

CAPITULO 4: GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE UNA PLANTA DE ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA ACOPLADA A UNA PLANTA NUCLEAR.

4.1 CONSIDERACIONES Y DATOS DE ENTRADA

Para todos los casos el tipo de transporte será el mismo, por tuberías. El modelo de la planta de producción de hidrógeno por medio de electrólisis de alta temperatura estará basado en la planta piloto del trabajo de J. Stephen Herring y otros autores [1]. La planta nuclear y de hidrógeno está basada en los datos proporcionados por el trabajo de I. Khamis y U.D. Malshe presentado en el International Journal of Hydrogen Energy [2], con algunas variaciones en los datos. Se efectuarán los diversos casos y se hará una comparativa entre ellos, desde el punto de vista de viabilidad económica, identificando los parámetros clave para obtener costos de producción bajos.

Los siguientes datos son idénticos para la planta nuclear, como para la planta de generación de hidrógeno y la parte de transporte. La tasa de descuento que se maneja es del 5%, una tasa de equidad/deuda (E:D) de 0:100%. La tasa de interés del 5% y una vida útil de 60 años. Estos datos serán iguales para todos los casos.

La carga inicial de combustible [3] será de 45ton con una carga anual de 13.5ton, que corresponde al 30% de la carga inicial, el costo de combustible es de 2,233.65 [Dls/Kg]. Esta cantidad de combustible se utilizará para cada caso.

Los datos específicos para la planta nuclear, la planta de hidrógeno y el sistema de transporte del hidrógeno serán iguales para todos los casos y se encuentran en la Tabla 1.

Para cada caso primero se presentarán los resultados obtenidos y se hará posteriormente el análisis de estos. En algunos casos los datos de las Tablas pueden variar, tienen un asterisco, y se hará mención sobre dicho cambio en la descripción del caso.

Tabla 1. Datos técnicos de la planta nuclear, la planta de hidrógeno y el sistema de transporte.

Planta Nuclear	
Tipo de reactor	GT-MHR
Número de unidades*	4
Potencia térmica nominal (MWth/unidad)	600
Factor de Capacidad (%)	90
Factor de disponibilidad (%)	100
Potencia térmica para la generación de H ₂ (MWth/unidad)*	540
Periodo de construcción	3 años
Vida útil	60 años
Enfriamiento antes del desmantelamiento	1 año
Periodo de desmantelamiento	9 años
Periodo de enfriamiento del combustible gastado	2 años
Periodo de enfriamiento de residuos nucleares	2 años
Costo capital (unidad)	458,950,000 Dólares
Costo anual del combustible (unidad)	30,154,373 Dólares
Costo de operación y mantenimiento (unidad)	9,500,000 Dólares
Costo de desmantelamiento (unidad)	11,473,750 Dólares
Planta de Hidrógeno	
Generación nominal anual de hidrógeno (kg/unidad)*	216,000,000
Eficiencia del proceso de generación de hidrógeno (%)*	50
Factor de capacidad (%)	90
Factor de disponibilidad (%)	100
Electricidad requerida para proceso (MWe/unidad)*	0.5
Electricidad requerida para no proceso (MWe/unidad)*	800
Periodo de construcción	3 años
Vida útil	60 años
Enfriamiento antes del desmantelamiento	1 año
Periodo de desmantelamiento	9 años
Costo capital (unidad)	1,410,000,000 Dólares
Costo de operación y mantenimiento (unidad)	505,612,800 Dólares
Transporte del hidrógeno mediante gasoductos	
Distancia de transporte (km)	500
Diámetro equivalente del gasoducto (m)	0.25
Factor de fricción	0.01
Temperatura del hidrógeno (k°)	290
Presión de entrega (MPa)	5
Periodo de construcción	3 años
Vida útil	60 años
Enfriamiento antes del desmantelamiento	1 año
Periodo de desmantelamiento	9 años
Capacidad del compresor de referencia (KWe)	4000
Precio del compresor de referencia (Dólares/KWe)	984.04
Presión del compresor de referencia (MPa)	20
Exponente para el ajuste de tamaño del compresor	0.8

Exponente para el ajuste de la presión del compresor	0.18
Costo específico del gasoducto (Dólares/m)	10.93

4.2 RESULTADOS

Primer Caso: En este caso se usará una eficiencia del 45%, los datos son los mismos a excepción de la energía eléctrica que no es requerida para el proceso, puesto que se tomara en cuenta que como una planta de generación a gran escala, se requerirá una energía eléctrica de 800MWe que se utilizan en el proceso SI.

En la Fig. 4.1 se puede apreciar que la aportación de la planta nuclear resultó ser menor que el de la planta de hidrógeno y el costo es relativamente bajo, aunque claro es una planta piloto y no un prototipo a gran escala, por lo que sirve de muestra para los siguientes casos y sobre todo para tener una base en cuanto a los resultados esperados en los siguientes casos.

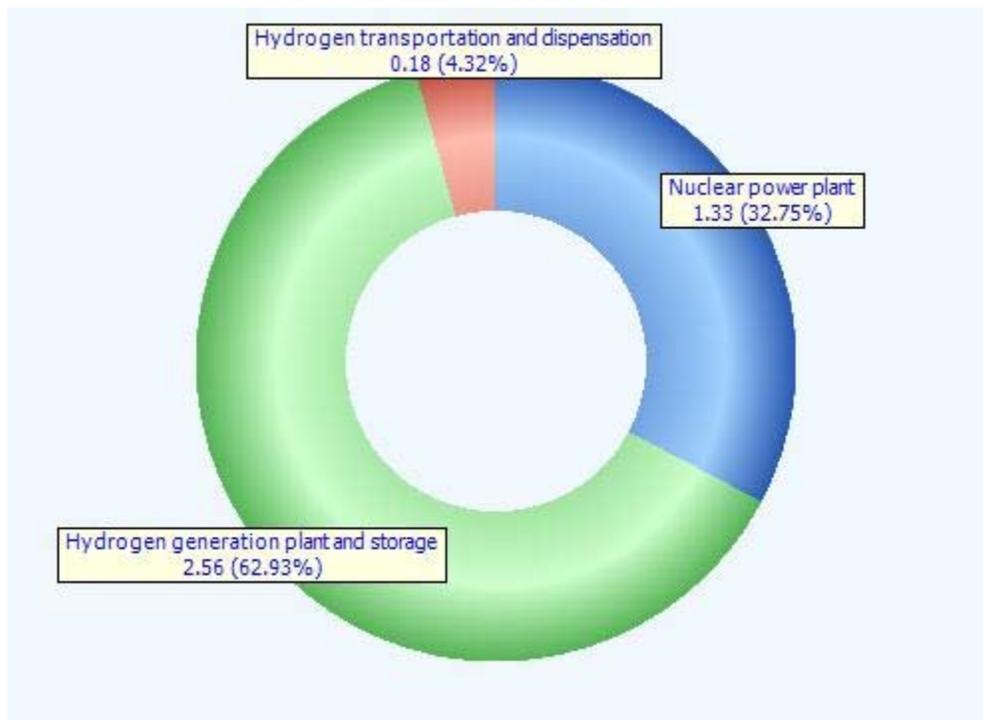


Fig. 4.1 Costo nivelado de Energía unitaria de producción de hidrógeno para el *Primer Caso*.

En este caso el costo total por kilogramo de hidrógeno producido es de: 4.07 USD/kg.

En la Tabla 2 se muestra la aportación de cada una de las partes principales del proceso de producción de hidrógeno, aunque para nuestro caso de estudio no se toma en cuenta en el análisis de resultados la parte del transporte.

Tabla 2. Aportación en el costo por parte de la planta nuclear, planta de hidrógeno y transporte para *Primer caso*.

Costo de Componentes	USD/kg	Porcentaje
Planta nuclear	1.33	32.75
Planta de hidrógeno y almacenamiento	2.56	62.93
Transporte del hidrógeno y distribución	0.18	4.32

En el desglose del costo de la planta nuclear, tenemos la siguiente gráfica, que se puede observar en la Fig. 4.2 el costo del combustible forma gran parte del costo de la planta nuclear, junto con los préstamos y el IDC, O&M forma un porcentaje muy pequeño y qué decir del costo de desmantelamiento que es prácticamente nulo.

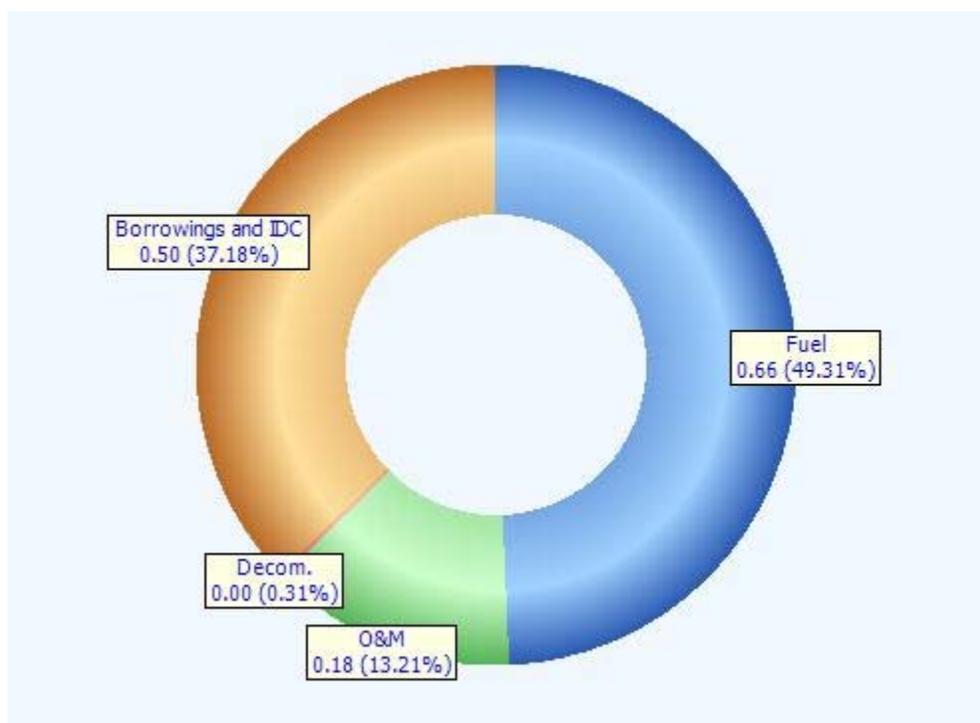


Fig. 4.2 Costo desglosado de la planta nuclear para el *Primer caso*.

En este caso la aportación de la planta nuclear es de: 1.33USD/kg.

La Tabla 3 nos muestra cada una de las partes fundamentales que se tomaron en cuenta para el análisis económico de la planta nuclear.

Tabla 3. Desglose de la aportación de la planta nuclear para el *Primer caso*.

Costo de Componentes	USD/Kg	Porcentaje
Combustible	0.66	49.31
O&M	0.18	13.21
Desmantelamiento	4.07E-03	0.31
Regreso de equidad	0	0
Prestamos y IDC	0.50	37.18

Remodelación	0	0
Consumibles	0	0

Como se puede apreciar en la Fig. 4.3 todo el costo de la planta de producción de hidrógeno es debido a O&M, una razón por la cual esto acapare completamente el aporte al costo del hidrógeno es, que el proceso de electrólisis es costoso en cuanto a mantenimiento debido a que se opera en condiciones extremas y por lo tanto requiera mantenimiento constante.

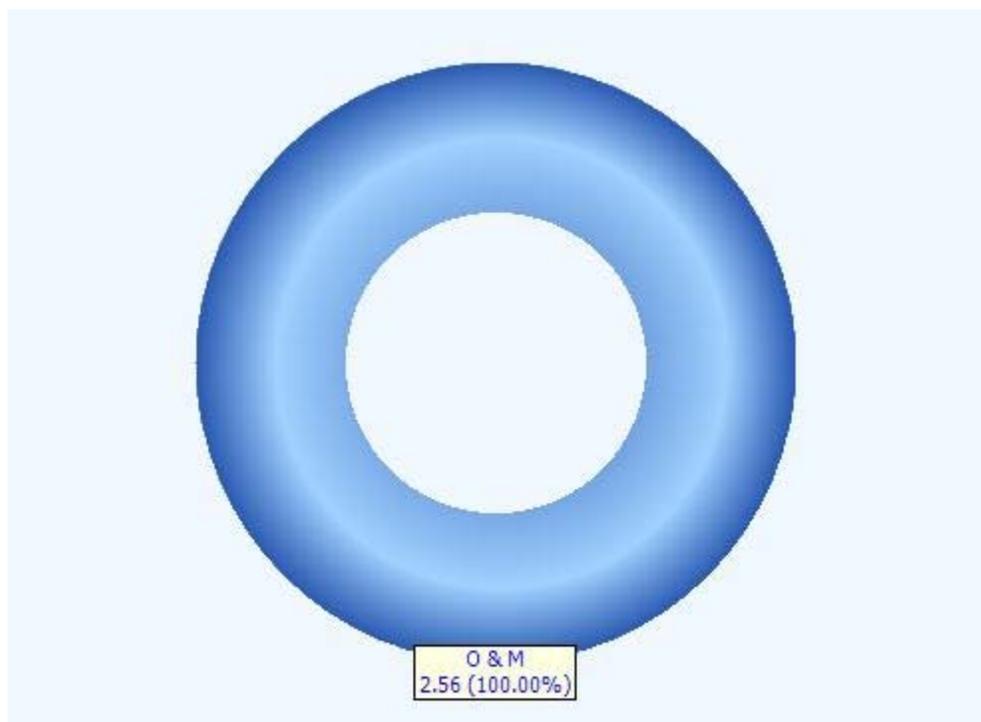


Fig. 4.3 Costo desglosado de la planta de hidrógeno para el *Primer caso*.

En este caso la aportación de la planta de hidrógeno es de: 2.56 USD/kg.

En la Tabla 4 se aprecia que únicamente la aportación de la planta nuclear es por concepto de O&M.

Tabla 4. Desglose de la aportación de la planta de hidrógeno para el *Primer caso*.

Costo de Componentes	USD/kg	Porcentaje
O&M	2.56	100
Desmantelamiento	0	0
Regreso de equidad	0	0
Prestamos y IDC	0	0
Remodelación	0	0

Consumibles	0	0
-------------	---	---

Segundo caso: Para este caso la energía eléctrica de proceso se tomará de 264MWe y una eficiencia térmica de la electrólisis del 45%. Una producción de hidrógeno de 78840ton al año. Esto corresponde a los 14 módulos de producción de hidrógeno que generan en total 2.5kg de hidrógeno por segundo. Para este caso si se tomará una energía eléctrica no requerida por el proceso de 800MWe que se utilizan en el proceso SI.

Para este caso, como la energía eléctrica para el proceso es grande, la energía térmica que requiere el proceso es muy baja.

Para calcular la energía eléctrica de proceso se utilizó la siguiente fórmula [4]:

$$PW_{ele} = \left(\frac{2F * E_{celda}}{1000 * MH_2} * mh_2 \right) \quad (4.1)$$

Donde;

F : Es el número de Faraday (96500 J/V mol).

E_{celda} : Es el voltaje de operación de cada celda, en este caso es el voltaje que requiere cada módulo. Cada módulo requiere 39KV.

MH_2 : Es el peso molecular del hidrógeno en g/mol.

mh_2 : Es el índice de producción de hidrógeno en kg/s.

En la Fig. 4.4 podemos ver que el costo de la planta de hidrógeno y almacenamiento subió significativamente, esto puede ser debido a que la producción de hidrógeno disminuyó considerablemente, además de que la energía eléctrica de proceso para los módulos de generación de hidrógeno, propiamente los electrolizadores requieren una gran potencia eléctrica. En este caso el costo total por kilogramo de hidrógeno producido es de: 9.54USD/kg. En la Tabla 5 se muestra la aportación de cada una de las partes que conforman la producción de hidrógeno.

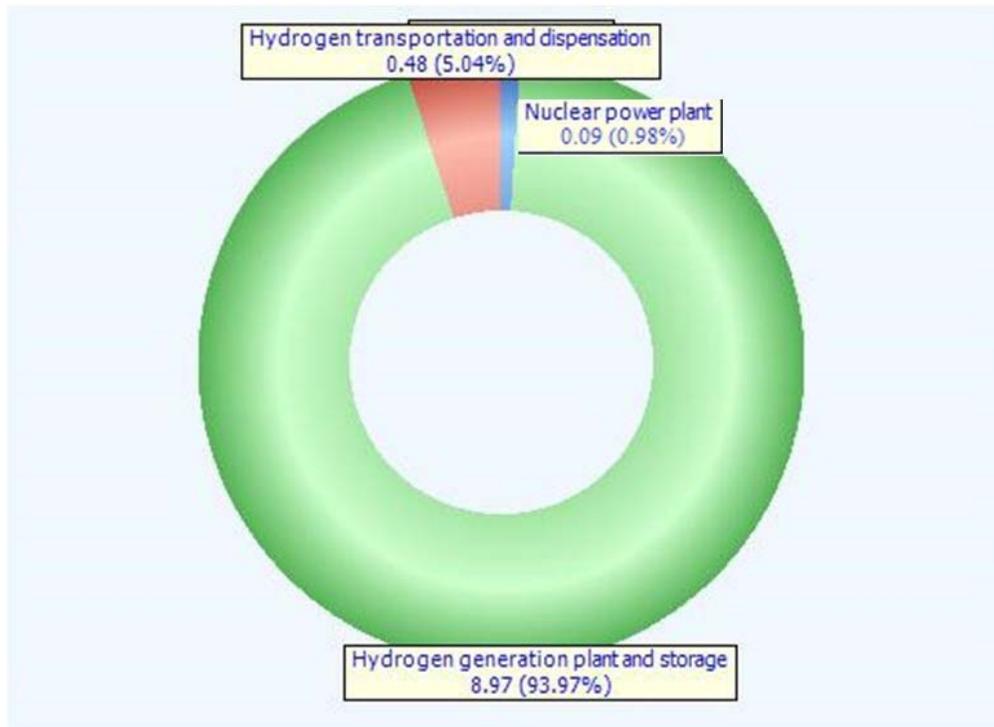


Fig. 4.4 Costo nivelado de Energía unitaria de producción de hidrógeno para el *Segundo caso*.

Tabla 5. Aportación en el costo por parte de la planta nuclear, planta de hidrógeno y transporte para el *Segundo caso*.

Costo de Componentes	USD/Kg	Porcentaje
Planta nuclear	0.09	0.98
Planta de hidrógeno y almacenamiento	8.97	93.97
Transporte del hidrógeno y distribución	0.48	5.04

Se puede observar en la Fig. 4.5 que la gráfica muestra casi exactamente las mismas proporciones que en el primer caso, siendo las partes de combustible, préstamos y interés durante la construcción las que más aportación tienen en el costo nivelado de la planta nuclear.

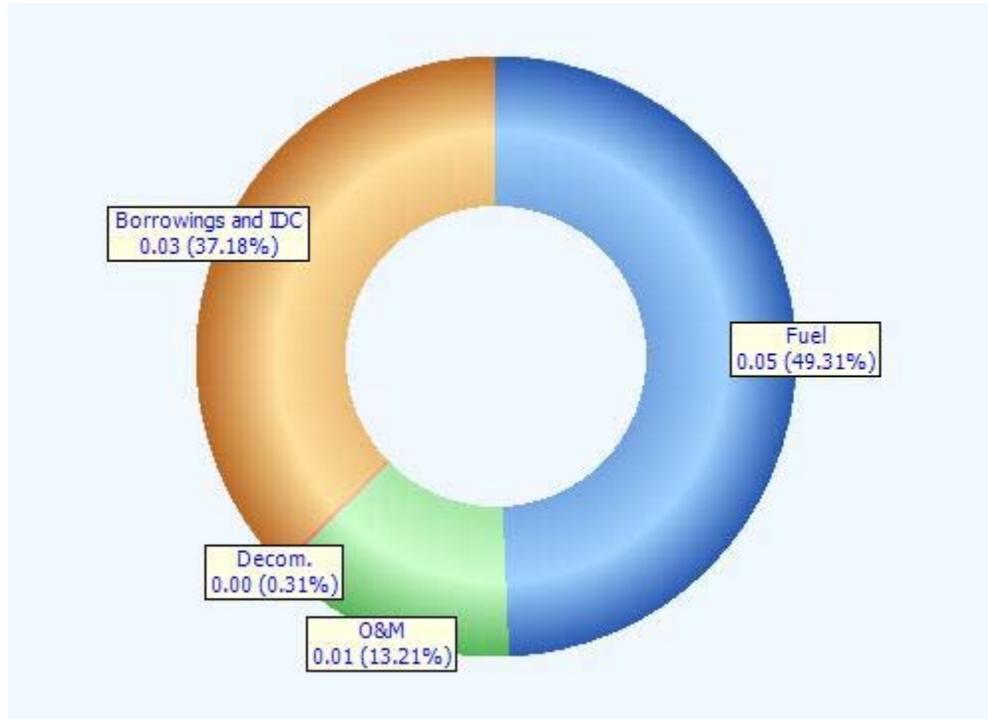


Fig. 4.5 Costo desglosado de la planta nuclear para el *Segundo caso*.

En este caso la aportación de la planta nuclear es de: $9.39E-02$ USD/kg. La Tabla 6 muestra un desglose de los componentes que se toman en cuenta para la aportación económica de la planta nuclear. En la Fig. 4.6 se puede ver que igual que para el caso anterior todo el costo es por parte de O&M.

Tabla 6. Desglose de la aportación de la planta nuclear para el *Segundo caso*.

Costo de Componentes	USD/Kg	Porcentaje
Combustible	0.05	49.31
O&M	0.01	13.21
Desmantelamiento	$2.87E-04$	0.31
Regreso de equidad	0	0
Prestamos y IDC	0.03	37.18
Remodelación	0	0
Consumibles	0	0

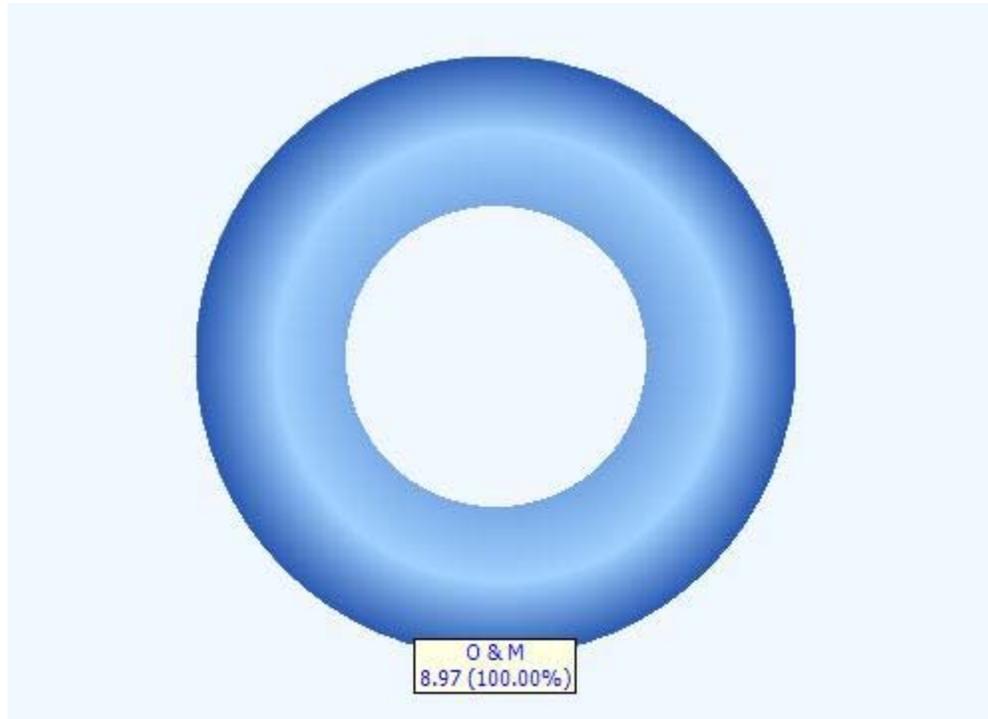


Fig. 4.6 Costo desglosado de la planta de hidrógeno para el *Segundo caso*.

Tabla 7. Desglose de la aportación de la planta de hidrógeno para el *Segundo caso*.

Costo de Componentes	USD/kg	Porcentaje
O&M	8.97	100
Desmantelamiento	0	0
Regreso de equidad	0	0
Prestamos y IDC	0	0
Remodelación	0	0
Consumibles	0	0

En este caso la aportación de la planta de hidrógeno es de: 8.97 USD/kg.

La Tabla 7 nos muestra igual que en el caso anterior que la aportación de la planta de hidrógeno es debido a O&M.

Tercer Caso: Este caso es exactamente al caso 2, sólo que esta vez la planta nuclear generará electricidad para satisfacer las necesidades energéticas de la planta de hidrógeno. El programa HEEP calcula el costo nivelado de la energía térmica de la planta nuclear y de la electricidad que ésta genera de forma automática. Como la energía térmica que requiere la cantidad de hidrógeno que se va a producir es baja (50MWth) se divide entre las 4 unidades que hay en la planta nuclear (12.5MWth) y la energía restante se utiliza para producir electricidad (253.2MWe por unidad) suponiendo que los reactores tienen una eficiencia del 48% por ser de alta temperatura.

Para el cálculo de la energía térmica que requiere la electrólisis y la cantidad de energía eléctrica que se va a producir por cada reactor, se utilizan las siguientes fórmulas [5]:

Para la energía térmica requerida se asume que la capacidad calorífica del hidrógeno es de 142 [MJ/KG]. Por lo tanto tenemos que:

$$PTH2 = \frac{Ga_{H2} * F.C_{PH2} * F.D_{PH2} * 142}{3600 * 8760 * Ef_{PH2}} - \frac{Erp_{PH2}}{0.4} \quad (4.2)$$

Donde:

Ga_{H2} : Generación anual de hidrógeno en Kg.

$F.C_{PH2}$: Factor de capacidad de la planta de hidrógeno expresado en fracción.

$F.D_{PH2}$: Factor de disponibilidad de la planta de hidrógeno.

Ef_{PH2} : Eficiencia de la planta de hidrógeno expresado en fracción.

Erp_{PH2} : Máxima potencia requerida para la producción de hidrógeno en MWe.

El producto de 3600 [s/h] y 8760 [h/año] nos da 3153600 [s/año].

Para la electricidad generada por cada reactor, se tiene la siguiente fórmula:

$$E = (C_r - Pt_{H2}) * Ef_{PN} \quad (4.3)$$

Donde:

C_r : Capacidad del reactor afectado por el factor de capacidad en MW.

Pt_{H2} : Potencia térmica del reactor destinada a la planta de hidrógeno MW.

Ef_{PN} : La eficiencia del reactor expresado en fracción.

Se puede ver en la Fig. 4.7 que la aportación de la planta de hidrógeno disminuyó bastante y aumentó la aportación de la planta nuclear. Como la energía eléctrica ahora es suministrada por la planta nuclear los costos aumentan debido a que ahora el costo de mantenimiento aumenta, puesto que ahora se debe dar mantenimiento a las turbinas que generan la electricidad para la planta de hidrógeno.

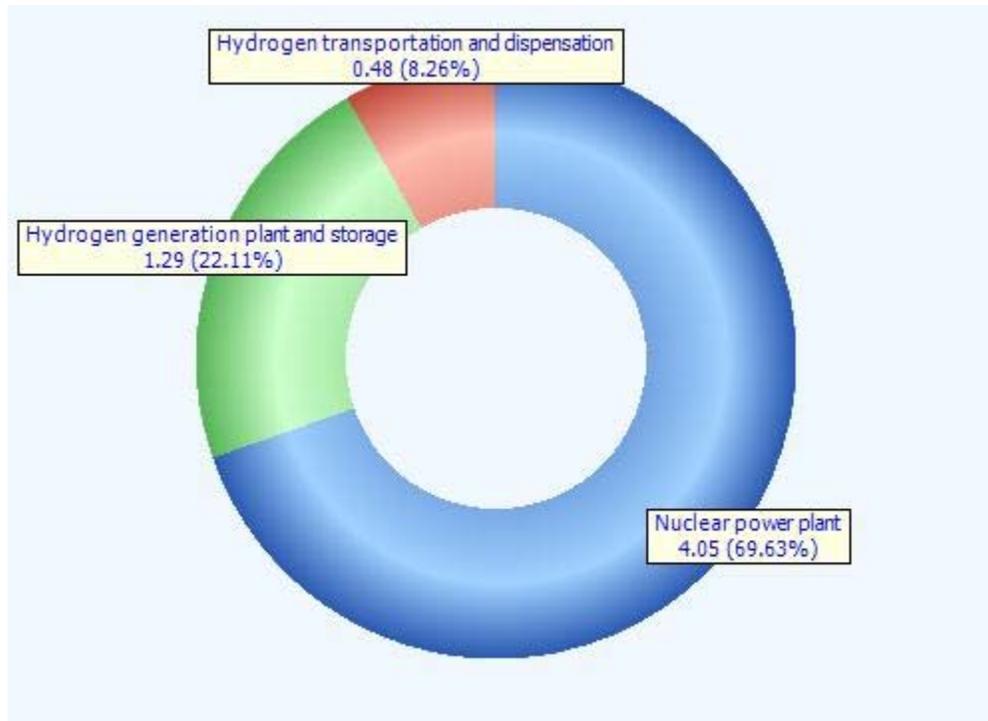


Fig. 4.7 Costo nivelado de Energía unitaria de producción de hidrógeno para el *Tercer caso*.

En este caso el costo total por kilogramo de hidrógeno producido es de: 5.82USD/kg

La Tabla 8 nos muestra la aportación de todos los elementos en el costo total del hidrógeno para el caso 3.

Tabla 8. Aportación en el costo por parte de la planta nuclear, planta de hidrógeno y transporte para el *Tercer caso*.

Costo de Componentes	USD/Kg	Porcentaje
Planta nuclear	4.05	69.63
Planta de hidrógeno y almacenamiento	1.28	22.11
Transporte del hidrógeno y distribución	0.48	8.26

En la Fig. 4.8 la gráfica muestra casi exactamente las mismas proporciones que en los otros casos, pero ahora la aportación de O&M aumento por la generación de energía eléctrica, como se había comentado en la Fig. 5.7.

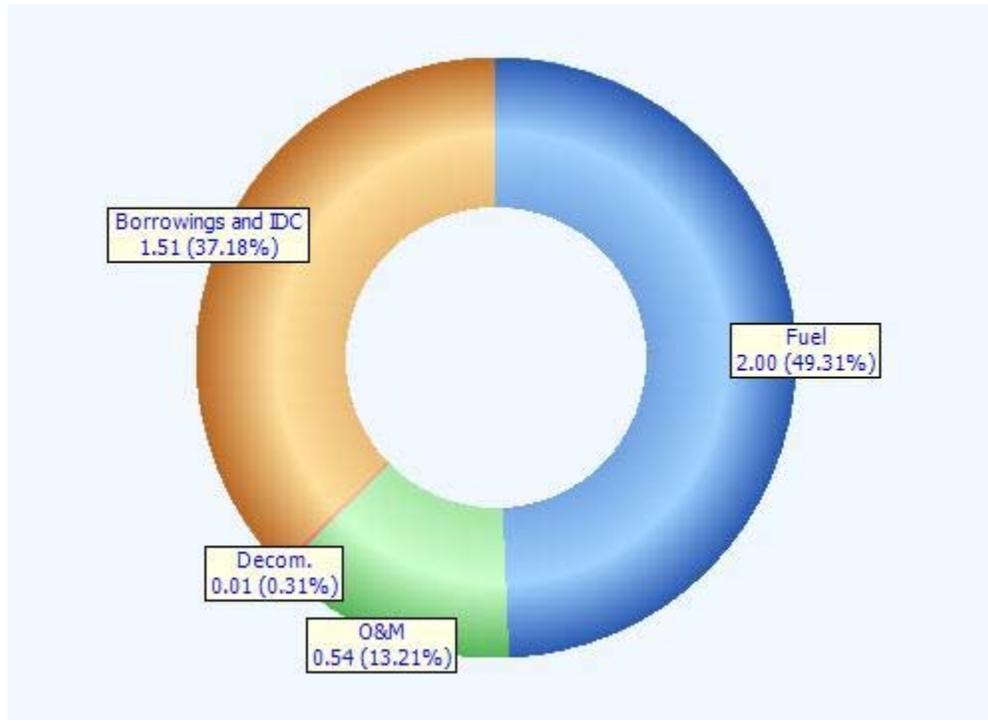


Fig. 4.8 Costo desglosado de la planta nuclear para el *Tercer caso*.

En este caso la aportación de la planta nuclear es de: 4.05 USD/kg.

La Tabla 9 muestra un desglose de los componentes que se toman en cuenta para la aportación económica de la planta nuclear.

Tabla 9. Desglose de la aportación de la planta nuclear para el *Tercer caso*.

Costo de Componentes	USD/Kg	Porcentaje
Combustible	2.00	49.31
O&M	0.54	13.21
Desmantelamiento	0.01	0.31
Regreso de equidad	0	0
Prestamos y IDC	1.51	37.18
Remodelación	0	0
Consumibles	0	0

En la Fig. 4.9 se puede apreciar que de igual manera todo el costo es por parte de O&M.

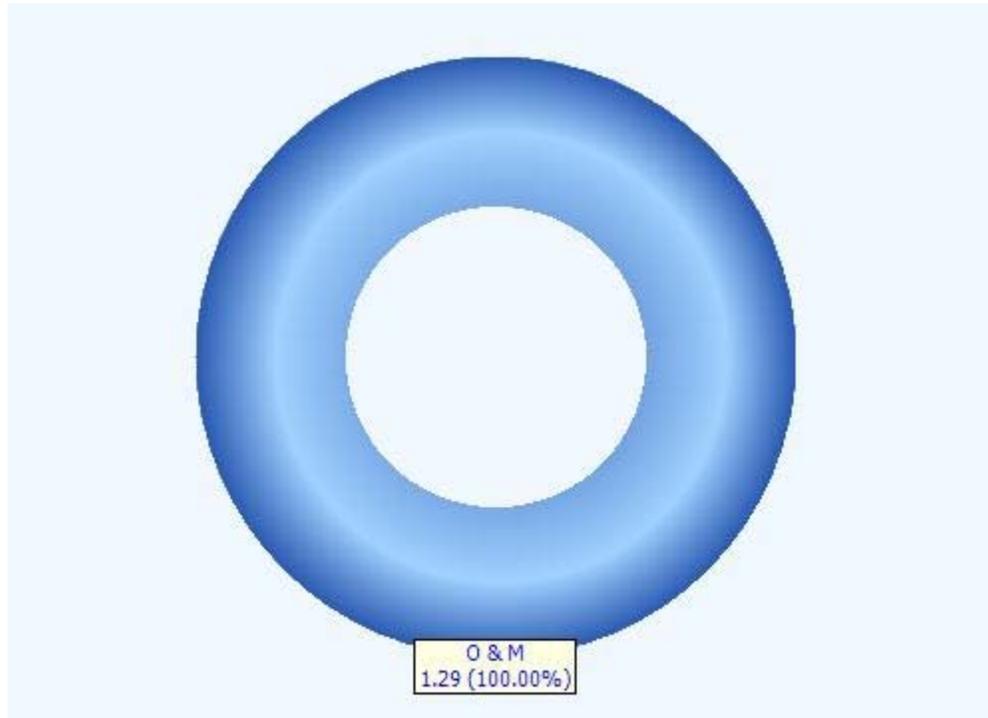


Fig. 4.9 Costo desglosado de la planta de hidrógeno para el *Tercer caso*.

En este caso la aportación de la planta de hidrógeno es de: 1.29 USD/kg.

La Tabla 10 muestra que la aportación de la planta de hidrógeno al costo del hidrógeno producido es por concepto de O&M.

Tabla 10. Desglose de la aportación de la planta de hidrógeno para el *Tercer caso*.

Costo de Componentes	USD/kg	Porcentaje
O&M	1.29	100
Desmantelamiento	0	0
Regreso de equidad	0	0
Prestamos y IDC	0	0
Remodelación	0	0
Consumibles	0	0

Análisis de sensibilidad

De los casos anteriores se puede ver que los factores importantes en la producción de hidrógeno con el proceso de HTE son: a) La cantidad de hidrógeno a producir, b) la electricidad requerida en el proceso y c) la energía térmica requerida, todos relacionados entre sí. Por esta razón se variarán esos datos utilizando como base el tercer caso, debido a que es el más real en cuanto al concepto general de una planta de producción de hidrógeno acoplada a una planta nuclear. La energía térmica depende directamente de la cantidad de hidrógeno a producir y la energía eléctrica de proceso, por lo que HEEP la calcula directamente.

Producción de Hidrógeno: El primer dato que se variará será la cantidad anual de producción de hidrógeno. Se tomarán 4 valores para realizar una tabla y ver cuál es la relación de la potencia total requerida en el proceso. La potencia eléctrica de proceso se deja constante e igual a 264 MWe. En este caso se consideró una eficiencia termodinámica de la planta nuclear para la conversión de energía térmica a eléctrica de 48%.

Tabla 11. Variación de la producción anual de hidrógeno

Producción anual de hidrógeno (ton)	Potencia térmica (MWth)	Potencia eléctrica de proceso (Mwe)	Potencia térmica Total(T+E) MWth
216000	1285	264	1835
180000	961	264	1511
100000	241	264	791
78840	50	264	600

De la Tabla 11 podemos observar que mientras la cantidad de producción anual de hidrógeno disminuye y la potencia eléctrica de proceso se deja constante, la potencia térmica requerida disminuye linealmente y la potencia total requerida en unidades térmicas también decrece linealmente. Por lo que la capacidad de la planta nuclear con cuatro unidades estaría muy sobrada.

Potencia Eléctrica de Proceso: En este caso se variará la potencia eléctrica de proceso y se mantendrán los otros datos fijos. Se tomarán los 264MWe como el dato más grande y se tomarán otros tres datos que sean menores a éste.

La Tabla 12 nos da una perspectiva del caso 3, que al variar la potencia eléctrica de proceso se ve que claramente el caso original es el óptimo, puesto que se tiene un costo de producción de hidrógeno mucho menor. En esta tabla la producción de hidrógeno es la misma e igual a 78,840ton y la potencia térmica equivalente a la potencia eléctrica no requerida para el proceso es 1,700 MWth.

De la Tabla 12 podemos ver que el caso base sigue siendo el más barato, dado a que la potencia térmica requerida para la producción es muy baja. También se observa que aunque se disminuya la potencia eléctrica para el proceso y aumente considerablemente la potencia térmica para el proceso, el impacto que tiene en el costo de los demás casos no es muy grande, sin embargo, sí resulta ser mayor al caso base.

Tabla 12. Comparación del costo nivelado variando la potencia eléctrica de proceso.

Potencia eléctrica de proceso (Mwe)	Potencia térmica (MWth)	Potencia térmica Total(T+E) MWth	Potencia TOTAL MWth	Producción Kg H2/ MWThH	Costo nivelado total (USD/Kg)
264	50	600	2300	3.90	5.823092
215	172	619.91	2319.91	3.87	5.861693
166	295	640.83	2340.83	3.84	5.900533
113	428	663.41	2363.41	3.80	5.943358

En la Fig. 4.10 se ve la variación que existe entre la potencia eléctrica de proceso contra el costo nivelado total. Con el aumento de la potencia eléctrica de proceso, el costo nivelado total disminuye.

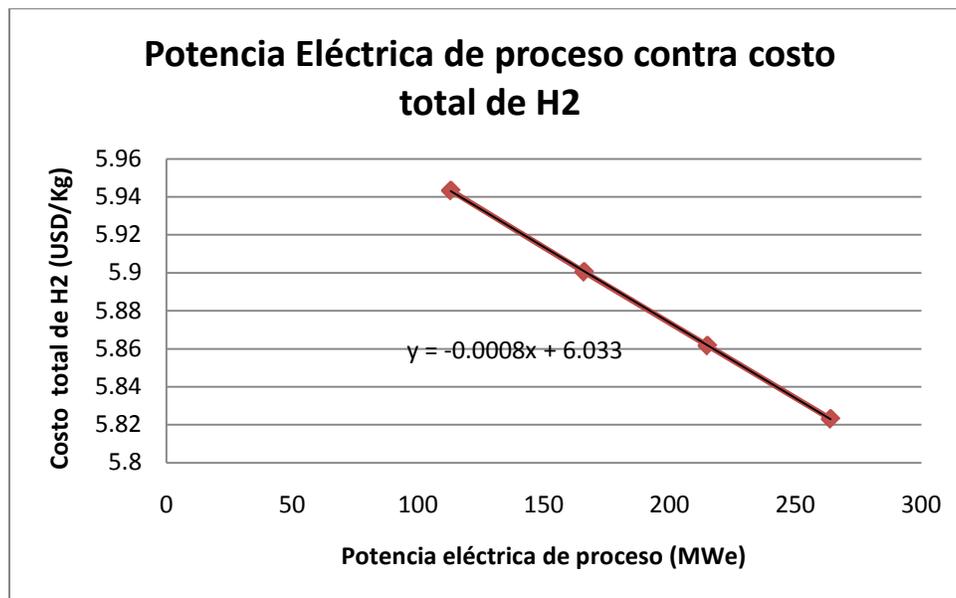


Fig. 4.10 Energía eléctrica de proceso contra costo nivelado total

En la Fig. 4.11 se puede ver la variación de la potencia total respecto a la potencia eléctrica requerida para el proceso, dejando constante la producción de hidrógeno.

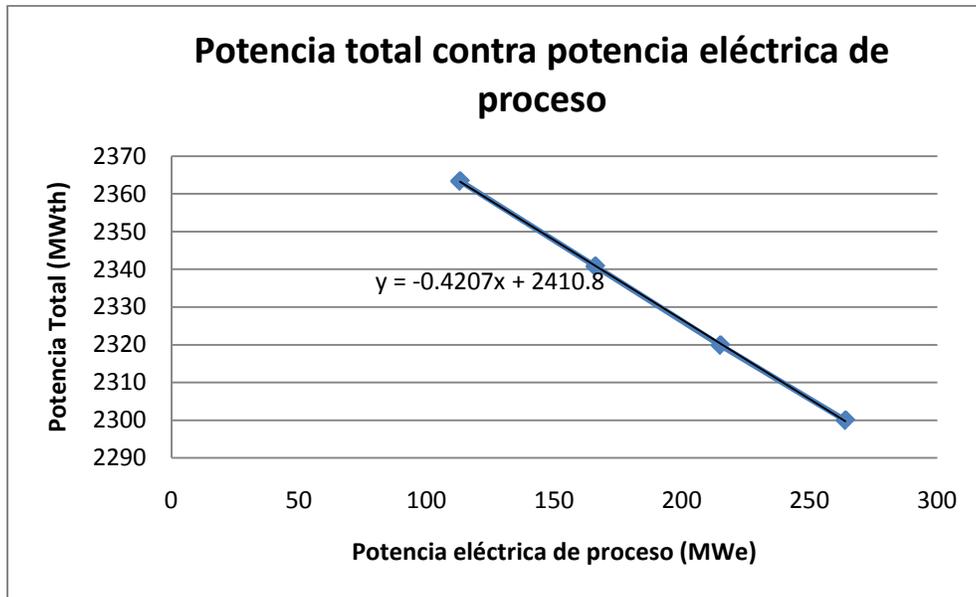


Fig. 4.11 Potencia total contra la potencia eléctrica requerida para el proceso, dejando constante la producción de hidrógeno.

En la Fig. 4.12 se muestra una gráfica de la eficiencia total del proceso de conversión de energía térmica a hidrógeno. La gráfica nos muestra las distintas eficiencias para distintos reactores y diferentes ciclos termodinámicos. Para el caso del GT-MHR se tiene una eficiencia un poco mayor a 45% que corresponde a 750°C. En general a mayor temperatura, mayor la eficiencia.

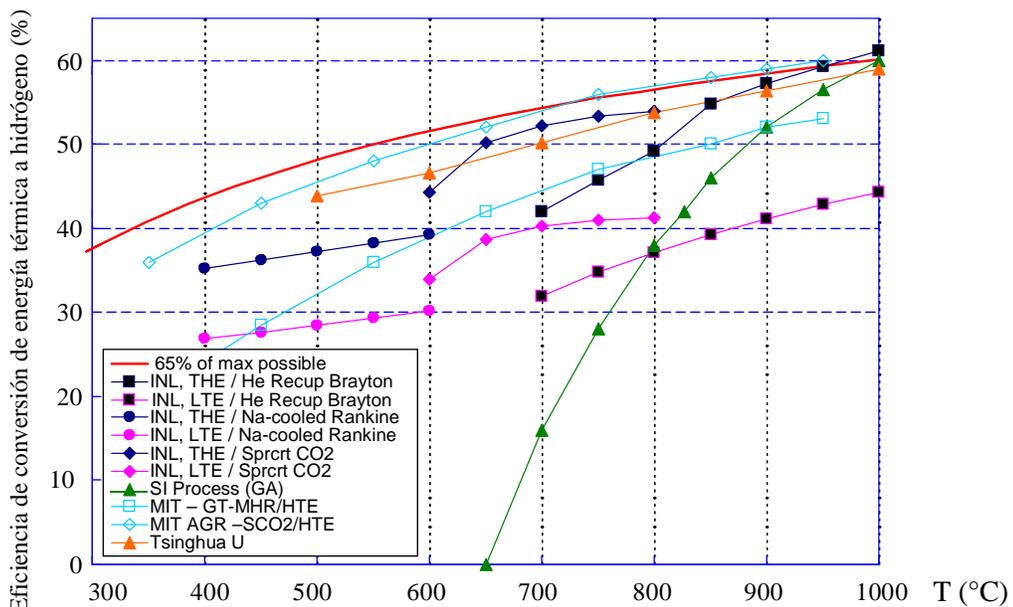


Fig. 4.12 Eficiencias de conversión de energía térmica a hidrógeno respecto a la temperatura [6].

En la Fig. 4.13 podemos observar la demanda de energía en la electrólisis de alta temperatura, lo importante de la gráfica es que muestra que el proceso es realmente efectivo cuando el agua se encuentra en estado gaseoso y se observa que con el aumento de temperatura la energía eléctrica disminuye y la demanda de calor aumenta, teniendo así una energía total casi constante.

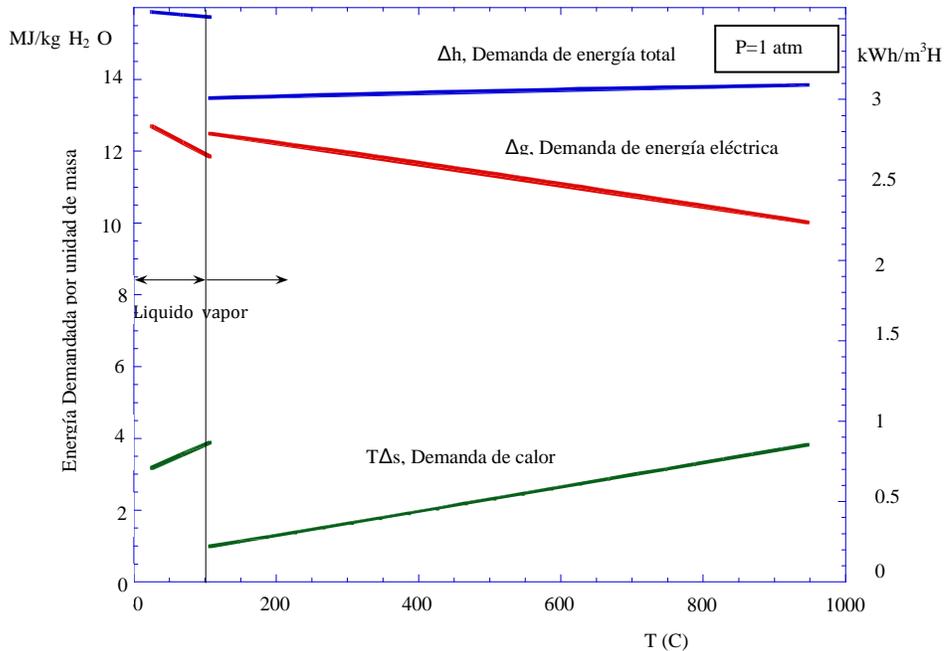


Fig. 4.13 Requerimientos totales de energía para la electrólisis de alta temperatura [7].

Tasa de Descuento

Tomando en cuenta el caso 3, el cual es el caso más real, se realizarán variaciones a la tasa de descuento. Una tasa de descuento del 5% se tomó como base para realizar las distintas simulaciones de los casos propuestos. Se tomó otra tasa de descuento del 7.5%, la cual es utilizada por la *Royal Academy of Engineering* en su modelo financiero para evaluación de proyectos de inversión. Una tasa de descuento del 12% también se tomó en cuenta debido a que los proyectos de inversión, llevados a cabo por CFE, utilizan esa tasa de descuento.

La Fig. 4.14 nos muestra la aportación de la planta nuclear y la planta de hidrógeno al costo nivelado total de producción de hidrógeno. La mayor aportación se puede ver en la planta nuclear y la planta de hidrógeno se mantiene casi constante. La mayor aportación por parte de la planta nuclear quizá sea debido a que son 4 unidades, es decir, 4 reactores; mientras que la planta de hidrógeno sólo es 1 unidad generadora de hidrógeno.

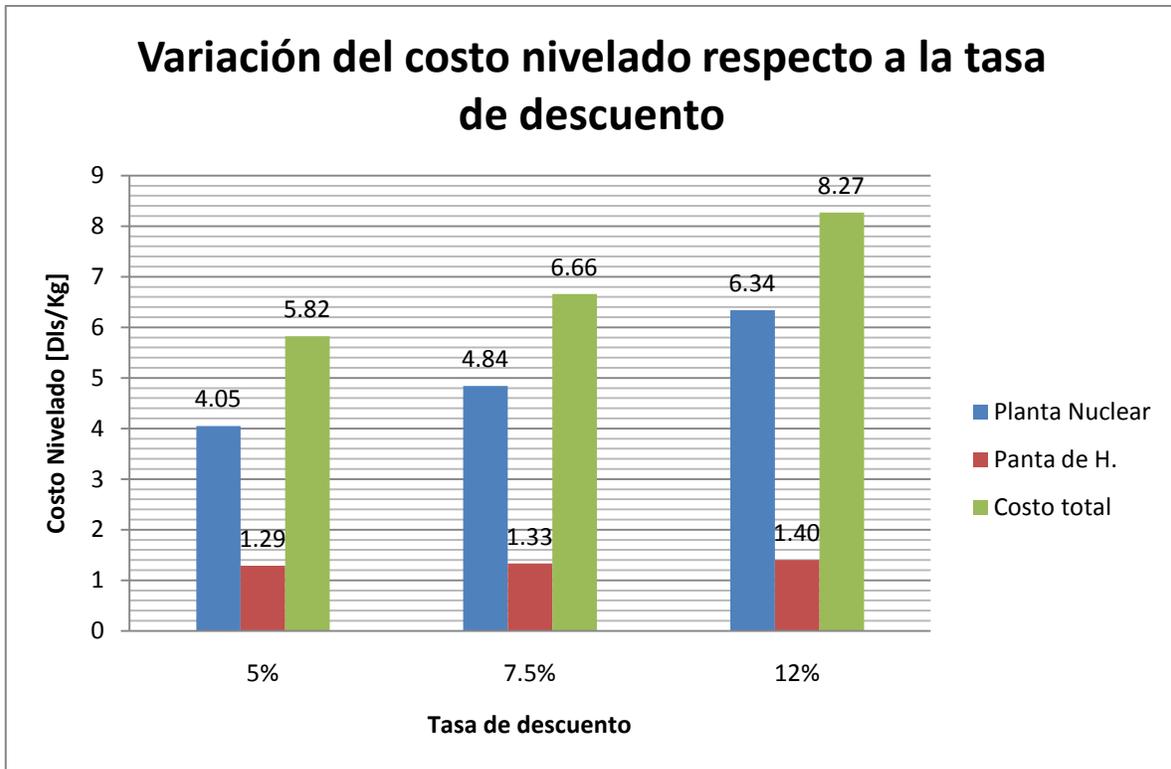


Fig. 4.14 Variación del costo nivelado respecto a la tasa de descuento.

En el trabajo de I. Khamis y U.D. Malshe presentado en el International Journal of Hydrogen Energy [2], se presenta los resultados de sus simulaciones con distintos costos y distintos reactores nucleares, distinto índice de producción anual de hidrógeno, y una tasa de descuento del 5% para el proceso SI. Se simularon 4 casos de los cuales el costo nivelado total más alto y más bajo fueron 5.07 [Dls/Kg] y 6.02[Dls/Kg] respectivamente.

Se puede ver entonces que el proceso de HTSE es un proceso viable y competitivo con el proceso SI puesto que como podemos ver de la Fig. 4.14 con una tasa de descuento del 5%, se tiene un costo nivelado total de 5.82 [Dls/Kg] lo cual se encuentra entre los valores reportados en el trabajo de I. Khamis y U.D. Malshe.