

Impacto del Costo del Combustible en el Costo de Generación Eléctrica por Medios Nucleares

J. Ramón Ramírez Gustavo Alonso, Ma del Carmen Gómez, Javier Palacios H.
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Carretera México-Toluca Km. 36.5
jrrs@nuclear.inin.mx; galonso@nuclear.inin.mx, fgrivera@avantel.net,
palacios@nuclear.inin.mx.

Resumen

En años recientes, el costo del uranio se ha incrementado en el mercado internacional debido a un sinnúmero de factores como son: aumento de la demanda, el repunte de la energía nuclear en algunos países asiáticos, la disminución de la oferta debido a problemas en la minería para su extracción, etc. Estos incrementos impactan los costos de generación eléctrica en el concepto de combustible, en el presente trabajo se calcula de que orden es el impacto esperado cuando los costos del uranio y los servicios del ciclo de combustible se incrementan a la rapidez que se han venido incrementando, y se postula un aumento mas allá de los 100usd/Lb U₃O₈, calculandose también su impacto en el costo total de generación eléctrica por medios nucleares.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de finales del 2003, el Uranio ha experimentado incrementos de precio sin precedentes en el mercado internacional, después de mantenerse en un precio estable durante varios años. Historicamente los costos más bajos para el uranio se alcanzaron a finales del 2000, donde el uranio tuvo costos de hasta 7 usd/lb U₃O₈, manteniendose con incrementos muy ligeros hasta mediados del 2003 en donde comenzo a incrementar su precio continuamente, alcanzando hoy en día precios de hasta 113 usd/lbU₃O₈ en el mercado internacional. Las razones para estos incrementos inusitados en los precios del uranio son muchas, entre ellas se argumenta que la demanda es mucho mayor que la oferta, escasez en la producción debido a múltiples causas como son huelgas de trabajadores, inundación de alguna mina grande en el Canada, maniobras especulativas de inversionistas, carestía general de los energéticos, etc. El caso es que el costo del uranio repercute directamente en el costo del ciclo de combustible de los reactores nucleares, y en consecuencia, en el costo total de generación de electricidad por medios nucleares. En años recientes, debido principalmente al incremento en los costos de los combustibles fósiles, la energía eléctrica generada por medios nucleares comenzó a ser más competitiva que la generada con las plantas tradicionales de ciclo combinado y carbón, sin embargo es necesario evaluar cual es la situación actual considerando los ahora altos costos del combustible nuclear.

2. CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

El ciclo de combustible nuclear, consiste de todas las actividades relacionadas con la minería del uranio, fabricación del combustible, irradiación, y disposición del combustible gastado, cualquiera que sea la forma de disponer del mismo. Para precisar más en las diferentes etapas del ciclo de combustible, se ha dividido en tres etapas principales, la primera comúnmente llamada la parte frontal del ciclo, abarca desde la extracción del uranio, hasta la fabricación completa del combustible nuclear. La segunda etapa consiste básicamente de la irradiación del combustible en el reactor para el que fue diseñado, hasta que se descarga y se deposita en las albercas de combustible gastado. La tercera etapa consiste de todas las operaciones relacionadas con el manejo y disposición del combustible gastado, hasta su disposición final o su total reprocesamiento. Estas actividades conforman a su vez dos diferentes tipos de ciclo de combustible, el llamado ciclo directo y el llamado ciclo cerrado.

2.1. Ciclo Directo de Combustible Nuclear

Los ciclos de combustible nuclear en su primera etapa o parte frontal del ciclo, tienen exactamente las mismas actividades y operaciones de proceso para obtener el combustible que será insertado en los reactores. En la segunda etapa o irradiación los ciclos de combustible también son muy similares, Las diferencias básicas se encuentran en la tercera etapa del ciclo, dependiendo de que política se haya adoptado para el ciclo de combustible a conveniencia de los intereses económicos y nacionales al respecto.

Entonces, el ciclo directo contempla en su tercera etapa la disposición final del combustible, esto es: después de la etapa de irradiación, el combustible se descarga y se almacena en las albercas de combustible gastado, en las cuales permanecerá por periodos determinados de tiempo en el cual se espera que la actividad radiactiva y la generación de calor hayan disminuido a niveles aceptables para su manejo, este periodo es de alrededor de 7 años y se le denomina comúnmente como periodo de enfriamiento. Después de este periodo, el combustible puede permanecer por más tiempo en las albercas o ser retirado de ellas para iniciar el proceso de acondicionamiento previo a su almacenamiento final en algún repositorio geológico. Es claro que esta opción en el ciclo directo de combustible, requiere que cuando el combustible sea retirado deben existir: una política definida de ciclo de combustible, instalaciones para el acondicionamiento del combustible y personal especializado para el manejo de las operaciones de la instalación, un repositorio geológico para el almacenamiento definitivo del combustible y los contenedores y transportes adecuados para el traslado de los combustibles.

2.2. Ciclo Cerrado del Combustible Nuclear

En el ciclo cerrado de combustible nuclear, los combustibles se almacenan en las albercas de combustible gastado, y se dejan allí por el periodo de enfriamiento establecido, después son retirados de las albercas y trasladados a las instalaciones de reprocesamiento en donde se recuperan el uranio y el plutonio. Los actínidos menores y productos de fisión permanecen en los desechos de alto nivel del reprocesamiento, entonces el uranio y plutonio pueden ser reutilizados en la fabricación de combustible MOX y los desechos tratados y acondicionados para su

almacenamiento final en algún repositorio geológico. El combustible MOX es entonces insertado en los reactores de potencia para la generación de energía, cerrando de esta manera el ciclo de combustible, es de notarse que aún reprocesando el combustible gastado y reutilizando el uranio recuperado en el reprocesamiento, será necesario la disposición final del combustible MOX fabricado con los materiales recuperados en el reprocesamiento, solo que de la cantidad original de combustible gastado ahora tenemos solo del orden del 20%, de aquí, se estima que es posible conseguir una reducción sustancial de la cantidad de desechos de alto nivel si se reprocessa el combustible.

3. COSTOS ASOCIADOS AL COMBUSTIBLE

3.1. Parte Frontal del Ciclo

El primer paso en el ciclo de combustible es la extracción del uranio de las minas, en donde se recupera en forma de óxidos complejos y se reduce a la forma comúnmente llamada Torta amarilla o U_3O_8 el cual posteriormente se convierte a UF_6 (hexafluoruro de uranio), para ser alimentado a la planta de enriquecimiento. En estas partes del proceso es común el comprar el uranio en el mercado internacional a un costo por libra del compuesto U_3O_8 y los servicios de conversión a UF_6 a un costo por kg. de uranio contenido en el material.

Enriquecimiento del uranio, existen dos procesos comerciales para el enriquecimiento isotópico del uranio: La difusión gaseosa y la centrifugación gaseosa, en ambos el material que se alimenta al proceso es el UF_6 en forma gaseosa para al final del proceso obtener como producto UF_6 enriquecido. El grado de enriquecimiento dependerá de cuantas etapas de separación fueron aplicadas al material y estos servicios de separación se cotizan en Unidades de trabajo separativo con un costo determinado por cada una de ellas. Una vez que se tiene el UF_6 enriquecido se convierte a UO_2 (dióxido de uranio) con el cual se fabrican pastillas cilíndricas que son sinterizadas e introducidas a los tubos de zircaloy para posteriormente armar los ensambles de combustible.

Los costos de la parte frontal del ciclo conforme se cotizan en el mercado internacional en marzo del 2007, se desglosan en la Tabla I:

Tabla I Costo del Uranio y servicios del ciclo de combustible

		Costo
Torta Amarilla	U_3O_8	85 USD/Lb
Conversión	U_3O_8 a UF_6	11.5 USD/KgU
Hexafluoruro de Uranio	UF_6	207 USD/KgU
Enriquecimiento	SWU	140 USD/Kg
Fabricación		275 USD/KgU

3.2. Irradiación del Combustible

Una vez insertado el combustible en el núcleo del reactor, este permanecerá ahí por varios ciclos hasta que alcance el quemado programado. En esta parte es importante que el quemado del

combustible sea el máximo posible, ya que una vez que el combustible ha sido adquirido por un costo, el costo de este es independientemente del quemado obtenido de él, esto es entre más energía se obtiene del combustible más se reduce el costo por concepto de combustible de la energía generada. Para reactores BWR el quemado típico en ciclos de 18 meses es del orden de los 44000 MWd/tU.

3.3. Parte Final del Ciclo

La parte final del ciclo comienza cuando el combustible es descargado del reactor y se almacena en las albercas de combustible gastado, ahí permanecerá por un periodo recomendable de por lo menos 6 años antes de que sus niveles de radiación hayan disminuido a niveles aceptables para su manejo, si existe un repositorio geológico en donde se almacene el combustible, entonces se traslada a las instalaciones de acondicionamiento previo al almacenamiento definitivo en el repositorio. De otra manera el combustible permanecerá en las albercas de combustible gastado del reactor hasta que se decida que hacer con él, ya que actualmente existen varias alternativas. Sin embargo, para la disposición final del combustible gastado, los costos supuestos para evaluar esta opción se dan en la Tabla II,[1].

Tabla II Costos para disposición directa de combustible gastado

Almacenamiento Interino	40 USD\$/Kg HM
Transporte	50 USD\$/Kg HM
Acondicionamiento	230 USD\$/Kg HM
Disposition Final	610 USD\$/Kg HM

Una de las alternativas viables, y en etapa comercial para disponer del combustible gastado es el reprocesamiento, esto es después del periodo de enfriamiento el combustible se traslada a instalaciones de reprocesado de combustible, en donde es disuelto en ácido nítrico y posteriormente se separan, uranio, plutonio y productos de fisión que permanecen en la solución. El plutonio extraído en el reprocesamiento es entonces utilizado en la fabricación de combustible de óxidos mixtos (MOX) y reinsertado en el reactor, el uranio recuperado puede ser almacenado por tiempo indefinido sin mayores problemas o puede ser utilizado como matriz en la fabricación del combustible de óxidos mixtos. Los productos de fisión restantes se acondicionan y finalmente se vitrifican para ser almacenados en forma definitiva en algún repositorio geológico. Los costos supuestos para esta opción se muestran en la Tabla III.

Tabla III Costos asignados a diferentes servicios para reciclado

Almacenamiento	40 USD\$/Kg HM
Transporte	50 USD\$/Kg HM
Reprocesamiento	1000 USD\$/Kg HM
Desechos de alto nivel	300 USD\$/Kg HM
Fabricación de MOX	1500 USD\$/Kg HM

4. CALCULO DE LOS COSTOS DEL CICLO

4.1 Costo del Combustible

Ecuaciones utilizadas

$$F = P + W$$

$$FX_f = PX_p + WX_w$$

En donde :

F = Cantidad de material alimentado al proceso de enriquecimiento kg U

P = Cantidad de producto requerido kg. U

W = Cantidad de colas del proceso kg U

X_p = Concentración de ²³⁵U en el producto (uranio enriquecido)

X_f = Concentración de ²³⁵U en el uranio natural (Valor fijo = 0.71%)

X_w = Concentración de ²³⁵U en las colas de proceso.

De las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$F/P = (X_p - X_w)/(X_f - X_w)$$

La ecuación que determina la cantidad de unidades de trabajo separativo (SWUs), para un enriquecimiento deseado es la siguiente:

$$SWU = P V(X_p) + W V(X_w) - F V(X_f)$$

En donde V(Xi) = es el potencial de separación, y está definido por:

$$V(Xi) = (2Xi-1) \text{Ln} (Xi/(1 - Xi))$$

En donde:Xi = X_p, X_w, ó X_f conforme se requiera.

4.2 Energía obtenida

La energía que se obtendrá de una cantidad especificada de combustible, está relacionada con el contenido de metal pesado del combustible y el quemado del mismo, basta multiplicar el quemado del combustible por la cantidad de metal pesado para obtener la energía térmica generada. Si se requiere cuantificar la energía en términos de la electricidad producida, se deberá multiplicar el producto anterior por la eficiencia del ciclo termodinámico de la central, esto es:

Tabla IV Variables del cálculo de energía.

	$E_e = Q \cdot HM \cdot \eta$	Unidades
E _e	Energía eléctrica producida	KWhe
Q	Quemado del combustible	MWd/tU
HM	Cantidad de metal pesado	Kg

η	Eficiencia del ciclo	-
--------	----------------------	---

Utilizando el esquema anterior, es simple calcular la cantidad de electricidad producida por una tonelada métrica de metal pesado (en este caso U al 3.7%) con un quemado de 40 000 MWd/tU

$$E_e = 40\ 000\ \text{MWd/tU} * 24\ \text{h/d} * 1000\ \text{KW/MW} * 1\ \text{tU} * 0.34 = 3.264 \times 10^8\ \text{Kwhe}$$

4.3 Costo de la parte final del ciclo

En el costo de la parte final del ciclo, se consideran los costos relacionados con el almacenamiento del combustible desde que es descargado del reactor, los costos de transporte al almacenamiento interino o a la planta de acondicionamiento, los costos del reprocesamiento y manufactura de combustible MOX para el caso del ciclo cerrado de combustible, los costos del acondicionamiento de los desechos radiactivos, y el costo del repositorio geológico en donde se hará la disposición final de desechos. Todos esos costos se calculan en forma directa conociendo la cantidad de metal pesado existente en el combustible y multiplicando por un precio para cada uno de los conceptos o servicios relacionados con esta parte del ciclo, los precios para estas operaciones, son en buena parte estimados de la información disponible en la literatura especializada, ya que algunos de ellos son considerados confidenciales por las compañías dedicadas a estos servicios. Algunos de ellos se reportan en las tablas II y III en la sección 3 de este trabajo.[1]

5. COSTO UNITARIO DEL COMBUSTIBLE

En años recientes, el costo del uranio se ha incrementado de forma continua, en particular a partir del 2003 hasta hoy en día. La Figura 1. muestra la evolución de los precios para el uranio y servicios relacionados con la conversión y trabajo separativo en los últimos años[2].

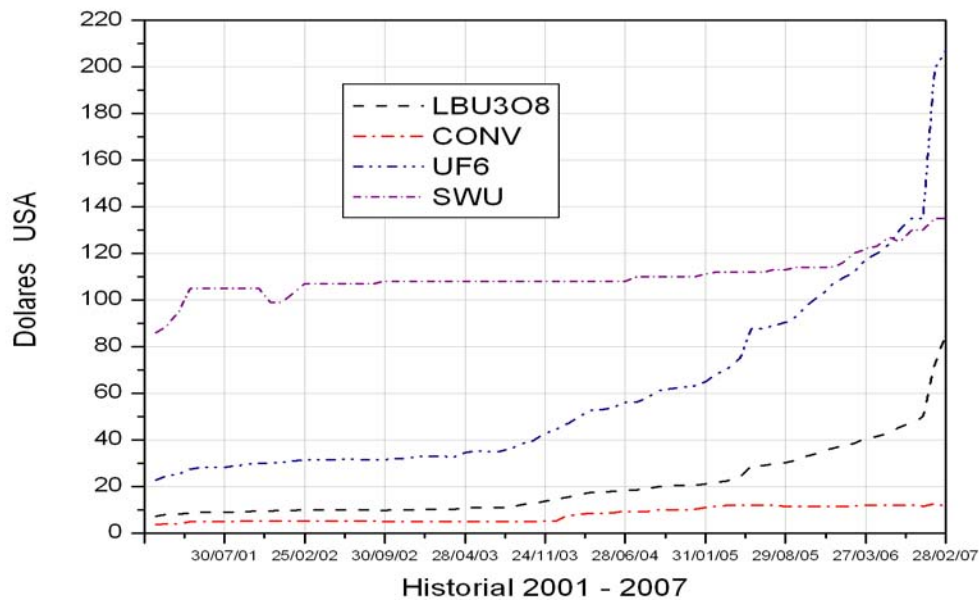


Figura 1 Evolución de los costos de uranio y servicios del ciclo de combustible

Utilizando la metodología establecida en la sección 4 se calcularon los costos de la componente de combustible para diferentes precios del uranio conforme se han reportado en los últimos años y para un escenario de incrementos del orden de los 120 usd/lb U₃O₈, los resultados se muestran en la tabla V.

Tabla V Cálculo de la componente de combustible en el costo de generación

Fecha	Torta Amarilla USD/Lb U ₃ O ₈	Uranio USD/Kg U	Conversión USD/Kg U	Enriquecimiento USD/SWU	Costo Total USD/MWhe
29-08-05	30	78	11.5	113	7.0724
26-12-05	35	91	11.5	114	7.1411
27-03-06	40	104	11.5	122	7.7595
26-06-06	45	117	11.5	125	8.0868
27-09-06	50	130	11.5	130	8.4433
30-01-07	72	188	12.5	135	9.7815
14-03-07	85	224	11.5	135	10.5960
30-12-07	*100	*260	*11.5	140*	*11.4251
30-03-08	*120	*312	*11.5	145*	*12.6324

5.1 Costos nivelados de generación.

Los costos nivelados de generación, fueron calculados previamente con los costos de construcción proporcionados por los fabricantes de reactores nucleares para diferentes tecnologías. La Tabla V muestra los resultados obtenidos en estos cálculos[3] para la tecnología ABWR.

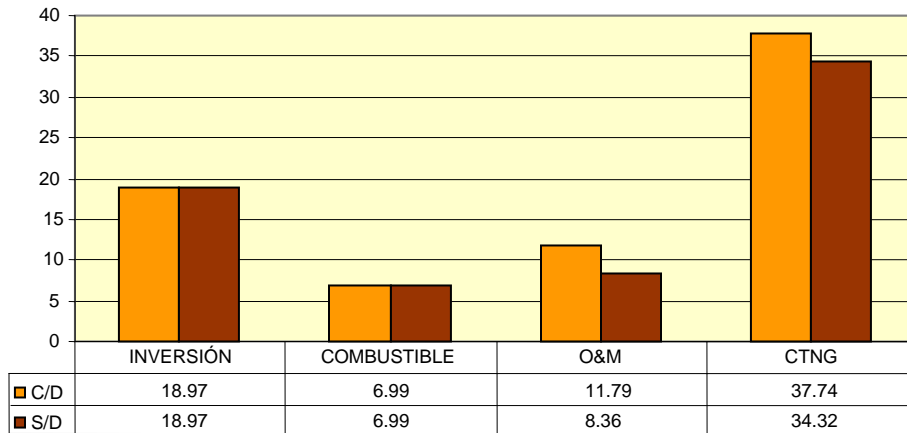


Figura 2. CTNG del Reactor ABWR con y sin Externalidades USD/MWhe

Se observa que el costo por el componente de combustible para el reactor avanzado de agua en ebullición es del orden de los 7 USD/MWhe, esto representa el 18.5% del costo total de generación.

Considerando ahora los incrementos en el costo del uranio se calcula el impacto del incremento en el costo total, para ello se recalcula el costo de generación y se obtiene la diferencia en porcentaje con respecto a un valor en el tiempo, en este caso el costo de 30 usd/lb U₃O₈ que corresponde al mes de agosto del 2005.

Tabla VII Impacto del costo del ciclo en el costo total de generación

Costo del Uranio \$/lb U ₃ O ₈	Costo del Ciclo USD/MWh _e	Incremento %	Costo de Generación USD/MWh _e	Impacto % Incremento
30	7.0724	1.1788	37.8224	0.2183
35	7.1411	2.1616	37.8911	0.4003
40	7.7595	11.0085	38.5095	2.0389
45	8.0868	15.6909	38.8368	2.9062
50	8.4433	20.7911	39.1933	3.8508
72	9.7815	39.9356	40.5315	7.3966
85	10.5960	51.5879	41.3460	9.5548
*100	*11.4251	*63.4492	*42.1751	*11.7517
*120	*12.6324	*80.7210	*43.3824	*14.9507

De los resultados, tenemos que a un costo de 120 USD/Lb U₃O₈ el incremento en el costo total de generación es del 15%, considerando que la referencia es de solo 0.25 del escenario de precios supuesto, se observa que el costo de la generación eléctrica por medios nucleares es poco sensible al costo del combustible.

Graficando los resultados obtenemos la tendencia del impacto en el costo de la generación con el incremento en los costos del uranio. Esto se muestra en la Figura 3.

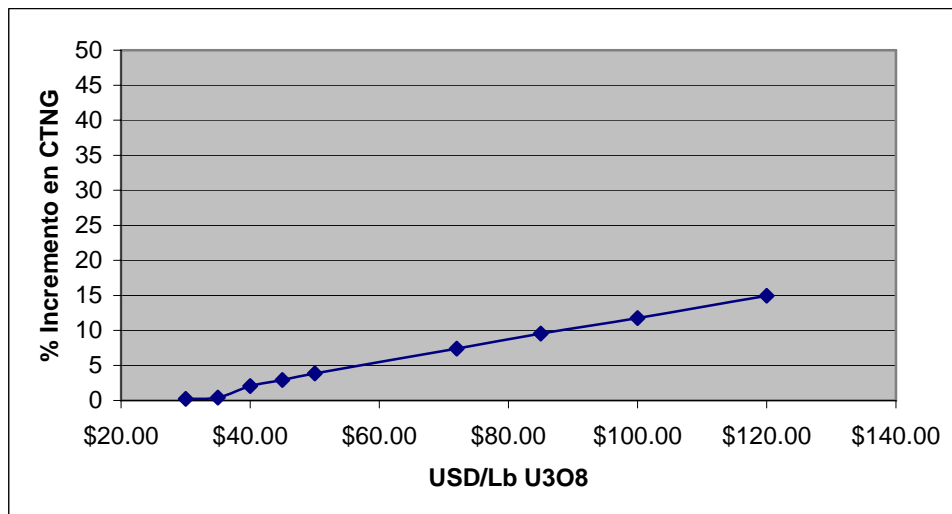


Figura 3. Impacto del costo del uranio en el costo total de generación

6 CONCLUSIONES

El impacto de un incremento en los costos en los precios del uranio del orden de 4 veces el costo de referencia, es del 15 % del costo total de generación. Esto debido a la baja sensibilidad de la generación eléctrica por medios nucleares al incremento en el costo del combustible.

REFERENCIAS

1. Neil E. Todreas, Northeastern ANS Symposium on Economics in the Nuclear Industry, Albany N.Y. March, 2006.
2. The Uranium Market Outlook, Quarterly Market Report, October 2006.
3. Costo Total Nivelado de Generación Eléctrica Empleando los Reactores Nucleares ABR, ACR, AP1000, y EPR, Reporte ININ-GCA/DSN-02-04, Diciembre del 2004