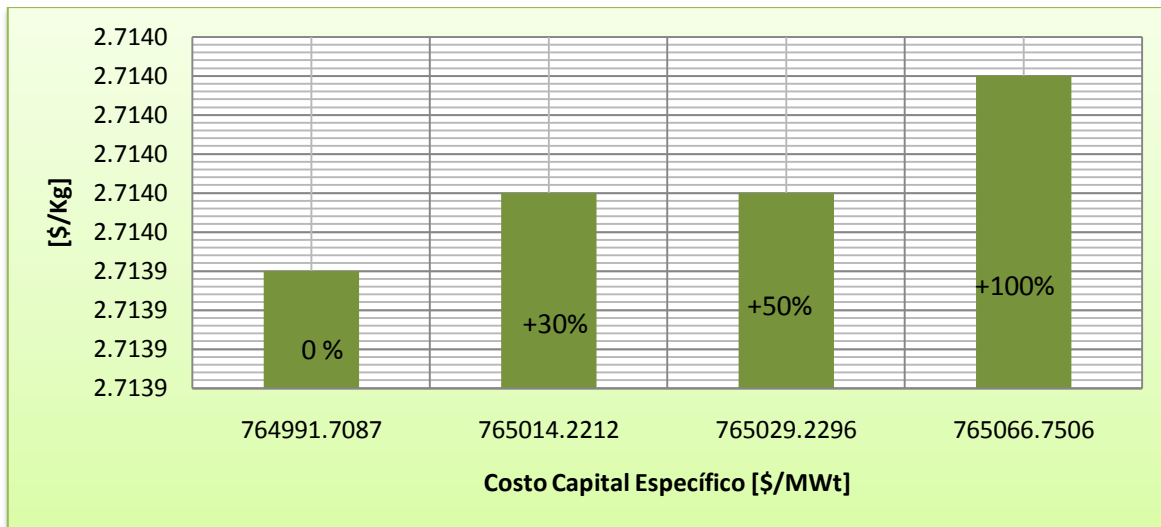


Figura 4.4 Variaciones en el CNPH en función del incremento en el costo capital específico, debido a la alza en el precio del Helio.

En la gráfica anterior se observa que las variaciones en el costo nivelado de producción de hidrógeno en función del incremento en el precio del helio no son muy significativas (0.001 [\$/Kg]), aun en el caso que el precio del helio se incremente hasta en un 100% respecto a su valor actual.

Los incrementos ocurren únicamente en el rubro de préstamos e IDC; lo cual se explica debido a que el programa calcula los IDC en base al costo capital de la planta (del que forma parte el helio) y a la tasa de interés.

- **Yodo:** En un principio la materia prima de donde se obtenía este elemento eran algunos tipos de plantas marinas, aunque actualmente la extracción ocurre principalmente de la salmuera del subsuelo asociada a depósitos de petróleo y gas natural (a partir de los yodatos, IO_3 , separándolos de nitratos de salitre), donde se tienen concentraciones más elevadas, así como de yoduros presentes en agua de mar y en algas (figura 4.3). Se requiere bastante energía para bombear la salmuera, y purificar y cristalizar el producto, razón por la cual su precio es elevado. El costo promedio de importación en 2008 para E.E.U.U., según el "U.S. Department of the Interior", en su publicación anual "US Geological survey", fue de 22.9 [\$/Kg] [23].

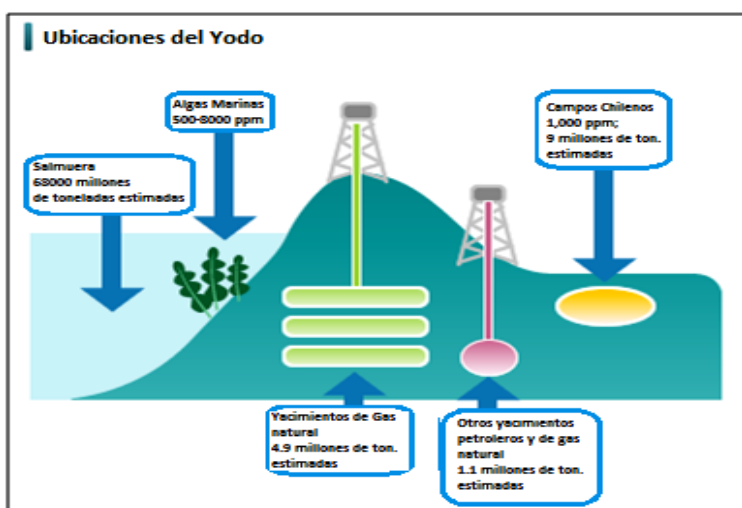


Figura 4.5 Fuentes para la obtención de yodo [24].

El mercado principal para el yodo está distribuido entre las aplicaciones industriales y de salud humana, aunque su consumo se incrementó sustancialmente desde hace aproximadamente cinco años debido a la creciente demanda de películas ópticas para pantallas LCD y catalizadores. Se estima que la demanda para el 2014 se habrá incrementado hasta en un 3.5% respecto a la actual [25]. La mayor dificultad con este material es que no es demasiado abundante, además de ser caro; lo cual podría representar una desventaja importante para el ciclo S-I. La producción es mayoritariamente hecha por Chile y Japón, con pequeñas cantidades producidas en E.E.U.U.; desde principios de la década 2000, se han hecho inversiones para incrementar las capacidades de producción, así como las tasas de utilización de las plantas. Se espera que la demanda se incremente en un 3.5% hacia el 2014.

Diversos experimentos indican la necesidad de aproximadamente 10,000 [ton] de yodo, para una producción estimada de 73,000,000 [Kg] de hidrógeno al año; lo cual representa un problema ya que la producción anual de yodo en 2008 apenas alcanzaba las 18,000 toneladas anuales [26]. Actualmente se producen alrededor de 29,200 toneladas anuales en todo el mundo con un crecimiento de demanda de 6% anual. Una sola planta con capacidades de producción como la que se estudia en este trabajo, y con el ciclo S-I original no tendría abastecimiento suficiente de yodo si comenzara a operar en los próximos años. El precio del yodo en 2008 oscilaba alrededor

de los 22.9 [\$/Kg] [27], el costo más reciente es de 24 [\$/Kg], precio al cual se exporta en Chile [28], y a partir del cual se harán las estimaciones por volatilidad (figura 4.5).

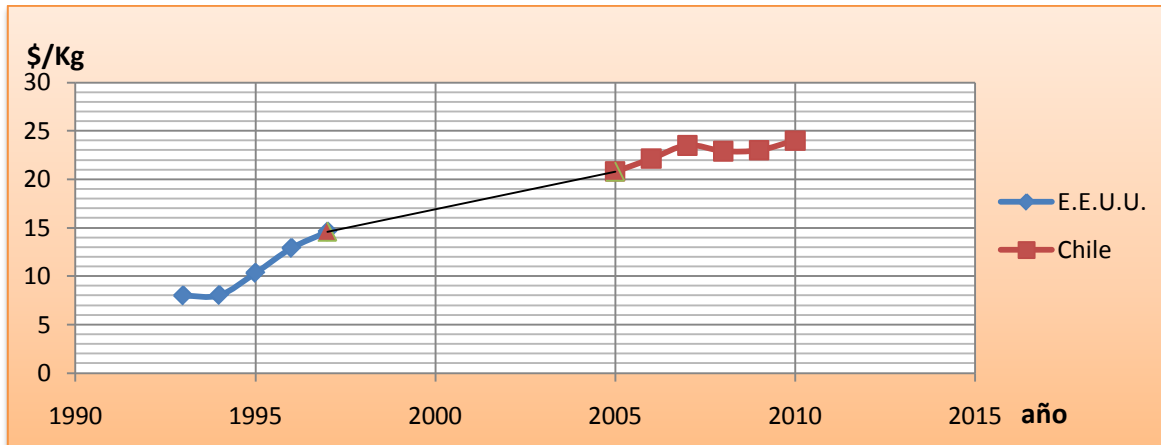


Figura 4.6 Registro de variaciones en el precio anual mundial de yodo.

Se proponen tres plantas diferentes en las que varía la producción de hidrógeno anual; y por ende, la cantidad de yodo requerida. Las características que distinguen dichas plantas son:

Tipo de Planta	Producción anual de H ₂ [MKg]	Cantidad de yodo necesaria [ton]	Costo capital de la planta [M\$]	Potencia E. de no proceso [Mwe]	Máxima Potencia E. [Mwe]	Costo total del yodo [M\$]	Fracción del costo capital total [%]
A [26]	73	10,000	673.325	268	657	240	26.28
B ²⁶ [29]	31.783	3,000	300	120	286	72	19.35
Base [14]	216	34,286.3	1410	815	1,945	822.87	36.85

Tabla 4.1 Datos técnicos de las plantas para los distintos casos de producción de H₂.

La cantidad de yodo necesaria para la planta base se obtuvo de una extrapolación lineal, contando con los datos de las plantas de menor producción, de la siguiente forma:

Coordenadas:

A (31783.341, 3000)

B (73000, 10000)

Base (216000, X)

$$\text{Por semejanza en triángulos rectángulos: } \frac{73-31.783}{10,000-3,000} = \frac{216-31.783}{X-3,000}$$

De donde se obtienen las 34,286.3 toneladas de yodo.

²⁶ 1,000 [mol/s].

Todos los demás datos de entrada, descritos en el capítulo 3 se mantienen constantes.

En las siguientes figuras se observa el incremento en el CNPH en función del precio del yodo, para cada una de las plantas descritas con antelación, en el caso de que el costo total del yodo sea agregado posteriormente al costo capital de cada tipo de planta:

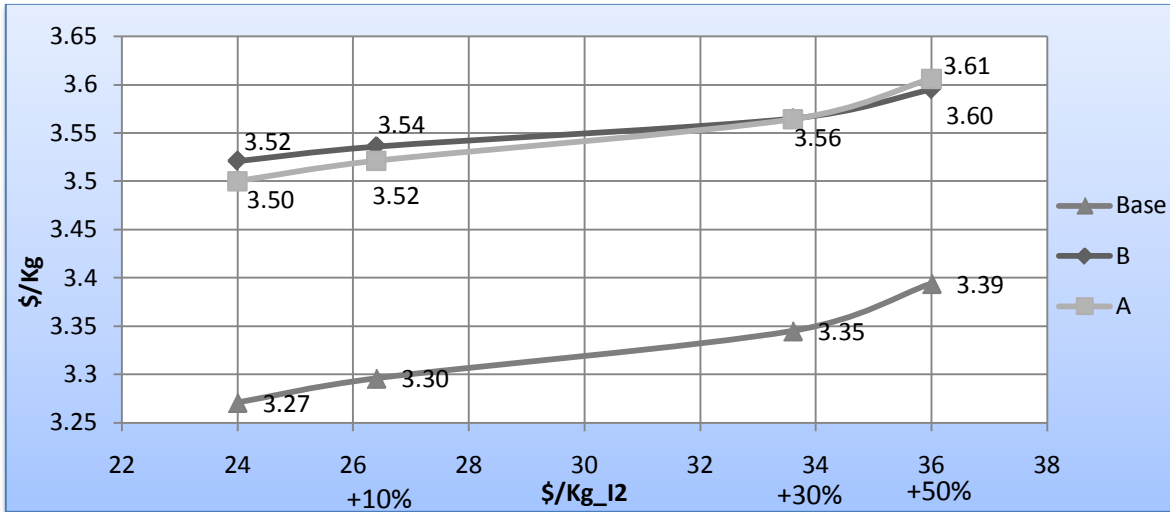


Figura 4.7 Aportación al costo nivelado de producción de Hidrógeno por parte de la planta de producción de hidrógeno, debido a las variaciones en los precios del Yodo.

Costo nivelado de producción de hidrógeno debido a la planta de producción, en base al incremento en los precios del yodo en cada caso:								
Tipo de Planta	CCT [M\$]	CNPH [\$]	+10%		+30%		+50%	
			CCT [M\$]	CNPH [\$]	CCT [M\$]	CNPH [\$]	CCT [M\$]	CNPH [\$]
A	913.325	3.5	937.32	3.521	985.32	3.564	1033.32	3.606
B	372	3.521	379.2	3.536	393.6	3.565	408	3.595
Base	2232.87	3.271	2315.15	3.296	2479.73	3.345	2644.3	3.394

Tabla 4.2 Aportación al costo nivelado de producción de Hidrógeno debido a las variaciones en los precios del Yodo.

Los porcentajes del costo capital de la planta de generación de hidrógeno, que representan los costos totales del yodo, alcanzan el 26.3, 19.4 y 36.85 % respectivamente; lo cual, a pesar de ser demasiado elevado, no repercute en gran medida en el costo nivelado de producción de hidrógeno, y se observa además que, para cada tipo de planta, el incremento por considerar el costo total del yodo como extra al costo capital es de $3.5 - 3.468 = \$0.032$, $3.521 - 3.5 = \$0.021$, y $3.271 - 3.024 = \$0.247$ para la planta A, B y Base, respectivamente.

- **Ácido Sulfúrico:** El inventario inicial de H_2SO_4 en la planta de hidrógeno es de 100 toneladas, con una tasa de pérdidas supuesta de 1% anual, por lo que para la vida útil de 60 años se estiman 160 toneladas [30], y con un costo promedio de 74.73 [\$/ton] se obtienen en total 11,956.8 [\$/ton].

La ventaja del ácido sulfúrico frente al helio y al yodo es que no presenta grandes riesgos de precios y disponibilidad, principalmente por ser relativamente abundante, y por la misma razón su precio no se vería demasiado afectado en caso de que se tuviera un alza abrupta de la demanda. A pesar de que el costo del ácido sulfúrico es mayor, si se toma en cuenta la cantidad total necesaria y se compara con el del yodo, se observa que el costo de éste es mucho menor en varios órdenes de magnitud, y dado que ambos se añaden al costo capital de la planta de producción de hidrógeno, los cambios que pudieran ser debidos al ácido tienen el mismo comportamiento que aquellos del yodo, aunque son despreciables.

El segundo caso consiste en observar la repercusión que provocan cambios en distintos indicadores económicos, tales como la tasa de interés manejada en cada planta y la tasa de descuento; fijadas originalmente en 5%.

La tasa de interés se aplica para el cálculo de los intereses generados durante la construcción de la planta en cuestión; mientras que la tasa de descuento es utilizada para obtener el valor presente de los flujos económicos durante todo el ciclo de vida del proyecto. Por esta razón, la tasa de interés afecta en menor medida al CNPH que la tasa de descuento; ya que ésta repercute únicamente en una planta, y esto se observa en las siguientes figuras:

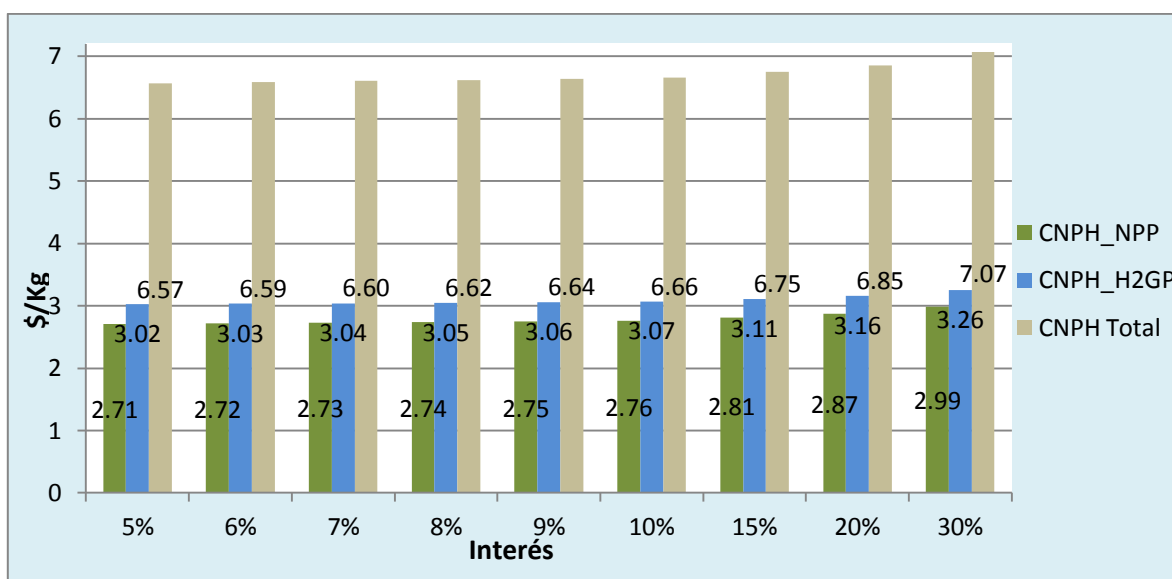


Figura 4.8 Variaciones en la aportación al CNPH por parte de la planta nuclear y de producción de hidrógeno en base a la tasa de interés.

Como se mencionó en el capítulo 3, la tasa de descuento es aquel factor empleado para descontar una fracción del valor del dinero futuro para poder compararlo en el año de referencia manejado, por lo que, cuando la tasa de descuento es mayor, un pago futuro es menor en la actualidad, y viceversa; una tasa de descuento más baja da lugar a mejores posibilidades de introducir nuevos tipos de tecnología, y ésta puede ser un factor con mayor influencia en la toma de decisiones; en proyectos de gran envergadura es posible emplear más de una tasa de descuento.

En la figura 4.9 y en la tabla 4.2 se muestran las variaciones en el CNPH, tanto para la planta nuclear como para la de producción de H_2 en función de la tasa de descuento empleada para hacer los cálculos de valor presente de ambas; variaciones que ocurren en los rubros de O&M, combustible y préstamos e IDC, en el caso de la planta nuclear, y O&M préstamos e IDC para la de producción de H_2 .

Para el caso en el que se emplea una tasa de descuento de 12 % (empleada por CFE en sus inversiones), el CNPH total se incrementa a [\$/Kg], % respecto al costo inicial; lo cual, a pesar de ser elevado, sigue siendo competitivo frente a otros tipos de generación (tabla 4.3).

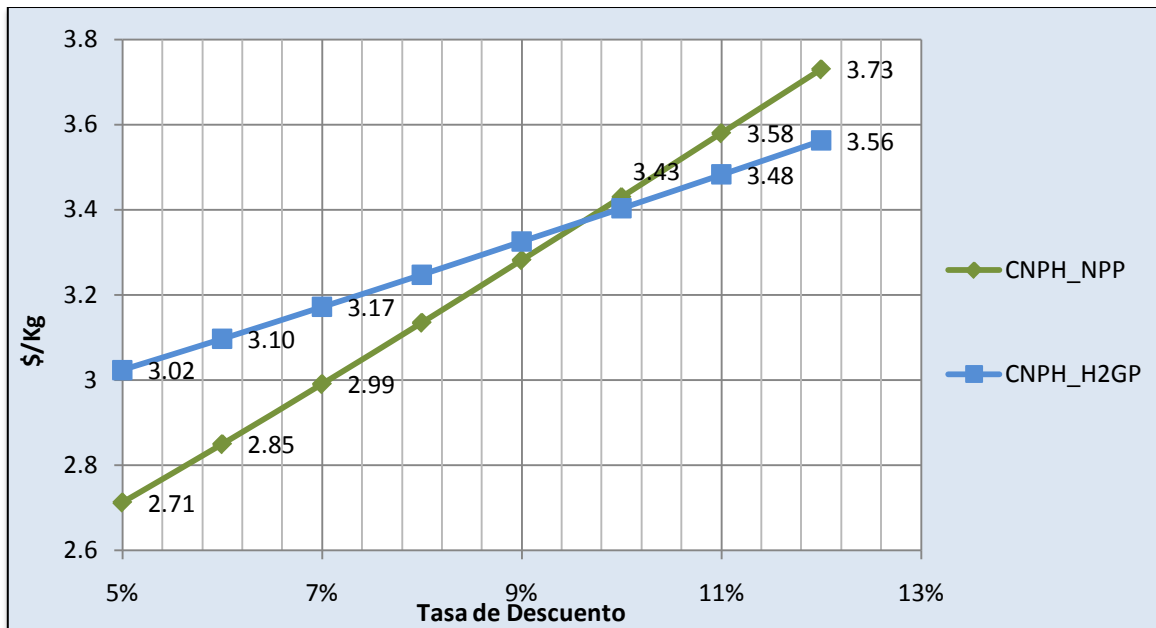


Figura 4.9 Variaciones en el CNPH en las plantas nuclear y de producción de H_2 en función de la tasa de descuento.

Las variaciones en cada rubro de las plantas se observan en las figuras 4.10 y 4.11 para la planta nuclear y de producción de hidrógeno, respectivamente:

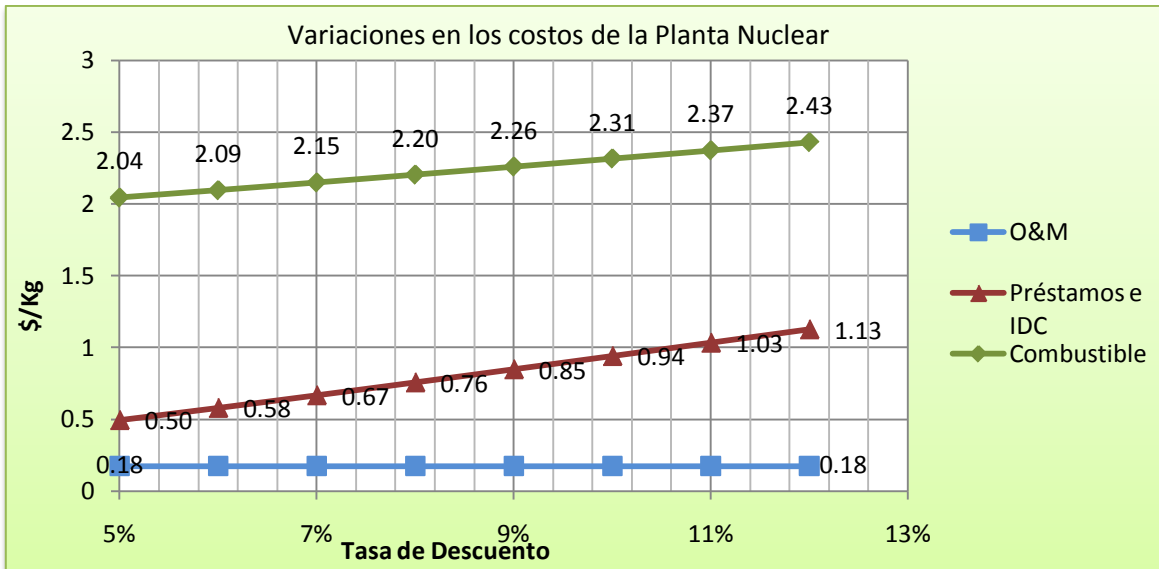


Figura 4.10 Sensibilidad en cada rubro de la planta nuclear debida a la variación en la tasa de descuento.

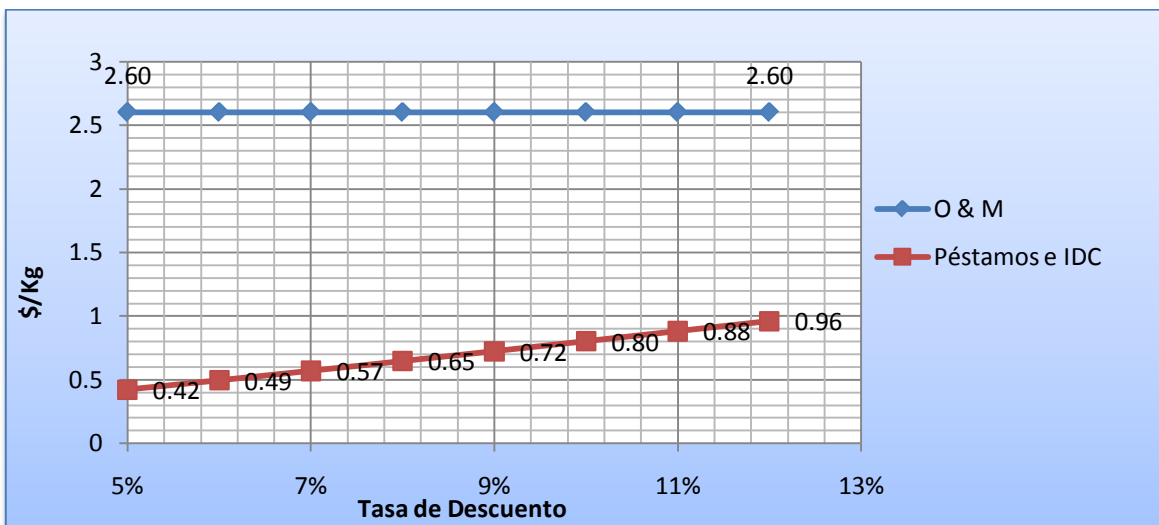


Figura 4.11 Sensibilidad en cada rubro de la planta de producción de hidrógeno debida a la variación de la tasa de descuento.

El tercer caso consiste en un análisis de sensibilidad en el CNPH respecto a qué tanta energía térmica se destine al proceso de producción de hidrógeno, y qué cantidad para generar electricidad. Debido a la configuración seleccionada para el caso base en cuanto a producción anual de hidrógeno y la potencia de los cuatro reactores junto con el factor de planta, es posible calcular la potencia eléctrica disponible de la siguiente manera:

La potencia térmica que es posible obtener de los 4 reactores nucleares es:

$$P_{tr} = P_t * \frac{F.C.}{100} = 600 * \frac{90}{100} * 4 = 2,160 [MW] \quad (4.12)$$

La máxima cantidad de potencia térmica requerida por cada unidad para la generación de hidrógeno se calcula de la siguiente forma:

$$P_{t_H2GP} [MW] = \frac{CapGen_{H2} \left[\frac{Kg}{año} \right] * Fact.Disp_{H2GP} * F.C.H2GP * 142 \left[\frac{MJ}{Kg} \right]}{3600 \left[\frac{s}{h} \right] * 8760 \left[\frac{h}{año} \right] * \eta_{H2GP}} - \frac{P_{e_H2GP}}{\eta_{ge}} [MW] \quad (4.13)$$

Donde:

$CapGen_{H2}$: Generación anual de hidrógeno.

$Fact.Disp_{H2GP}$: Factor de disponibilidad de la planta de producción de hidrógeno en %.

$F.C.H2GP$: Factor de capacidad de la planta de producción de hidrógeno en %.

E_{e_H2GP} : Máxima energía eléctrica instantánea requerida para la generación de hidrógeno.

η_{ge} : Eficiencia de conversión de energía térmica a eléctrica.

η_{gH2GP} : Eficiencia de la planta de producción de hidrógeno.

Asumiendo que el valor calorífico del hidrógeno es 142 [KJ/g].

Dando valores a la ecuación anterior [14]:

$CapGen_{H2}$	216,000,000
$Fact.Disp_{H2GP}$	0.9
$F.C.H2GP$	1
η_{H2GP}	0.45
η_{ge}	0.4

$$P_{t_H2GP} = \frac{216,000,000 * .9 * 1 * 142}{3,600 * 8,760 * 0.45} - \frac{P_{e_H2GP}}{0.4}$$

$$P_{t_H2GP} = 1,945.205 - \frac{P_{e_H2GP}}{0.4} \quad (4.14)$$

Si $P_{e_H2GP} = 0$; $P_{t_H2GP} = 1,945.205 [MWt]$ es la potencia máxima requerida para producir las 216,000 [ton_{H2}].

Entonces, la fracción disponible para generar electricidad es igual a:

$$2,160 - 1,945.205 = 214.795 [MWt]$$

Y por cada reactor: 53.698 [MWt]; quedando entonces, debido a la eficiencia de conversión:

$53.698 [MWt] * 0.4 = 21.479 [MWe]$. Tomando en cuenta los cuatro reactores se obtienen 85.918 [MWe]; alrededor del 10% del total de potencia eléctrica necesaria, y con esta cantidad siendo proporcionada por la planta nuclear, el CNPH se incrementa en $6.63-6.56=0.07$ [¢/Kg]. Esto es debido a que se incrementan los costos de la planta nuclear en mayor proporción que la disminución en la planta de producción de hidrógeno por concepto de los costos en electricidad; que se introducen como costos de O&M.

Suponiendo que los reactores únicamente ocuparan 4.5 toneladas de uranio enriquecido, con el 30% de quemado anual, y no las 45 toneladas manejadas en cada caso, el CNPH sería de $3.02 (H2GP)+0.8757 (NPP)+0.83 (H2T)=4.72$ [\$/Kg]; y bajo estas condiciones, el suministrar la misma potencia para electricidad de no proceso sí es conveniente, ya que el CNPH se reduce en 14 [¢/Kg]. A mayor combustible empleado, los costos en la planta nuclear se incrementan proporcionalmente a la electricidad producida; luego entonces, cuando el combustible utilizado es menor, asimismo es menor el costo de producir electricidad, y ya que las reducciones en la planta de producción de hidrógeno tienen el mismo comportamiento respecto a la producción de electricidad, independientemente de la cantidad de combustible, sí compensan el incremento en la planta nuclear.

Cuando se produce electricidad, es posible seleccionar la opción de que el software calcule el costo unitario de producción de la misma por parte de la planta nuclear. Posteriormente éste se considera como un costo de entrada para la H2GP. El costo unitario de electricidad para generación y almacenamiento de H2 manejado es de $0.061 \left[\frac{\$}{KW_e * h} \right]$ [31]; el costo de la electricidad a tasas industriales en 2007 era aproximadamente de $0.0483 \left[\frac{\$}{KW_e * h} \right]$ generalizado [31]; considerando la variación del valor del dinero de 2007 hasta hoy, el valor de 0.061 suena coherente. Con esto, se calculan las cargas de electricidad producida, y para la producción de electricidad descrita anteriormente, los costos se reducen de M\$ 435.95 a M\$389.95; la aportación al costo nivelado en O&M en la planta de producción de hidrógeno se reduce, aunque cada rubro de la planta nuclear se incrementa en mayor proporción.

El destinar potencia eléctrica gradualmente afecta cada rubro en la H2GP de la siguiente manera:

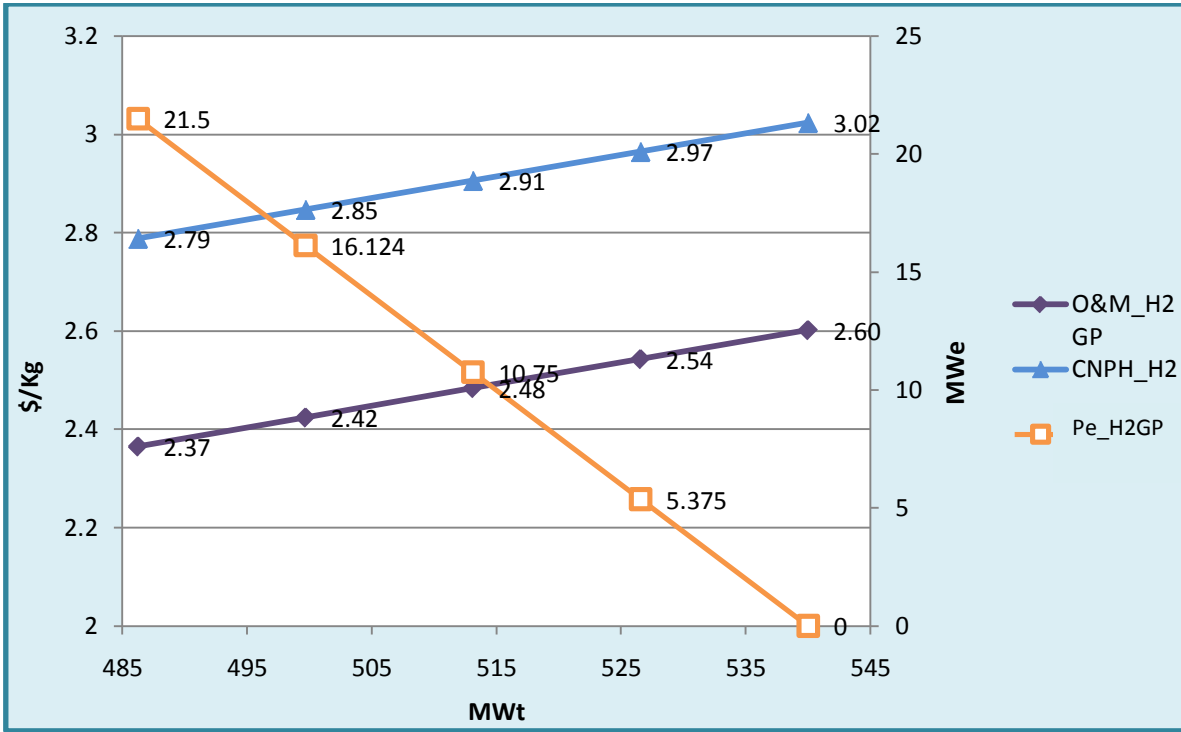


Figura 4.11 Aportación al CNPH por parte de la H2GP en función de la potencia térmica que se destine a la generación de electricidad.

En la siguiente figura se observan simultáneamente los cambios en las aportaciones al CNPH en la planta nuclear y de producción de hidrógeno, así como el incremento gradual del CNPH total:

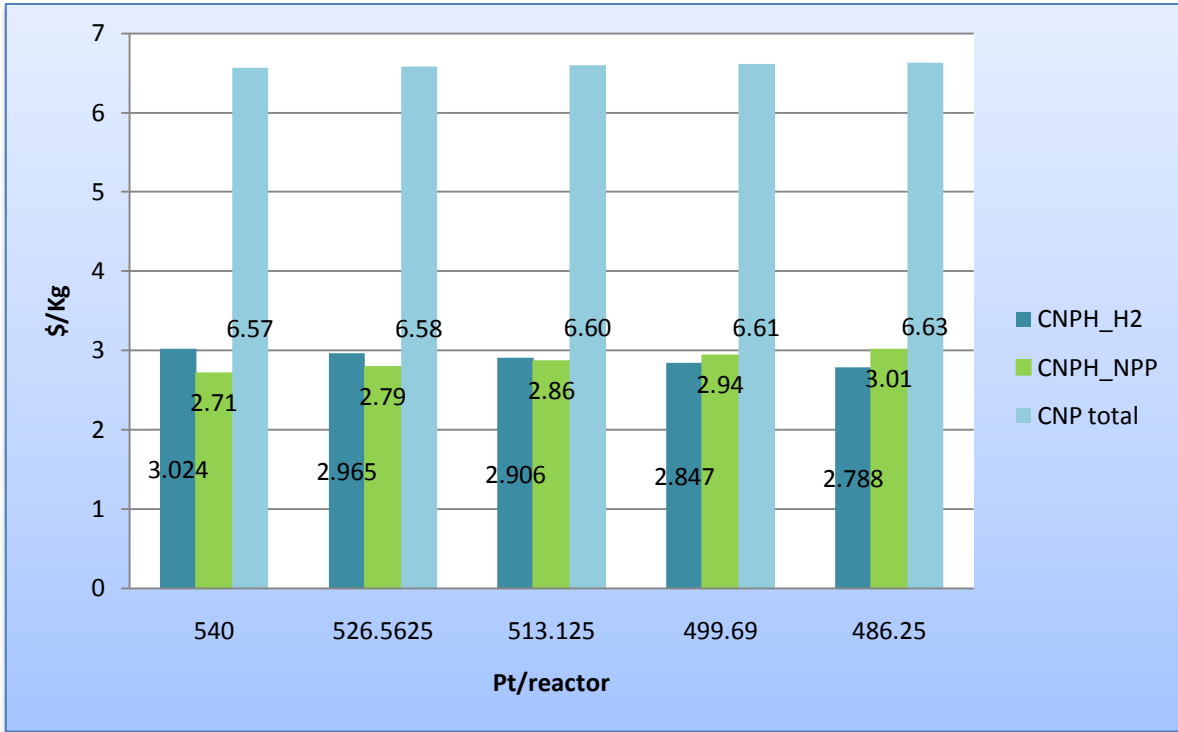


Figura 4.12 Sensibilidad en el CNPH en función de la potencia térmica que se destine a la generación de electricidad.

El valor presente de las ganancias obtenidas del despacho de electricidad, para el caso en que ésta exceda la cantidad requerida, ya sea para el proceso, o electricidad de no proceso, se calculan como:

$$VP_{gan}[\$] = C \left[\frac{\$}{KWh} \right] \sum_{t_0}^{t_i} \frac{P_{total}[KW] * 8760[h] * F.P.}{(1+r)^{t-t_0}} \quad (3.18)$$

Donde:

- P_{total} = Potencia eléctrica neta de la planta en el año t.
- F.P. = Factor de planta en el año t.
- 8760 = horas del año.
- C = costo nivelado por [KWh] generado, el costo nivelado unitario de energía se obtiene de:

$$C = \frac{VP_{costos}}{VP_{ingresos}} \quad (3.19)$$

En el caso que se seleccione la opción del cálculo de dicha variable por el programa. En este estudio se utilizó el valor fijo especificado en párrafos anteriores.

Para el cálculo del costo unitario nivelado por producción de hidrógeno se utiliza la siguiente fórmula:

$$VP_{ingresos}[\$] = C \left[\frac{\$}{Kg} \right] \sum_{t_0}^{t_i} \frac{P_H [Kg]}{(1+r)^{t-t_0}} \quad (3.20)$$

Donde:

- P_H es la producción anual de H₂ considerando la disponibilidad y el factor de planta.
- C en este caso es el costo nivelado de producción de hidrógeno [\$/Kg].

Así sea necesaria electricidad para el proceso o únicamente la electricidad de no proceso (electricidad que no se ocupa directamente en la producción del hidrógeno, sino para uso de otros equipos como bombas, compresores, luminarias, equipo de control, etc.; 815 [MWe] [32]), por una parte se toman en cuenta los costos de producción de electricidad a partir de los reactores nucleares, y en el caso de que ésta no sea suficiente para la demanda de la H₂GP, lo demás se podría considerar como electricidad tomada de la red.

Los costos por electricidad son tomados en cuenta únicamente cuando ésta es utilizada; es decir, suponiendo que la planta del caso base no emplease electricidad, aún cuando los reactores nucleares produjesen los 85.9 [MWe], éstos no añadirían ningún costo extra al hidrógeno.

Si se mantiene constante la energía térmica suministrada por los reactores (400*4*.9=2160 [MWt*h/h]), así como el F.P y la eficiencia, sería necesario destinar únicamente para producción de electricidad:

$$815 [MWe] * 0.4 = 2037.5 [MWt]$$

Prácticamente el total de potencia que les es posible suministrar por los reactores.

Evidentemente, al reducir la producción del H₂, el costo nivelado de producción se incrementa, pero al hacer esto, sería posible obtener ahorros por concepto de energía eléctrica, si se empleasen menores cantidades de combustible.

Originalmente, en la planta denominada A, que tenía una producción anual de 73,000 toneladas de H₂, el CNPH es de 3.50 (H₂GP)+2.712 (NPP)+ 0.83 (H₂T)= 7.042[\$/Kg]; mayores a los 6.567[\$/Kg] que se tienen con la producción base de 216,000 ton, sin producir electricidad; sin embargo, como esta planta produce el 30% del hidrógeno que la planta original, asimismo es posible suministrar una mayor proporción de electricidad a la total requerida; y el incremento en el CNPH es mayor al del caso base.

La planta que se denominó B para el análisis de sensibilidad en función del precio del yodo es aquella que tiene una menor necesidad de potencia térmica, debido a la menor producción de H₂. Si en la ecuación 4.1 se sustituyen los 31,783,341 [Kg] de H₂ producidos al año, la P_t necesaria es de 286.227 [MWt]; una vez convertida en potencia eléctrica la potencia térmica restante, se tienen 187.37*4= 749.5 [MWe], y con estos datos, el CNPH se incrementa a: 5.56(NPP)+3.38

$(H_2GP)+0.83= 9.77[\$/Kg]$, sin tomar en cuenta los posibles incrementos en el precio del yodo; mismos que a su vez serían menores debido a que se requieren menores cantidades.

Suponiendo que con las reacciones 4.5 a 4.10, sea posible eliminar la necesidad de utilizar las columnas extractivas para la descomposición del ácido yodhídrico, la reducción en el 15% del costo capital de la planta de producción de hidrógeno provoca asimismo una reducción en el CNPH de 0.06 $[\$/Kg]$; si aunado a esto se considera una posible reducción de consumo de electricidad entre el 60 y 80%, el CNPH final del hidrógeno oscilaría entre 4.6 y 5.1 $[\$/Kg]$.

Finalmente, en la siguiente tabla se resumen los distintos medios para producir hidrógeno; algunos de ellos tomados del Capítulo 1, ya sea conceptuales o existentes, así como el costo nivelado de producción estimado o registrado, y en la cual se muestra la alta competitividad que presenta el ciclo Azufre-Yodo:

Método de producción	Costo estimado $[\$/Kg_{H_2}]$
S-I	Entre 4.6 y 9.7
Electrólisis [29]	4.36, 6.3, 7.3
Celdas fotovoltaicas de silicón [34]	23
BWGS [35]	3.4
Gas, con y sin captura de CO_2	Entre 5.6 y 2.55
Solar térmica	10.49
Solar fotovoltaica	Entre 5.7 y 23
Pirólisis [36]	Entre 1.8 y 3.1
Gasificación de biomasa [37]	2.05
Gasificación de carbón [38], [39]	5.6, 1.6
Digestión (Degradación anaerobia) [40]	75.95

Tabla 4.3 Costos estimados de producción de hidrógeno para distintos procesos.