

ECONOMIA DE CENTRALES NUCLEARES

Por: Ing. Béla José Csik

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
Resumen.	1
Economía de centrales nucleares	2
1 - Costo de Instalación	3
2 - Costo de Materiales.	4
3 - Industria Nuclear Complementaria	5/6
4 - Financiación	7
5 - Cargas Anuales del Capital Invertido	8
6 - Costo de la Energía Eléctrica Producida.	9
7 - Incidencia de las Cargas del Capital	10
8 - Incidencia del Costo de Combustible.	11
9 - Operación y Mantenimiento.	12
10 - Inventario de Combustible.	13
11 - Crédito de Plutonio y Uranio	14
12 - Comperación de costos de Producción de la Energía <u>E</u> léctrica	15
13 - Conclusiones	16/17

- - - o o - - -

La única finalidad que puede tener la instalación de centrales nucleares en la República Argentina, es la producción de energía eléctrica. Como tal, debe cumplirse que el costo de la energía eléctrica producida en centrales nucleares, debe ser competitivo con lo producido en centrales térmicas convencionales.

La conveniencia económica de un tipo de reactor frente a otros tipos es un factor importante, que incide en la elección definitiva del tipo a instalarse, pero no es el único factor que debe considerarse. Existen también factores de orden técnico e inclusive político.

Se analizan las centrales nucleares desde el punto de vista económico, estudiando cada factor que incide en el costo de producción de la energía eléctrica en forma separada.

El costo de instalación, factor importante, depende de la potencia de la central, tipo de reactor y grado de desarrollo al cual se ha llegado. Es mayor que el de las centrales térmicas convencionales.

Se analizan los costos de los materiales utilizados en reactores nucleares, la industria nuclear complementaria, su eventual conveniencia económica, y las posibilidades y condiciones probables de financiación de las centrales nucleares.

El costo del kWh producido, factor que determina la posibilidad o conveniencia económica de las centrales nucleares, queda determinado por las cargas de capital, costo de combustible, gastos de operación y mantenimiento, cargas sobre el inventario de combustible, y crédito de uranio y plutonio.

Al final del trabajo, se estiman y se comparan los costos del kWh producido entre diferentes tipos de reactores y una central térmica convencional equivalente.

Se llega a la conclusión de que para 1960 el costo del kWh nuclear es, con algunos reactores, del mismo orden y, con otros, ligeramente superior al costo del kWh convencional.

La misma comparación para 1975 deja un saldo más favorable para las centrales nucleares. La razón principal es que se pueden esperar mejoras sustanciales en la industria nuclear con el correspondiente abaratamiento.

El tipo de reactor más conveniente para la República Argentina, desde el punto de vista económico resulta ser el que utiliza uranio natural como combustible y agua pesada como moderador.

La conclusión final del trabajo es que las centrales nucleares son económicamente competitivas con las centrales térmicas convencionales.

ECONOMIA DE CENTRALES NUCLEARES

La finalidad que se persigue en las centrales nucleares que eventualmente se instalarán en la República Argentina, debe ser la producción de energía eléctrica. No se considera aplicable, justificable o provechosa en las condiciones actuales, la instalación de ninguna central nuclear en nuestro país, cuya finalidad sea otra. Ya sea ésta la producción de plutonio, aplicaciones militares, como por ejemplo provisión con energía de puestos militares ubicados en lugares de difícil acceso, aplicaciones de propulsión nuclear, etc.

Aceptando esta premisa, se debe cumplir que las centrales nucleares Argentinas produzcan energía eléctrica a un precio competitivo con lo producido en centrales térmicas convencionales.

En el presente trabajo, se hace una comparación económica entre diferentes tipos de reactores. Es cierto que la conveniencia económica es un factor muy importante al elegir el tipo de reactor que eventualmente se instalará, pero es necesario tener en cuenta que no es el único factor. Existen también factores de orden técnico e inclusive de orden político que no pueden ser ignorados.

Seguidamente se analizarán las centrales nucleares desde el punto de vista económico, basándose en cifras reales actuales en lo posible y estimando donde sea necesario. Todos los datos se darán en dólares y en mills respectivamente, por razones de comodidad y para evitar posibles reajustes necesarios. (1.000 mills = 1 U\$S).--

1 - Costo de instalación

El costo de instalación de centrales nucleares presenta una inversión de un capital considerable, e incide fuertemente en el costo de la energía eléctrica producida.

Los datos reales disponibles por cierto, no son muchos, pero son suficientes para realizar estimaciones aceptables. De la lista (Tabla 1) se ve que hay una cantidad apreciable de reactores de potencia en operación o en construcción.

Los tres factores principales que influyen en el costo del kW instalado, son:

- a) - La potencia total de la central (GRAFICO 1)
- b) - El tipo de reactor (GRAFICO 2) - ("Tabla 2")
- c) - El grado de desarrollo al cual se ha llegado (GRAFICO 3)

El costo de instalación de reactores de potencia, llega a tener valores aceptables solamente para centrales cuya potencia es superior a los 100 MWe. Para centrales de menor potencia el costo del kW instalado aumenta rápidamente. Entre 100 y 300 MWe la variación no es grande. Se tomará 150 MWe para las consideraciones y cálculos que siguen.

El costo de instalación de ciertos tipos de reactores, es menor que el de otros, pero hay que recordar que el costo de instalación no es el único factor que determina el costo de la energía producida, ni el único factor que determina la elección del tipo de reactor.

Se acepta generalmente que el costo de instalación de centrales nucleares disminuirá en el futuro. La causa principal es que se va perfeccionando el diseño de los reactores, aumenta el rendimiento, disminuye el costo de los componentes y, al acumularse experiencia operativa se podrán reducir las excesivas medidas de seguridad que se toman actualmente. No hay ninguna razón para suponer que en la industria nuclear no se seguirá la misma tendencia que se ha observado en las demás industrias.

Las diferentes partes de la central nuclear inciden en el costo total en mayor o menor grado. (TABLA Nº3). El ítem de mayor importancia, es el reactor y, es justamente en el reactor, donde mediante un desarrollo y mejoras futuras se puede esperar una importante reducción de costos de instalación.

Se incluyen en el costo de instalación los intereses durante el tiempo de construcción de la central que son 3-4 años.

2 - Costo de materiales

Los materiales utilizados en reactores tienen que cumplir con ciertos requisitos nucleares, aparte de los requisitos mecánicos, físicos y químicos. Este hecho obliga muchas veces a emplear materiales de costo elevado.

El costo elevado es generalmente consecuencia de los procesos de obtención, purificación, maquinado, etc. que se emplean.

En la TABLA Nº 4, se da una lista de precios de algunos materiales importantes empleados en reactores nucleares. Estos materiales pueden ser combustible, moderador, refrigerador, de control o estructurales.

Los precios citados son precios actuales, pero es necesario tener en cuenta aquí, que todavía no son precios estables. Durante los pocos años desde que existe la industria nuclear, los costos de todos estos materiales sin excepción, han sufrido rebajas más o menos importantes. En algunos casos el costo actual no es más que la cuarta parte de lo que fué hace apenas 5-6 años.

Los métodos de producción todavía no están lo suficientemente perfeccionados, mientras que existe una creciente demanda. Es razonable suponer que la tendencia de abaratamiento se mantendrá en el próximo futuro.

Se incluye en este ítem la fabricación de los elementos de combustible. Los procesos utilizados y los materiales empleados para la envoltura dependen del tipo del reactor. No están todavía definitivamente establecidos y hay importantes trabajos de investigación y perfeccionamiento en progreso. En la TABLA Nº 5, se dan los costos de fabricación actuales de algunos tipos principales de elementos de combustibles, utilizados en reactores de potencia. El único tipo de reactor de potencia para el que no hay que fabricar elementos de combustible, es el homogéneo.

3 - Industria nuclear complementaria

Llevar adelante un plan de desarrollo nuclear no significa únicamente la instalación de centrales nucleares. Significa también la creación de una industria capaz de enfrentarse con los problemas específicos que involucra la construcción, operación, mantenimiento y provisión con las materias primas necesarias, de dichas centrales.

Los capitales a invertirse en ciertas industrias nucleares llegan a ser de tal magnitud, que pueden llegar a influenciar no solamente la elección del tipo de reactor, sino también todo el plan de desarrollo nuclear.

Como regla general se puede aceptar que es conveniente basarse en lo posible en lo nacional, e importar solamente lo absolutamente indispensable, ya sea eso mano de obra, técnicos, materias primas o productos elaborados.

- a) Investigación. Un plan de desarrollo nuclear no es realizable sin investigación científica. El país ha comprendido esto y ha creado la Comisión Nacional de Energía Atómica. Se han gastado muchos millones de pesos en investigar y formar técnicos.

La investigación debe proseguir; las facilidades existentes deben ser ampliadas para hacerlo posible. En lo que respecta a los técnicos argentinos, indispensables para realizar un plan de desarrollo nuclear argentino, el problema tiene dos partes. Hay que formar los técnicos y hay que retenerlos. La formación de técnicos se ha realizado con pleno éxito hasta ahora. Los técnicos argentinos tienen categoría internacional. Pero, muchos de los técnicos formados se van al extranjero; hay que darles la posibilidad y las condiciones necesarias para que se queden.

Para llevar adelante un programa de investigación, es necesario gastar 300-400 millones m\$n. por año.

- b) Construcción de centrales nucleares. La industria que la realiza o colabora en ella, en su mayor parte no es una industria nuclear especial. Es industria convencional. Su creación o desarrollo no es un problema nuclear, sino un problema general nacional.
- c) Uranio. La exploración y explotación de los yacimientos uraníferos nacionales, no representa una inversión excesivamente grande. Ya hace años que se está haciendo. El capital a invertirse en la producción de uranio para proveer de combustible a las centrales nucleares, no es más de 3-4 dólares/kW instalado. Esto para obtener uranio nuclearmente puro. La planta para fabricar los elementos de combustible representa una inversión de unos 4-5 dólares/kW instalado adicionales. Todo es to tratándose de uranio natural.

El enriquecimiento del uranio es otro problema. Para aumentar la concentración del isótopo U235, hasta un 1-3% de enriquecimiento, comúnmente usado en reactores a combustible enriquecido, se necesitan plantas de enorme tamaño y costo. Solamente pueden ser económicos si se trata de proveer con combustible a centrales nucleares cuya potencia total suma miles de MWe instalados. Su enorme costo, sin contar las dificultades técnicas, hace imposible pensar en la instalación de tales plantas de enriquecimiento en la Argentina en los próximos 10-15 años.

El reprocesamiento de elementos de combustible irradiados, ya sea que se trate de reciclar el combustible, o bien separar el plutonio formado, también representa la instalación de plantas costosas, donde el tamaño mínimo económico es para miles de MWe instalados. En estas condiciones representaría una inversión de 40-70 dólares/kW instalado.

Es más conveniente entonces almacenar o vender el combustible irradiado a países que ya poseen tales plantas de reprocesamiento, hasta que nuestro país posea suficientes centrales nucleares para justificar la instalación de plantas de reprocesamiento.

- d) Moderador, refrigerador. Ni la fabricación de grafito nuclear para uso en reactores, ni la de compuestos orgánicos que pueden servir de moderador y/o refrigerador y que son un subproducto de la industria del petróleo, representa la inversión de capitales excesivamente grandes, ni tienen un tamaño mínimo económico excesivamente grande. Podrían ser justificables ya para una sola central nuclear de este tipo.

Fabricar agua pesada representa una inversión de 400-500 dólares/kg. producido anualmente, con un tamaño mínimo de 20-30 toneladas de producción por año.

La instalación de una fábrica puede ser justificada si se decide la construcción de centrales nucleares a agua pesada.

Se deduce de lo antedicho, que lo único imprescindible para un desarrollo nuclear nacional es investigar, formar y retener los técnicos nucleares y producir uranio. El único fin posible es la instalación de centrales nucleares. La instalación de fábricas y facilidades complementarias puede ser justificable en ciertos casos. (TABLA Nº 6).

4 - Financiación

Cualquier tipo de central que se instale en la República Argentina en el próximo futuro, se financiará en parte con divisas y en parte con pesos m/n. Las centrales nucleares no constituyen una excepción.

En la TABLA Nº 7 se da una estimación sobre el gasto en divisas, expresándolo como % del costo de instalación total.

La disminución del gasto en divisas puede lograrse mediante un desarrollo de la industria nacional; y la cifra definitiva dependerá del punto al cual se haya llegado en el momento de iniciar la obra, como asimismo del tipo de reactor elegido.

Los intereses que se aplicarán al capital invertido dependerán de la procedencia de los capitales y de la situación económica. Estarán probablemente entre el 8 y 12 % anual.

No corresponde a este trabajo discutir quien debe financiar la construcción de centrales nucleares, ni como o de donde conseguir los capitales necesarios. Se deja asentado solamente que las firmas extranjeras que se han dedicado a la industria nuclear, y en especial a la construcción de centrales nucleares, ya están en fuerte competencia; y que ellos, lo mismo como gobiernos nacionales y organismos mundiales, están sumamente interesados en promover el desarrollo y la instalación de centrales nucleares.

5 - Cargas anuales del capital invertido

Las cargas anuales dependen de la tasa que se aplique al capital invertido (GRAFICO Nº 5). Dicha tasa comprende amortización, intereses, seguro y obsolescencia.

La tasa se debe considerar mayor para una central nuclear que para una central térmica convencional equivalente.- La razón es que mientras se acepta comúnmente que una central térmica convencional se amortiza en 30 años, para una central nuclear se considera una vida útil más corta. Lo corrientemente aceptado es 20 años para el reactor y 30 años para la parte convencional, o sea 25 años para la central completa.

La tasa a aplicarse estará probablemente entre el 12 y 16 %.-

6 - Costo de la energía eléctrica producida.

El costo del kWh producido es el factor decisivo que determina si las centrales nucleares son económicas o no. Para calcularlo se estimará en base a los datos existentes publicados.

A continuación se estudiarán los distintos ítems que determinan el costo de la energía eléctrica producida, los cuales son:

- a) - Cargas del capital.
- b) - Costo del combustible.
- c) - Operación y mantenimiento.
- d) - Inventario del combustible, moderador y refrigerante.
- e) - Crédito de plutonio y uranio.

El costo del kWh producido en centrales nucleares actualmente en operación no es un costo real, porque ninguna de estas centrales tiene como única y exclusiva finalidad la producción de energía eléctrica.

7 - Incidencia de las cargas del capital.

Este es el factor que más influye en el costo del kWh. Depende del costo de instalación de la central, de la tasa aplicada y del factor de carga (GRAFICOS 6 y 7).

Con una central nuclear se debe trabajar con un factor de carga alto, o sea la central tiene que ser una central base. Un factor de carga 0,8, o sea 7.000 horas/año a plena carga, es aceptable desde los puntos de vista técnico y económico.

Es evidente que tanto el costo de instalación, como la tasa aplicada conviene que sea lo menor posible. Si el costo de instalación o la tasa aplicada es suficientemente bajo, es posible trabajar con un factor de carga algo menor, o, 7 ó inclusive 0, 6. (GRAFICO Nº 8).

8 - Incidencia del costo de combustible.

Queda determinado por el costo de la materia prima (GRAFICO N° 4), el costo de fabricación de los elementos de combustible (GRAFICO N° 5), el rendimiento de la central que a su vez depende del tipo de reactor, y el burn-up que se puede lograr (cantidad de energía que se puede sacar del combustible sin tener que reprocesar (TABLA N° 8).

El GRAFICO N° 9, junta estos factores. Sumando el costo de la materia prima y el costo de fabricación, se tiene el costo de los elementos de combustible. Sabiendo el tipo de reactor se tiene el rendimiento y el burn-up. Se lee en ordenadas directamente la incidencia en el kWh para centrales cuyo rendimiento es de 25%.

Si la central tiene otro rendimiento diferente, se multiplica la cifra encontrada por 25 y se divide por el rendimiento respectivo.

Los datos de la TABLA N° 8, se refieren a los tipos de reactores en su desarrollo actual. Se espera aumentar en el futuro tanto el rendimiento como el burn-up.

Para reactores a agua pesada se incluye en este ítem a las pérdidas de agua pesada, que estarían alrededor de un 2-3 % del inventario total por año.

Para los reactores con moderador orgánico, se incluyen las pérdidas por descomposición, 2-3 gramos/kWh.

9 - Operación y mantenimiento.

En una central nuclear se necesita un personal menos numeroso pero más especializado que en una central térmica convencional. El mantenimiento o posible reemplazo de las diferentes partes que forman la central es más costoso, pero hay menor probabilidad de deterioro por la superior calidad de los materiales y el mayor factor de seguridad que se toma al diseñarlas, fabricarlas e instalarlas.

En el efecto total los diferentes factores se compensan, y se toma aproximadamente el mismo costo de operación y mantenimiento que en una central térmica convencional equivalente, o sea aproximadamente 1 mill/kWh.

En las primeras centrales nucleares este costo puede resultar ligeramente superior, 1,2 mill/kWh, pero es razonable suponer que bajará a medida que se acumule experiencia operativa.

10 - Inventario de combustible.

En los reactores de potencia se tiene constantemente gran cantidad de combustible, el cual tiene un valor no despreciable. Este combustible se va quemando y se reemplaza periódicamente. El capital invertido que representan estos elementos de combustible lleva intereses pero no se amortiza. La tasa que se aplicará estará probablemente entre el 8 y 12% anual. Incluye intereses, seguro y un cierto porcentaje de absolescencia.

El valor total del inventario de combustible, depende principalmente del tipo de reactor (TABLA N°9). La cantidad de uranio por unidad de potencia instalada depende del tipo de reactor lo mismo como el costo de fabricación de los elementos de combustible. Aparte del combustible en el reactor, es necesario tener cierta cantidad adicional de elementos de combustible fabricados en depósito. Si el combustible es uranio natural, basta un 20% de la carga del reactor; si es uranio enriquecido, se necesita aproximadamente una cantidad igual a la carga del reactor.

El inventario del moderador y refrigerador está incluido en el costo de instalación de la central, con excepción de los reactores de agua pesada. Para este tipo de reactor, el inventario de agua pesada se suma al inventario de combustible.

La incidencia en el costo del kWh (GRAFICO N°10), depende también del factor de carga, además del valor del inventario y la tasa aplicada.

11 - Crédito de Plutonio y Uranio

En los reactores se quema el U 235 a razón del gramo MWd térmico, aproximadamente. Al mismo tiempo se forma Plutonio a partir del U 238.

Los elementos de combustible no pueden quedar en el reactor hasta que se consume todo el material fisiónable, por que se forman productos de fisión, que son un veneno para el reactor, y hay daños de irradiación.

Es posible reprocesar los elementos de combustible irradiados y recuperar el U 235 no quemado y el Plutonio formado. El costo de reprocesamiento varía según el tipo de elemento de combustible y está entre 15 y 35 U\$S/kg, siempre que la planta de reprocesamiento supere el tamaño mínimo económico (TABLA Nº 6).

Los materiales fisiónables recuperados pueden volver a ser usados en reactores. Este crédito de Plutonio y Uranio rebaja el costo de combustible de las centrales nucleares.

El factor de conversión para reactores térmicos está entre 0,7 y 0,9; o sea por cada 100 átomos de U 235 que se desintegran, se forman 70-90 átomos de Plutonio. En reactores rápidos el factor de conversión puede alcanzar valores de 1,3 - 1,5.

En reactores de U natural o enriquecimiento bajo (menor de 1,5%) si el burn-up es suficientemente alto, prácticamente no vale la pena reprocesar. Pero si el burn-up es bajo, o el enriquecimiento es mayor, el reprocesamiento se hace una necesidad económica.

Para calcular la incidencia neta del costo de combustible en el costo del kWh, se procede a restar el crédito de uranio y plutonio del costo de combustible y se entra en el GRAFICO Nº9, con este valor.

Si la fábrica de reprocesamiento no está cerca del reactor, el costo del transporte de los elementos de combustible irradiados llega a tener valores apreciables, que tendrá que ser sumado al costo de reprocesamiento.

12 - COMPARACION DE COSTOS DE PRODUCCION DE LA ENERGIA ELECTRICA

En la TABLA N° 10, se estiman y se comparan los costos del kWh producido en diferentes tipos de centrales nucleares y en una central convencional equivalente. Los tipos de reactores considerados son los que se están desarrollando actualmente y que mayor interés representan desde el punto de vista de la producción de la energía eléctrica.

Los parámetros generales, o sea potencia eléctrica, factor de carga y tasas se toman iguales para todos los tipos, para establecer una base de comparación.

Tratándose de centrales a construirse y no construídas, todos los valores citados son estimaciones. Estas estimaciones están basadas en datos publicados sobre centrales en operación, en construcción o en diseño.

Mientras que en la TABLA N° 10, se estima para el año 1960, en la TABLA N° 11, se repiten los cálculos y estimaciones para el año 1975, suponiendo que las centrales nucleares seguirán desarrollándose durante este lapso de tiempo, con el ritmo de ahora.

La central térmica convencional que se ha tomado como comparación posee las mismas características de potencia y funcionamiento que las centrales nucleares consideradas. La vida útil es más larga, las tasas correspondientemente menores, el combustible es petróleo, su costo es el costo actual en la TABLA 10, y se estima un probable aumento de un 20 % para 1975; el inventario equivale a una reserva de combustible para 3 meses de funcionamiento.

13 - Conclusiones

Habiendo tratado las centrales nucleares en este trabajo, exclusivamente desde el punto de vista económico, las conclusiones que se sacarán, serán del mismo tipo:

- a) - El caudal de conocimiento y los datos publicados sobre reactores es suficiente para poder realizar estimaciones aceptables.
- b) - Los planes de desarrollo nuclear y la cantidad de reactores de potencia en operación y en construcción prueban la confianza que se tienen mundialmente en las posibilidades económicas de las centrales nucleares.
- c) - Siendo el costo de instalación relativamente alto para centrales de pequeña potencia, éstas no se consideran económicamente aceptables.
- d) - Es admisible esperar una disminución futura en el costo de instalación de las centrales nucleares.
- e) - Los materiales utilizados en reactores tienen generalmente un costo elevado como consecuencia de los difíciles procesos de elaboración, los cuales están siendo perfeccionados.
- f) - En el caso de proseguir con un plan de desarrollo nuclear, que significa la instalación de centrales nucleares, es económicamente conveniente seguir investigando; formar y retener técnicos nucleares; producir uranio natural; formar y establecer una industria nacional para fabricar elementos de combustible, grafito nuclear, materiales orgánicos o agua pesada, respectivamente, según el tipo de reactor elegido.
- g) - No es conveniente instalar facilidades para enriquecimientos de uranio, ni reprocesamiento de combustible irradiado en los próximos 10-15 años.
- h) - Un desarrollo de la industria nacional significa la disminución de los gastos en divisas que implica la instalación de centrales nucleares.
- i) - La tasa aplicada al capital invertido en centrales nucleares, es ligeramente mayor que en centrales convencionales.
- j) - Una central nuclear debe trabajar con un factor de carga alto (0,7 - 0,8), y es conveniente que la tasa aplicada al capital invertido sea lo menor posible.
- k) - Para que la incidencia del costo de combustible en el costo del kWh sea bajo, conviene que el costo de la materia prima y el costo de fabricación de los elementos de combustible sea bajo; y que la central tenga un rendimiento y un burn-up alto.
- l) - El costo de operación y mantenimiento de una central nuclear, es aproximadamente igual al de una central térmica convencional equivalente.
- m) - Para que el inventario de combustible incida poco en el costo del kWh, es necesario que: el costo de los elementos de combustible sea bajo; se tenga poco combustible por unidad de potencia instalada; se trabaje con alto factor de carga; y la tasa aplicada sea la menor posible.
- n) - El crédito de uranio y plutonio llega a tener un valor importante cuando el combustible es uranio enriquecido, y/o el burn up es bajo. En estos casos el combustible irradiado se reprocesa.

- o) - Comparando los costos estimados del kWh en centrales nucleares y en centrales térmicas convencionales, se ve que para 1960 dependiendo del tipo de reactor, el costo del kWh nuclear es del mismo orden o ligeramente superior al costo del kWh convencional.
- p) - La misma comparación en 1975, es más favorable para centrales nucleares que térmicas convencionales.
- q) - El tipo de reactor económicamente más conveniente para la República Argentina, resulta ser el tipo uranio natural, agua pesada.
- r) - En definitiva: Desde el punto de vista económico, las centrales nucleares son competitivas con las centrales térmicas convencionales.

Tabla Nº 1
Lista de reactores de potencia, EN OPERACION

Nombre	País	Tipo	Potencia en MWe
Shippingport	USA	PWR	60
APPR	USA	PWR	2
VBWR	USA	BWR	5
EBWR	USA	BWR	5
BORAX-4	USA	BWR	3,5
SRE	USA	Grafito-Na	6
OMRE	USA	Organico-orgánico	15Mwt
HRE-2	USA	Homogeneo-H2O-H2O	0,3
ARCO	USA	BWR	0,2
ALPR	USA	BWR	2
G-1	Francia	Grafito-gas	5
Calder Hall	Inglaterra	Grafito-gas	184
Chapelcross	Inglaterra	Grafito-gas	182
Halden	Noruega	D2O B	10Mwt
BR-5	URSS	Rápido-Na	5Mwt
APS-1	URSS	Grafito-H2O	5
Soviet Siberia	URSS	Grafito-H2O	100

Lista de reactores de potencia, EN CONSTRUCCION

Nombre	País	Tipo	Potencia en MWe
Dresden	USA	BWR	192
Elk River	USA	BWR	22
Indian Point	USA	PWR	175
Yankee	USA	PWR	134
Enrico Fermi	USA	Rápido-Na	100
EBR-2	USA	Rápido-Na	20
Savannah	USA	PWR	20
G-2	Francia	Grafito-gas	30
G-3	Francia	Grafito-gas	30
EDF-1	Francia	Grafito-gas	60
EDF-2	Francia	Grafito-gas	170
Bradwell	Inglaterra	Grafito-gas	352
Hunterston	Inglaterra	Grafito-gas	344
Berkeley	Inglaterra	Grafito-gas	332
Hinkley Point	Inglaterra	Grafito-gas	626
Dounreay	Inglaterra	Rápido-Na	15
NPD-2	Canadá	D2O P	20
Mol	Bélgica	PWR	11,5
GCR	Checoslovak.	D2O-gas	150
Farsta	Suecia	D2O-D2O	10
AGIP-Nucleare	Italia	Grafito-gas	200
Soviet Siberia	URSS	Grafito-H2O	500
Leningrad	URSS	Grafito-H2O	420
Soviet Ural	URSS	Grafito-H2O	400
Voronezh	URSS	Grafito-H2O	420
Soviet BWR	URSS	BWR	50
Soviet D2O	URSS	D2O B.	50
Soviet SGR	URSS	Grafito-Na	50
Lenin	URSS	PWR	66
Soviet PWR	URSS	PWR	2

PWR significa reactor de agua a presión.

BWR significa reactor de agua a ebullición.

Existen algunos reactores de potencia de uso militar sobre los cuales no hay información adecuada. Estos no están incluidos en la presente lista. Hay numerosos reactores de potencia cuya construcción ya ha sido decidida y en muchos casos contratada. Estos tampoco figuran en la lista.

Tabla Nº 2

CLASIFICACION DE REACTORES DE POTENCIA, TIPOS PRINCIPALES.

Espectro Nuclear	Homogeneo o Heterogéneo	Combustible	Moderador	Refrigerador	Grado de desarrollo
Térmico	Heterogeneo	U natural	Grafito	Gas	8
"	"	"	"	H2O	6
"	"	"	D2O	D2O P.	2
"	"	"	"	D2O B.	3
"	"	"	"	Organico	1
"	"	"	"	Gas	5
"	"	"	"	Na	1
"	"	U enriqu.	H2O	H2O P.	8
"	"	"	"	H2O B	5
"	"	"	Grafito	Gas	2
"	"	"	"	H2O	6
"	"	"	"	Na	4
"	"	"	Orgánico	Orgánico	4
"	Homogeneo	"	D2O	D2O	4
"	"	"	H2O	H2O	2
Rápido	Heterogeneo	"	Ninguno	Na	5

Espectro nuclear:

se refiere a la energía de los neutrones, que en promedio es 0,03 eV en los reactores térmicos y superior a 0,1 MeV en los rápidos.

En un reactor homogéneo combustible, moderador y refrigerador se hallan mezclados, mientras que en un reactor heterogeneo el combustible es siempre separado del refrigerador.

En el U enriquecido la concentración natural del isótopo U235 se ha aumentado. Reactores de U natural pueden funcionar con U enriquecido pero lo contrario generalmente no es posible.

Los elementos moderadores más importantes son el Hidrógeno, Deuterio y el Carbón.

El refrigerador es un gas, generalmente Co2 o He; o un líquido, que puede ser agua, agua pesada, un compuesto orgánico o un metal líquido. La P. significa que el refrigerador líquido se encuentra a tal presión dentro del reactor que no entra en ebullición, mientras que la B. significa ebullición dentro del reactor.

Tabla Nº 3

DISTRIBUCION DEL COSTO DE INSTALACION DE UNA CENTRAL NUCLEAR

Item	Por ciento
Proyecto.	9 %
Terreno	0,5%
Estructuras	20 %
Reactor	41 %
Turbogenerador.	21 %
Instalación eléctrica accesoria	7,5%
Equipos miscelaneos	1 %
Total.	100 %

Proyecto incluye diseño total de la planta y dirección de la obra.

Terreno: El costo depende de la ubicación y del área de exclusión que se quiere dejar.

Estructuras: incluye el costo del edificio con sus facilidades (desagüe, camino de acceso, etc.) Es mayor que en plantas convencionales, pero existe la probabilidad de que disminuirá en el futuro.

Reactor: incluye toda la parte de la central donde se genera vapor. El reactor propiamente dicho con su fundación, moderador, (excepción D20) reflector, control, instrumentación, cañerías, válvulas, bombas de refrigeración. No incluye el inventario de combustible.

Turbogenerador: Incluye también a los condensadores, instrumentación y equipos asociados. Es ligeramente mayor que en plantas convencionales porque en las centrales nucleares actuales se trabaja con menores temperaturas y presiones de vapor.

Instalación eléctrica accesoria: incluye los equipos de transformación, conversión, circuitos auxiliares, etc. No difiere de la instalación análoga en centrales convencionales.

Equipos miscelaneos: incluye todo lo que no se ha considerado en los anteriores ítems.

Grado de desarrollo: El significado de la numeración asignada a los diferentes tipos de reactores es lo siguiente:

- 1.- Planta piloto, propuesta en diseño.
- 2.- " " en construcción.
- 3.- " " en operación.
- 4.- Central de potencia, propuesta en diseño.
- 5.- " " " en construcción
- 6.- " " " en operación.
- 7.- Modelo subsiguiente de central de potencia propuesta en diseño.
- 8.- " " " " " " en construcción.
- 9.- " " " " " " en operación.

En la tabla solamente se han mencionado los tipos de reactores de potencia, que por su grado de desarrollo ya alcanzado o por las posibilidades y probabilidades de un desarrollo futuro que se les asigna, merecen llamarse tipos principales en la actualidad. En el próximo futuro algunos de estos tipos posiblemente se eliminarán y entrarán en su lugar otros tipos más prometedores.

Tabla Nº 4

COSTO DE MATERIALES ESPECIALES

Material	Costo U\$S/Kgr.	Observaciones
U natural	36 - 40	Barras de metal nuclearmente puro.
U natural	28 - 30	UO2 polvo
U enriquecido	36 - 15.000	UPG; Función del grado de enriquecimiento. Gráfico 4.
Plutonio	30.000 - 45.000	Costo actual artificial, hasta 1962.
Plutonio	11.000 - 12.000	Costo normal aceptable después de 1963.
Thorio	40 - 45	Barras de metal, material fertil.
Thorio	24 - 27	Oxido.
Grafito	1 - 1,10	Uso moderador. Sin maquinado.
D2O	61 - 62	Moderador, refrigerador. Métodos actuales de producción.
Berilio	100 - 400	Moderador. Fabricación difícil.
Sodio	0,40 - 0,50	Refrigerador.
Zircondio	32 - 35	Barras de metal. Material de estructura.
Boro	32 - 34	Material absorbente de neutrones. Uso para control.
Hafnio	60 - 65	Control.
Orgánico	0,25 - 0,40	Moderador, refrigerador.

Los costos citados en la presente tabla son costos del mercado internacional.

TABLA Nº 5

COSTO DE FABRICACION DE ELEMENTOS DE COMBUSTIBLE

Tipo de elemento de combustible	Costo/kgr. U contenido
Envoltura Magnox, U nat. metálico	17 - 20
Envoltura acero inoxidable, UO2 debilmente enriquecido.	60 - 80
Envoltura Zircalloy, UO2 natural	40 - 60
Envoltura Zircalloy, UO2 debilmente enriquecido	100 - 120

Estos costos no incluyen el costo del uranio contenido. Incluyen el costo de los materiales de envoltura.

Tabla Nº 6

INDUSTRIAS NUCLEARES COMPLEMENTARIAS

Item	Inversión en U\$S/KW instalado en centrales nucleares	Tamaño mínimo económico Para proveer centrales cuya potencia total es:	Es conveniente realizarlo durante la primera etapa del desarrollo nuclear
Exploración y explotación de yacimientos de uranio.	1 - 2 \$	100 MWe	Si.
Purificación del uranio	1 - 3	100	Si
Fabricación de elementos de combustible.	4 - 5	100	Si.
Enriquecimiento del uranio. Hasta 3-5%	60 - 100	5000	No.
Reprocesamiento de combustible irradiado y reciclado	40 - 70	5000	No.
Fabricación de agua pesada.	30 - 50	200	Si.
Fabricación de grafito	5 - 10	100	Si.
Fabricación de material orgánico.	1 - 3	100	Si.

La fabricación de agua pesada, grafito y materiales orgánicos se considera conveniente si se instalarán reactores a agua pesada, grafito u orgánicos respectivamente.

Tabla Nº 7

GASTO DE DIVISAS. COSTO DE INSTALACION DE CENTRALES NUCLEARES

Item	% del costo total	% del costo total pagadero en divisas		
Proyecto	9,0	3	-	6
Terreno	0,5	0	-	0
Estructuras	20,0	2	-	6
Reactor	41,0	22	-	35
Turbogenerador	21,0	18	-	21
Instalación eléctrica accesoria	7,5	5	-	7
Equipos miscelaneos	1,0	0	-	0
Total :	100,0 %	50%	-	75%

Tabla Nº 8

RENDIMIENTO Y BURN-UP DE DIFERENTES TIPOS DE REACTORES

Tipo de reactor	Rendimiento %	Burn-up MWd/ton.
U nat. - grafito - gas	24 - 26	2.500 - 3.000
U nat. - D2O - D2O P.	24 - 26	7.000 - 10.000
U nat. - D2O - D2O B.	24 - 26	5.000 - 7.000
U nat. - D2O - Orgánico	25 - 27	4.000 - 6.000
U nat. - D2O - Gas	24 - 26	2.000 - 4.000
U 1-3% enriqu. - H2O - H2O P.	26 - 28	7.000 - 10.000
U 1-3% enriqu. - H2O - H2O B.	27 - 29	8.000 - 11.000
U 1-2% enriqu. - Grafito-Gas	28 - 31	4.000 - 6.000
U 1-2% enriqu. - Grafito-H2O	31 - 34	7.000 - 9.000
U 1-3% enriqu. - Grafito-Na	30 - 33	4.000 - 6.000
U 1-3% enriqu. - Orgánico-Orgánico	30 - 33	3.000 - 4.000
U 10-15% enrique. Rápido - Na	30 - 34	6.000 - 8.000

Tabla Nº 9

INVENTARIO DE COMBUSTIBLES DE DIFERENTES TIPOS DE REACTORES

Tipo de reactor	Inventario de combustible en U\$S/KW instalado.
U nat. - Grafito - Gas	100 - 150
U nat. - D2O - D2O - P.	60 - 90
U nat. - D2O - D2O - B.	50 - 80
U nat. - D2O - Orgánico	60 - 90
U nat. - D2O - Gas	50 - 80
U enrique.- H2O - H2O - P. (PWR)	80 - 140
U enrique. - H2O - H2O - B. (BWR)	150 - 200
U enrique. - Grafito - Gas	140 - 170
U enrique. - Grafito - H2O	210 - 270
U enrique. - Grafito - Na	70 - 150
U enrique. - Orgánico - Orgánico	160 - 220
U enrique. - Rápido - Na	60 - 110

Los valores de la presente tabla se han calculado para reactores de diseño actual, con costos de fabricación de elementos de combustible actuales.

Para el inventario se ha tomado un 20% adicional además de la carga del reactor en los reactores de U nat.; y un 100% adicional en reactores de U enriquecido.

En los reactores a agua pesada se ha incluido en el inventario de combustible el inventario de agua pesada con un 20% adicional.

Tabla No 10

1 9 6 0		U.nat. Gratio-Gas	U.nat. D20 - D20-P	U.nat. D20 - D20-B	U.nat. D20 - Orgánico	U.nat. D20 - Gas	U.enriq. H2O-H2O-P - PWR	U.enriq. H2O-H2O-B - BWR	U.enriq. - Gas Gratio -	U.enriq. - H2O Gratio -	U.enriq. - Na. Gratio Na.	U.enriq. - Org. Orgánico -	U.enriq. Rápido - Na.	Central Térmica Conven.
Potencia eléctrica	Mwe	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Factor de Car.ª		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Tasa Cargas de capital	%	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	13
Tasa Inventario	%	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9
Costo de instalación	\$/kw	400	300	300	300	300	300	300	360	400	410	290	500	200
Rendimiento	%	24	25	25	27	26	27	28	29	31	31	31	32	35
Burn-up	Mwd/ton	3000	8000	6000	5000	3000	3000	10000	4000	7000	4000	4000	5000	
Enriquecimiento	%	nat.	nat.	nat.	nat.	nat.	nat.	1.3	1.2	1.3	1.5	1.4	1.5	
Costo de fabricación	\$/kg	17	50	50	40	20	20	110	50	50	100	40	130	
Costo de combustible	\$/kg	37	30	30	30	30	30	115	100	115	145	130	2300	0.02
Combustible en reactor	kg/kw	2	0.2	0.23	0.22	0.25	0.2	0.4	0.5	0.8	0.2	0.6	0.02	
Inventario combustible	\$/kw	130	70	65	65	60	30	130	150	260	100	200	100	11
Factor de conversión		0.9	0.9	0.85	0.8	0.8	0.7	0.75	0.85	0.8	0.8	0.8	1.3	
Costo de reprocesamiento	\$/kg	15					20	25	20	20	25	20	35	
Cargas de capital	millis/kwh	8.0	6.0	6.0	6.0	6.4	7.8	6.0	7.2	8.0	8.2	5.8	10.0	3.7
Costo de combustible	"	3.1	1.9	2.4	2.4	2.9	4.3	3.4	5.4	3.2	3.3	6.5	8.0	5.7
Operacion y mantenimiento	"	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0
Inventario	"	1.8	1	0.9	0.9	0.9	1.3	2.6	2.5	3.7	1.4	2.8	2.4	0.2
Credito U. Pu	"	1.0					1.6	0.7	1.2	1.6	4.3	3.7	77.0	
Costo	"	13.1	10.1	10.5	10.5	10.6	13.0	12.5	13.4	14.5	14.3	12.6	12.6	10.3

Tabla No 11

	U.nat.-Grfito-Gas	U.nat.D20-D20-P	U.nat.D20-D20-B.	U.nat.D20-Organico	U.nat.D20 - Gas	U.enrign.-H20-H20-P	U.enrign.-H20-H20-B.	U.enrign.-Grfito-Gas.	U.enrign.-Grfito-H20	U.enrign.-Grfito-Na.	U.enrign.-Organico-Na.	U.enrign.-Rápido-Na.	Central Térmica Conven-
Potencia Eléctrica	MWe	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Factor de carga		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Tasa Cargas de Capital	%	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	13
Tasa Inventario	%	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9
Costo de Instalación	\$/kw	320	240	240	240	260	310	290	320	330	250	400	190
Reinimiento	%	27	28	28	30	29	30	32	34	35	34	35	36
Burn-up	MWd/ton	3300	10000	8000	6000	5000	10000	6000	10000	6000	5000	7000	
Enriquecimiento	%	nat.	nat.	nat.	nat.	nat.	2	2	1,3	1,8	1,5	10	
Costo de fabricación	\$/kg	15	35	40	30	15	60	40	40	30	30	100	
Costo de combustible	S/kg	35	28	28	28	28	210	210	110	180	140	1500	0,02
Combustible en reactor	kg/k W	1,5	0,16	0,17	0,2	0,2	0,17	0,4	0,6	0,15	0,4	0,015	
Inventario combustible	\$/kw	90	50	45	45	45	70	150	140	60	110	40	13
Factor de conversión		0,9	0,9	0,85	0,8	0,8	0,7	0,85	0,8	0,8	0,8	1,4	
Costo de reprocesamiento		12					15	15	15	20	15	30	
Cargas de Capital	millis/kWn	7,3	5,5	5,5	5,5	5,9	7,1	6,6	7,3	7,5	5,2	9,1	4,0
Costo de combustible	"	2,3	1,2	1,5	1,6	1,4	3,8	5,4	1,8	5,2	4,7	27,0	6,3
Operación y mantenimiento	"	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Invent. rto	"	1,5	0,8	0,7	0,7	0,7	1,1	2,5	2,3	1,0	1,8	0,7	0,2
Costo total	millis/hwh	11,0	8,5	8,7	8,8	9,0	10,8	11,6	11,6	11,7	10,1	12,8	11,5

1975