

# **SERIE DE ARTICULOS SOBRE ENERGIA ALTERNATIVA: LA NUCLEAR**

## **ENTREGA N° 4**

### **ASPECTOS ECONOMICOS DE LA GENERACION NUCLEOELECTRICA**

**Diciembre 2009**

**Autor: Ing. Jorge Bertoni**

En este trabajo, presentaremos aspectos cualitativos más que cuantitativos sobre los costos de producción de la energía nucleoelectrónica, tales como la composición de ese costo, cuanto cuesta, en forma relativa, la construcción de centrales eléctricas de distinto tipo y su comparación.

Trataremos de explicar porqué se menciona que la electricidad de origen nuclear, es *competitiva* con otras fuentes de energía, y porqué el uso del uranio contribuye a mantener a lo largo del tiempo, el costo de generación del KWh a pesar de las variaciones del precio del combustible.

Dado que las centrales eléctricas son proyectos complejos cuya realización lleva varios años, y este artículo no versa sobre economía, creemos conveniente mencionar que para el cálculo económico de proyectos como éstos, el método más utilizado es el "*Método del Mínimo Valor Actual Neto*" (Present Worth).

Este método implica estudiar tanto los costos de inversión inicial como aquellos que se sucederán a lo largo de la vida útil de la obra tales como los costos de operación y mantenimiento.

El método calcula el Valor Actual Neto (VAN) que no es más que la suma de costos que implicará la construcción y operación de la obra descontados al año cero (para poder hacerla comparable) a una tasa de interés adecuada.

La obra más económica será, entonces, aquella alternativa cuyo valor actual neto sea mínimo (si hablamos sólo de costos, lo más próximo a cero posible).

Otro método de cálculo económico de grandes obras es el del cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR). Pero eso ya es economía y escapa al tema de este artículo.

### **Integración del costo de generación del KWh:**

Cualquiera sea la central en la que se genera la electricidad, el costo del KWh resulta de dividir el gasto total incurrido en un año (según los valores provistos por ese cálculo), por la energía total generada en ese período. En la terminología usual el resultado se expresa en centavos o milésimas de dólar por KWh. (c/KWh o mills/KWh). La energía eléctrica producida en un año, nos obliga a mencionar el llamado *factor de disponibilidad* de una central. Este no es más que la totalidad de horas en las que la central ha estado generando, referidas a la cantidad de horas totales en un año. (8760 horas)

El personal de operación se esfuerza en forma permanente en alcanzar un factor del 100% lo que indicaría que la central ha generado la máxima energía posible durante ese año. En la práctica ese factor suele variar entre el 85 y el 100%, dependiendo de cuantas paradas ha sufrido la central en el año.

Al comienzo de la operación de las primeras centrales nucleares el factor de disponibilidad era muy bajo (50 o 60 %) debido a paradas imprevistas, originadas por los sistemas de seguridad. La evolución de la tecnología, una mejor formación del

personal de operación con cursos de entrenamiento en simuladores, y el desarrollo de una *cultura de la seguridad*, hicieron posible en las últimas décadas alcanzar niveles muy altos de disponibilidad.

Las centrales con reactores PWR o BWR de uranio enriquecido, tienen que parar obligadamente cada 12 o 18 meses para el recambio de parte del combustible, por un período del orden de entre 20 y 30 días. Esto les impide alcanzar un factor del 100%

Las centrales de uranio natural en cambio, al realizar el abastecimiento de combustible nuevo con el reactor en marcha, solo se ven obligadas a parar para el mantenimiento mecánico de la parte convencional, cada dos años, y es por eso que muchas veces se acercan y alcanzan el factor anual del 100% como los casos de Atucha 1 y Embalse, en Argentina.

Los costos incurridos en el año, corresponden a tres componentes principales:

- El costo de construcción de la central y su amortización.
- El costo del personal de operación y el mantenimiento de la central.
- El costo del combustible utilizado en el año.

La comparación de la estructura del costo para distintos tipos de centrales, permitirá identificar las características particulares de cada una.

## **Comparación entre distintos tipos de Centrales:**

**Centrales hidroeléctricas:** Son las que mayor capital requieren para su instalación. La construcción de un dique, grandes estructuras de hormigón donde alojar las turbinas, el desvío temporal del cauce de agua durante la construcción, y otras actividades difíciles de cuantificar como las mejoras del sistema de riego de las zonas circundantes.

Luego sigue el costo de la operación y el mantenimiento, y por último el costo del combustible, que en este caso es gratis; el agua.

El plazo de construcción es largo, y se requiere mucha anticipación en la programación del proyecto, para asegurar su terminación en el momento en que la energía es necesaria.

**Centrales con Carbón:** Requieren menos capital para su construcción, la operación y el mantenimiento son comparables a los anteriores, pero el costo del combustible que habrá de consumir durante toda su vida útil, es del mismo orden de magnitud que el costo de construcción.

El período de concreción del proyecto es menor que el de una central hidráulica. Sus instalaciones siempre deben contar con extensas playas de almacenamiento del carbón combustible, el que llega por tren o por barco, y en cada caso se requieren las facilidades para su transporte. También para las cenizas producto de la combustión.

**Centrales con Fueloil:** Las consideraciones son similares a las de las centrales con carbón. La única diferencia es que en lugar de playas de almacenamiento para el combustible, tendrán que disponer de tanques, con sus cañerías, válvulas y bombas para el trasiego del fueloil. Los conceptos de capital de instalación, y gastos de operación y mantenimiento son similares a las anteriores.

**Centrales con Gas:** Estas se caracterizan por tener un bajo costo de instalación y corto plazo de construcción, entre dos y tres años, y bajo costo de operación y mantenimiento. En cambio, el costo del combustible, es varias veces superior al de instalación, y al de otros tipos de combustibles.

**Centrales Nucleares:** Se las puede ubicar entre las centrales hidráulicas y las de combustibles fósiles. Requieren importantes capitales para instalarlas, el costo del mantenimiento es comparable al de otras centrales, en cambio el costo de operación es mayor debido al cuidadoso entrenamiento que requiere el personal.

El costo del combustible es mucho menor que para las centrales de combustibles fósiles.

El tiempo de construcción de por sí largo, incluye el tiempo necesario para obtener la licencia, tanto de construcción como de operación. Requieren también una muy anticipada programación del proyecto.

En la figura siguiente hemos tratado de sintetizar los conceptos cualitativos hasta aquí señalados. Es información de IAEA del año 2006.

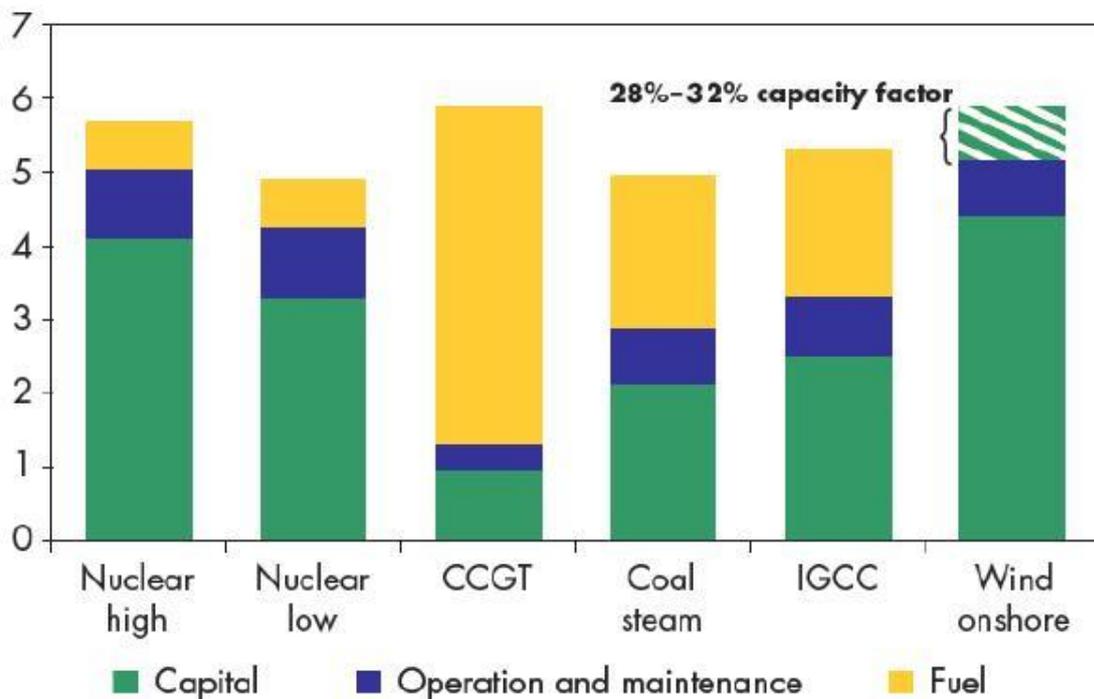
Si observamos los porcentajes del costo del combustible, en el costo de producción del KWh, vemos que son:

- Nuclear: 13%
- Carbón: 42%
- Gas: 76%

El bajo costo del combustible en las centrales nucleares, hace que éstas operen siempre como centrales de carga base, es decir las 24 horas del día.

Esta característica contribuye a reducir el costo promedio de producción del KWh, en un sistema eléctrico que cuente con varios proveedores y que es administrado y optimizado por lo que se denomina un *despacho unificado de carga*.

En el gráfico siguiente, la altura total de cada uno de los rectángulos, representa el costo por KWh, para cada tipo de central, y es el resultado de la suma de los tres conceptos señalados. La escala de las ordenadas está en centavos de U\$S/KWh.



Autor: IAEA World Energy Outlook 2006 (Paris: International Energy Agency) fig. 13.7

**Costo comparativo de generación eléctrica (centavos de U\$/KWe).**

Nuclear high (alta)	-----	costo de instalación 2500 U\$/KWe
Nuclear low (baja)	-----	costo de instalación 2000 U\$/KWe
CCGT	-----	Ciclo Combinado Turbina de Gas
Coal steam	-----	Térmica con carbón.
IGCC	-----	Ciclo Combinado gasificación integrada.
Wind onshore	-----	Parque Eólico en tierra

La figura anterior, aunque se muestra con criterio cualitativo mas que cuantitativo, dado que los valores varían con el lugar y con el tiempo, muestra tres cosas con claridad: 1.-El costo total del KWh (orden de magnitud) para distintos combustibles usados. 2.- La diferencia del componente capital para distintos tipos de central. 3.-La baja proporción en la composición del costo, del combustible nuclear

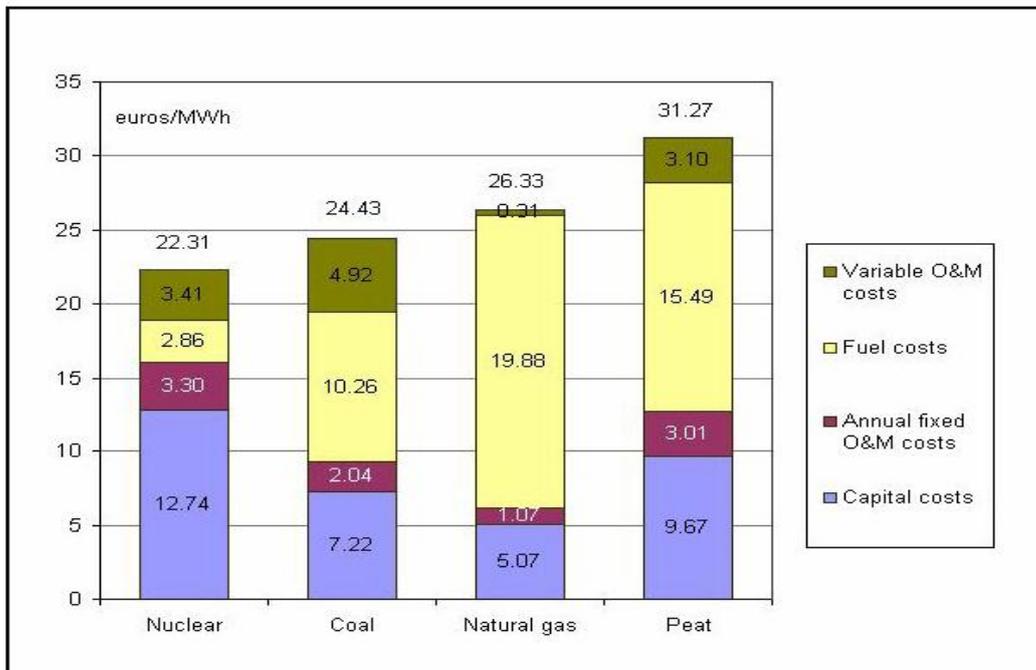
El costo de producción del KWh según los gráficos es del orden de 50 mills/KWh. Esto también fundamenta lo dicho respecto a que el costo de la electricidad de origen nuclear, es económicamente competitiva con otras fuentes de energía.

La baja proporción del costo del combustible nuclear en el costo de producción del KWh, lo independiza a este último de las variaciones del costo del uranio. Si se agrega a ello el hecho de que las recargas en los reactores (tipo PWR) se hacen cada 12 o 18 meses, se asegura la estabilidad del costo del KWh en el largo plazo.

El costo de los combustibles fósiles es más susceptible a las variaciones del mercado que el uranio, y por lo tanto tiene mayor influencia directa en el costo final del KWh.

Para ejemplificarlo, consideremos hipotéticamente una duplicación en el costo de los combustibles uranio y gas, y veamos el aumento respectivo del KWh.

Tomando como referencia los datos del gráfico siguiente, en el caso del uranio el aumento del KWh sería del 9% y en el caso del gas, si se duplicara su costo sería del 75%.



Autor: Risto Tarjane y Scoli Rissane.  
Comparación de costos estimados de generación eléctrica de base en Finlandia.

### Costo de generación del KWh con distintos combustibles.

Componentes:

- ❖ Costos variables de operación y mantenimiento
- ❖ Costos del combustible
- ❖ Costos de operación y mantenimiento fijos anuales
- ❖ Costos de capital

Equivalencias 1 Euro = 1,50 U\$S - Coal: carbón - Peat: Turba

Este último gráfico se incluye como complemento del anterior, y corresponde a un estudio realizado en Finlandia para determinar la energía eléctrica de base más conveniente.

Vemos la similitud entre ambos gráficos, y aquí también se vuelve a verificar el concepto de *competitividad económica* de la energía nuclear.

Para complementar los datos sobre costos comparativos de instalación de distintos tipos de centrales, en el orden internacional, se incluyen los que aparecen en el informe del OIEA, (Nuclear Technology Review, 2002) publicado en julio del 2002.

En esta tabla, se indican valores para centrales nucleares (tipos PWR y BWR de agua liviana), dos tipos de centrales de carbón (Carbón pulverizado y reducción catalítica), de gas natural (Ciclo combinado) y también de parques eólicos.

Los valores indicados en las columnas son los siguientes:

- Costo de instalación en U\$S/KWe, incluyendo el interés durante la construcción.
- Costo total para una central de 1000 MWe de potencia, en miles de millones de U\$S.
- El período de construcción, en años.
- El tamaño típico de las centrales.
- El costo total si se hubieran comprado “*llave en mano*” en miles de millones de U\$S.
- Costo indicativo de generación en centavos de U\$S/KWe.

	Cost per kW(e) installed \$ <sup>a</sup>	Total cost for 1000 MW capacity (billion \$)	Construction period (years)	Typical plant size	Typical plant turn key costs (billion \$)	Indicative generating costs <sup>b</sup> (c/kW·h)
Nuclear LWR	2 100–3 100	2.1–3.1	6–8	600–1 750	1.5–4.2	4.9–6.8
Nuclear, best practice	1 700–2 100	1.7–2.1	4–6	800–1 000	1.3–2.1	4.0–4.7
Coal, pulverized, ESP	1 000–1 300	1.0–1.3	3–5	400–1 000	0.5–1.3	3.2–4.5
Coal, FGD, ESP, SCR	1 300–2 500	1.3–2.5	4–5	400–1 000	0.6–2.5	3.6–6.3
Natural gas CCGT	450–900	0.45–0.9	1.5–3	250–750	0.2–0.6	2.6–4.8
Wind farm	900–1 900	0.9–1.9	0.4	20–100	0.03–0.12	3.5–9.2

Costos de instalación de centrales eléctricas y costos indicativos de generación del KWh.

Autor IAEA Nuclear Technology review – julio 2002.

Obtener datos más recientes se hace difícil, dado el receso de la actividad de la industria nuclear en el mundo y los contados proyectos que se están ejecutando en la actualidad.

El costo de instalación de las centrales nucleares, ya se ha dicho, está fuertemente influenciado por las condiciones locales de donde se construye, y por el proceso de obtención de los permisos de construcción y de operación de la central. En los reactores de uranio natural, la provisión inicial de agua pesada también incide fuertemente.

Los costos de operación y mantenimiento de las centrales nucleares, incluyen el costo de su desmantelamiento (*decommissioning*) al final de la vida útil.

Esto consiste en el desarmado completo de toda la central, el almacenamiento de todos sus componentes, aún los radiactivos, en depósitos seguros, y retornar el terreno donde la central estaba situada, a su estado original, es decir antes de que se construyera.

## **Demanda y producción de uranio en el mundo:**

En 2007, la OIEA publicó un documento titulado Red Book 2007. En él se sintetiza la situación del uranio en el orden internacional, del que ahora extraemos la siguiente información.

435 reactores nucleares, totalizaban una potencia eléctrica de 370 GWe, y consumían 66500 toneladas de uranio por año. (153 Ton/reactor.año).

La producción de uranio en ese año, fue de 39.603 toneladas, siendo los principales productores: Australia, Canadá, Kazakhstan, Nigeria, USA, Ucrania, Africa del Sur y China.

La diferencia entre lo producido y lo consumido, fue provisto por fuentes secundarias, principalmente por el material fisionable proveniente del desmantelamiento de las armas nucleares, en particular de Rusia. Esta fuente ya se está agotando.

Las reservas de uranio aseguradas en todo el mundo, con un precio de extracción menor de 130 U\$/kg, son de 5,5 millones de toneladas.

Hay además un total de reservas estimadas en todo el mundo, del orden de 10,5 millones de toneladas.

El precio del uranio en junio de 2009 fue de 59 U\$/libra de  $U_3O_8$ , con ligera tendencia al alza. Se considera que el precio del uranio seguirá esta tendencia, pero más que por el crecimiento de la demanda, por las inversiones necesarias para iniciar la explotación minera de los yacimientos ya identificados y de esa forma satisfacer la totalidad de las necesidades.

.El costo del ciclo completo del combustible nuclear, para un reactor PWR con ciclo cerrado, podría subdividirse de la siguiente manera:

- |                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| • Compra del uranio natural        | 22 a 28 %       |
| • Transformación en $UF_6$         | 2,5             |
| • Enriquecimiento en $^{235}U$     | 32 a 35         |
| • Fabricación y transporte         | 12 a 15         |
| • Reprocesamiento y almacenamiento | 30 a 40         |
| • Recuperación de $^{235}U$ y Pu   | <u>-8 a -12</u> |

**TOTAL** 100 %

En el caso de utilizar uranio natural, desaparecen los costos del enriquecimiento y el reprocesamiento.

La economía de la energía nuclear tiene ventajas cuando se analiza la economía del ciclo de combustible a largo plazo. Y en el caso de Atucha I, ese proceso de

optimización para reducir el costo de generación del KWh fundamentó el cambio del uranio natural por el ULE (uranio levemente enriquecido al 0,85 %)

Mucho dependerá de las políticas para combustibles de cada país y en las expectativas de sus costos futuros. Algunos países han adoptado el ciclo abierto, sin reprocesamiento, en el que el combustible usado en las centrales nucleares se acondiciona y almacena definitivamente. Este es el caso de los países que tienen centrales nucleares que usan uranio natural o levemente enriquecido, como Argentina. Otros países han adoptado el ciclo cerrado, en el que el combustible usado es tratado químicamente para recuperar el plutonio y el uranio 235 no quemado, para reciclarlos en futuros combustibles para reactores. (denominados MOX).

En el mercado internacional, solo Francia e Inglaterra ofrecen el servicio de reprocesamiento de combustible usado.

Si se comparan los costos de los dos tipos de ciclo de combustible, el abierto y el cerrado, resulta una ventaja de 10% para el ciclo cerrado, con reprocesamiento. Esta diferencia no significativa, puede muy bien ser compensada por consideraciones de índole estratégica en cada país.

Ya se ha dicho que en el caso de los reactores que usan uranio natural, esa disyuntiva no aparece, y el combustible utilizado se almacena definitivamente.

## **Costos futuros:**

Hemos visto que el componente del capital para construir una central nuclear es el mayor factor que determina el costo de generación del KWh. Hay que agregarle además los intereses intercalares, es decir los que se pagan durante **la construcción de la central, tiempo que suele ser de entre 5 y 7 años**, y a veces más. En los reactores con uranio natural hay que agregar también el monto inicial del agua pesada, que es importante.

El costo financiero puede así, llegar a representar hasta el 30% del costo total de la central.

Las técnicas más modernas para reducir los costos de instalación de centrales nucleares, incluyen una importante reducción del tiempo de construcción, diseños técnicos que reducen el número de componentes, como caños, válvulas y bombas de recirculación de fluidos, y nuevas técnicas de fabricación, con premontaje de sistemas en fábrica.

Los costos de operación y mantenimiento también pueden reducirse mediante economías de escala, es decir cuando hay varias centrales emplazadas en un mismo sitio. Esto ofrece la ventaja de almacenes de repuestos comunes, y también los servicios de operación y mantenimiento comunes a varias unidades.

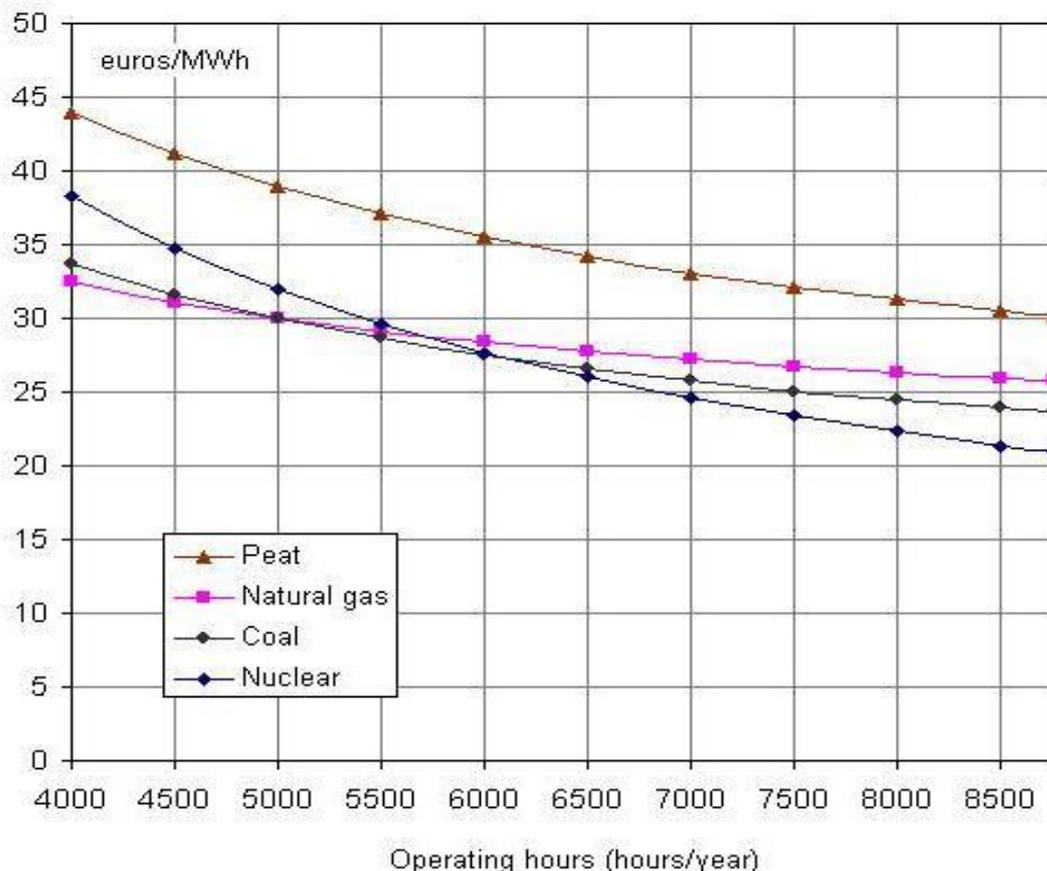
La extensión de la vida útil de las centrales en operación, es otra forma de mejorar la economía de las mismas. Este es un concepto de actualidad ya que varias de las primeras instaladas en el mundo habrán de llegar próximamente al final de su vida útil proyectada.

La experiencia indica que estas centrales llegan al final en mejores condiciones técnicas que las estimadas originalmente y dado su gran valor residual, las autoridades regulatorias otorgan extensiones de las licencias de operación de entre 10 y 20 años, después de un cuidadoso análisis de la historia operativa, caso por caso, a veces con el requisito de realizar algunos trabajos de poca monta.

**Cuando la comunidad internacional que trata el problema del cambio climático, acepte la energía nuclear como energía limpia, que no produce gases de efecto invernadero, ésta comenzará a recibir crédito por ser no contaminante, lo que también repercutirá favorablemente en su economía.**

Y para terminar, incluiremos un gráfico donde se observa la variación del costo de generación en función de las horas de operación en un año para distintos

combustibles, como resultado de un análisis de sensibilidad, incluido en el estudio realizado en Finlandia.



#### Costo de generación del KWh en función del factor de disponibilidad

Autor: Risto Tarjane y Scoli Risanne, Comparativa de costos estimados de generación eléctrica de base en Finlandia. (Peat=Tuba, Coal=Carbón)

El gráfico indica que para un factor de disponibilidad mayor de 68% (6000 horas por año) el costo de la energía nuclear es el más bajo, respecto a otras formas de generación. (1 euro = 1,50 U\$S)

### Información económica reciente:

En octubre de 2009, la empresa Electronuclear de Brasil, hizo una presentación ante el Senado Federal de aquel país, describiendo el plan nuclear para instalar varias centrales nucleares. El informe incluyó también datos referidos a la construcción de Angra 3, la tercera central nuclear brasileña. (Proyecto en ejecución).

Esta tendrá una potencia eléctrica de 1350 Mwe, y será una réplica de Angra 2, ya en funcionamiento.

El primer hormigón será vertido en la obra en diciembre de 2009, y la puesta en operación de la central está prevista para mayo de 2015.

La inversión total del proyecto está estimada en 3.700 millones de U\$S.

Estos datos indican un costo de instalación de 2.740 U\$S/Kwe.

El informe también indica un costo de generación previsto de 64 U\$S/MWh, (64 mills/KWh).