

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales

ELEMENTOS PARA LA EVALUACION DEL POTENCIAL
DEL CICLO DEL TORIO EN ARGENTINA

Roberto M. Corcuera

Buenos Aires

1987

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

ELEMENTOS PARA LA EVALUACION DEL POTENCIAL
DEL CICLO DEL TORIO EN ARGENTINA

R.M. Corcuera*

Trabajo presentado en mayo 1983

RESUMEN

Se presenta el conjunto de elementos más importantes a tener en cuenta en la evaluación y eventualmente en la toma de decisiones respecto de la introducción del ciclo del torio en nuestras centrales a agua pesada y de los desarrollos e implementación del ciclo externo del combustible. En particular se describe la situación actualizada en lo relativo a recursos y precios de uranio y torio, estado del desarrollo de las diversas etapas del ciclo externo, las estrategias de mayor interés y sus implicancias en el aprovechamiento de los recursos minerales y finalmente las evaluaciones económicas globales de las estrategias más importantes. Se agregan datos y valores de parámetros a los dados en publicaciones de AECL y en anexos se define un "factor de conversión global del ciclo" y se analizan los aprovechamientos de los recursos en función de las pérdidas de materia fisible y de materia fértil en el ciclo externo para los distintos casos de conversión y sobregeneración.

ABSTRACT

Elements for evaluation of the potential of the thorium cycle in Argentina

A comprehensive review of the most important elements to be taken into account for the evaluation and, eventually, the implementation of the introduction of thorium cycle strategies in argentinian heavy-water type power plants, and also of the associated development of the external fuel cycle, is presented. Particularly, the up-dated situations summarized here cover resources and prices of natural uranium and thorium, development of the various stages of the external fuel cycle, description of the most important strategies and their capabilities for the best use of mineral resources and, finally, the economic implications and the global comparison of those strategies. Various data and parameter values are added to those given in AECL's external reports. Some appendices are devoted to the definitions of a "global fuel-cycle conversion factor" and to the analysis of the effective use of mineral resources, taking into account fissile and fertile material losses in the external fuel cycle, for the different cases of fuel conversion and breeding.

* CNEA - Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales.

NOTA PRELIMINAR

La misión del Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales de la Dirección de Investigación y Desarrollo de la CNEA incluye la promoción y la realización de estudios de evaluación sobre sistemas nucleares de avanzada de importancia potencial para el país.

En ese contexto, el presente trabajo del Dr. Roberto Corcuera constituye un primer enfoque del problema de la utilización del torio en reactores nucleares de potencia en la Argentina. Es propósito de la Dirección y del Departamento que este estudio sea seguido por otros que, junto con él, vayan dando las bases técnicas que posibiliten la formulación de una política nacional al respecto. Su publicación no significa que la Dirección y/o el Departamento hagan suyas las conclusiones, que son de la exclusiva responsabilidad de los autores respectivos, sino que consideran que se trata de contribuciones documentadas y serias útiles para clarificar el debate del cual surgirá oportunamente esa política.

INDICE

	Página
I.- INTRODUCCION	11
I.1.- Uso del ciclo del torio	11
I.2.- Desarrollo tecnológico	12
I.3.- Elementos de Evaluación	13
II.- RECURSOS MINERALES	15
II.1.- Generalidades	15
II.2.- Uranio en Argentina	15
II.3.- Torio en Argentina	16
II.4.- Uranio en el mercado internacional	18
II.5.- Recursos toríferos en el mundo	20
III.- FACTIBILIDAD TECNOLÓGICA	23
III.1.- Generalidades	23
III.2.- Modificaciones a introducir en una cen- tral nuclear CANDU-PHW	24
III.3.- Modificaciones a introducir en una cen- tral nuclear D ₂ O a recipiente de presión	25
III.4.- Física del Reactor	25
III.5.- Reprocesamiento	26
III.6.- Enriquecimiento	26
III.7.- Refabricación de E.C. activos	27
IV.- ESTRATEGIAS DE USO DEL Th EN CENTRALES TIPO D ₂ O . . .	29
IV.1.- Generalidades	29
IV.2.- Sobregeneración	31
IV.3.- Estrategia Autosuficiente en el equilibrio	31
IV.3.1.- Dificultades técnicas	33
IV.3.2.- Vallas económicas	33
IV.4.- Estrategias con Reactor Convertidor Eficiente	34
a) Estrategia Intermedia	34
b) Estrategia de Alto Quemado	34

	<u>Página</u>
c) Estrategia de Referencia	35
IV.5.- Aspectos específicos de las estrategias con $\hat{C} \leq 1$	35
IV.6.- Otras estrategias	38
V.- APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS DE TORIO Y URANIO	41
V.1.- Características principales del aprovechamiento de los recursos de torio	41
V.2.- Variación de los parámetros principales del ciclo con la adición de físil externo en régimen de equilibrio	43
V.3.- Inventarios internos	45
V.4.- Efecto de las pérdidas en el ciclo externo y del inventario externo sobre los requerimientos de U natural	47
V.5.- Requerimientos de U y Th naturales para la totalidad de la vida útil de la central	48
VI.- CALCULOS ECONOMICOS Y COMPARACION GLOBAL DE LAS DISTINTAS ESTRATEGIAS	53
VI.1.- Costo básico del KWe instalado y del KWhe producido	53
VI.2.- Costos unitarios del ciclo de combustible	56
VI.3.- Costos de los concentrados de U y de Th	57
VI.4.- Costos de refabricación de E.C. inactivos y activos	58
VI.5.- Costos de reprocesamiento	59
VI.6.- Efectos de los costos unitarios del ciclo de combustible sobre el costo del KWhe	59
VI.7.- Reexaminación de los costos propuestos	61
VII.- EVALUACION PRELIMINAR Y CONCLUSIONES	63
VII.1.- Evaluación preliminar	63
VII.2.- Conclusiones	64
REFERENCIAS	67

A N E X O S

A1.-	CICLO NUCLEAR DEL TORIO- ^{232}Th	73
A2.-	FACTORES DE CONVERSION NEUTRONICO Y GLOBAL DEL CICLO	75
A2.1.-	Factor de Conversión Neutrónico	75
A2.2.-	Pérdidas en Reprocesamiento y Refabricación de E.C.	76
A2.3.-	Presencia de ^{238}U	77
A2.4.-	Factor de Conversión Global del Ciclo	78
A3.-	MULTIPLICACION DEL COMBUSTIBLE Y EFECTO DE LAS PERDIDAS EN EL CICLO	81
A3.1.-	Multiplicación ideal del combustible (pérdidas nulas)	81
A3.2.-	Aplicación al ciclo $^{238}\text{U} / ^{239}\text{Pu}$	81
A3.3.-	Aplicación al ciclo $^{232}\text{Th} / ^{233}\text{U}$	82
A3.4.-	Efecto de las pérdidas de físil en el ciclo, en casos $\hat{C} < 1$	83
A3.5.-	Pérdidas de materia fértil y multiplicación real con $\hat{C} < 1$	84
A3.6.-	Efecto de las pérdidas en el ciclo externo en ca- sos $\hat{C} \geq 1$	85
A4.-	BALANCES DE COMBUSTIBLE EN UNA CENTRAL CANDU-PHW/ U-NAT. EXTRAPOLADA A 1000 MWe	87
A4.1.-	Introducción	87
A4.2.-	Inventarios y consumos de U natural	88
A4.3.-	Producción de plutonio y requerimientos de U na- tural	88
A5.-	REQUERIMIENTO DE URANIO NATURAL EN LA PRODUCCION DE URA- NIO ENRIQUECIDO	90

LISTA DE TABLAS

	<u>Página</u>
1.- Recursos de uranio en Argentina	17
2.- Principales recursos de uranio en el mundo	19
3.- Principales recursos de torio en el mundo	20
4.- Composición isotópica del uranio reprocesado en el concepto CANDU-PHW/Th-autosuficiente	30
5.- Composición de E.C. en conceptos CANDU-PHW/Th con adición de plutonio	36
6.- Composición de E.C. en conceptos CANDU-PHW/Th con adición de U enriquecido al 93 % en ^{235}U	37
7.- Consumos anuales en operación en régimen de equilibrio en conceptos CANDU-PHW/Th	44
8.- Inventario interno de físil en conceptos CANDU-PHW/Th en la carga inicial de primera generación	45
9.- Requerimientos de U y Th naturales para la carga inicial de primera generación (inventario interno) en conceptos CANDU-PHW/Th	47
10.- Requerimientos de U natural para la totalidad de la vida útil de una central en conceptos CANDU-PHW/Th en función de la duración del ciclo externo	51
11.- Composición del costo del KWe instalado y del KWe producido en centrales de 1000 MWe netos a U-nat. pase único y Th-referencia con adición de ^{235}U	54
12.- Costos de generación unitarios en las estrategias de mayor interés	55
13.- Valores de referencia de los parámetros económicos del ciclo de combustible	56
14.- Efectos de los costos unitarios del ciclo de combustible sobre el costo del KWe	60

NOTA : No están incluidas aquí pequeñas tablas del texto principal así como el conjunto de las tablas de los Anexos.

"ELEMENTOS PARA LA EVALUACION DEL POTENCIAL DEL CICLO DEL TORIO EN ARGENTINA"

I.- INTRODUCCION

I.1.- Uso del ciclo del torio

Para un país como Argentina que ha iniciado un programa de volumen apreciable de construcción de centrales nucleoelectricas de la línea agua pesada y que, a la vez, pretende continuar a mediano y largo plazo con un programa de instalación de centrales eléctricas donde la parte nuclear tendrá un papel de primera importancia junto a la parte hidroeléctrica (Ref. 1), la introducción del denominado "ciclo del torio" en los reactores nucleares en cuestión surge inmediatamente como una de las alternativas más atractivas por su muy eficiente uso de los posibles materiales combustibles nucleares, uranio y torio.

En efecto, el torio natural está constituido únicamente por ^{232}Th , nucleído fértil que por captura neutrónica y posteriores decaimientos da origen al nucleído fisible ^{233}U , el más eficiente multiplicador de fisiones para neutrones térmicos^(*). En principio, el uso de ^{233}U y ^{232}Th como nucleídos principales del combustible de un reactor térmico, permite lograr un reactor reproductor del fisible ^{233}U con un "factor de conversión neutrónico", C, en el entorno de la unidad^(**). De esta forma mientras un reactor $\text{D}_2\text{O}/\text{U}$ natural a pase único actual sólo permite el uso de aprox. 0,7 % del contenido energético por fisión del uranio natural, el empleo del ciclo del torio con pases múltiples (reprocesamiento) permitiría el uso de hasta el 100 % de ese contenido del torio natural salvo las pérdidas de materia fisible en el ciclo de combustible^(***). Si a ello se agrega que las existencias de torio en la corteza terrestre se

(*) Para mayores detalles, el ciclo nuclear del torio se da en el Anexo N° 1.

(**) Ver Anexo N° 2.

(***) Ver Anexo N° 3.

estiman del orden de unas 3-4 veces mayores que las de uranio, se ve inmediatamente el impacto que el uso del ciclo del torio puede tener como fuente energética.

El uso del torio en centrales de la línea agua pesada, en particular en las tipo CANDU, supone mantener las principales características de diseño de la instalación, mientras que el combustible del reactor sería una mezcla de ^{232}Th (fértil) y de ^{233}U (fósil producido a partir del anterior), generalmente suplementados con materia fósil "externa", ^{235}U o plutonio, obtenidos de una u otra forma a partir del uranio natural. Otros nucleídos, productos de la irradiación y decaimiento del combustible, se encontrarían en pequeñas cantidades, mientras el conjunto estaría en forma de óxidos mixtos con la tecnología actual. La composición del combustible sería tal que el "factor de conversión global del ciclo", $\hat{C}$, resulte normalmente muy cercano a la unidad^(*). El combustible sería regularmente reprocesado, refabricado y reingresado a operación en el reactor, con una frecuencia dictada por el quemado de extracción.

La expresión "ciclo del torio" sirve en realidad para designar toda una gama de estrategias posibles de utilización de este elemento, así como del uranio, cada una de las cuales presenta ventajas relativas respecto de las otras en los distintos aspectos que es necesario considerar para poder llegar a una elección definitiva.

1.2.- Desarrollo tecnológico

Hasta aproximadamente una década atrás el empleo del torio en reactores de potencia había sido objeto de muy diversos estudios, experiencias y análisis ejecutados en un gran número de países acorde con la variedad de posibles líneas de reactores para centrales nucleares que en esos años estaban en pleno desarrollo compitiendo entre sí (Ref. 2). Actualmente la situación a nivel internacional se ha modificado considerablemente habiéndose prácticamente impuesto la línea LWR y en grado mucho menor la HWR como reactores térmicos de potencia, y perfilándose el reactor rápido a sodio como concepto avanzado que adoptarían la mayor parte de los países industrializados en el largo plazo.

(*) Ver Anexo N° 2.

Si bien subsisten en este momento ciertos programas de uso del ciclo del torio, ellos representan en conjunto un esfuerzo bastante limitado acorde con lo dicho anteriormente. Estos programas y proyectos actuales corresponden principalmente a los reactores CANDU con ciclo de torio ejecutados en Canadá, a los reactores a alta temperatura en Alemania Fed. especialmente, al concepto de reactor rápido con torio de la India, así como antiguos programas proseguidos a un ritmo menor, en particular la línea HTGR de General Atomic en USA, programa agua pesada-torio en Italia, etc.

1.3.- Elementos de Evaluación

El presente trabajo intenta servir como punto de partida actualizado en los estudios de evaluación a realizar en la CNEA argentina sobre la posible conveniencia de introducción de alguna de las estrategias de uso del torio en nuestras futuras centrales a agua pesada, así como de los programas de desarrollo e implementación del ciclo de combustible asociado que, obviamente, deberán ejecutarse previamente^(*). En ese sentido, se tratará de identificar aquí a todos los elementos más importantes que se requerirá analizar en los estudios de evaluación mencionados. Estos elementos serán solamente presentados, con intención de profundizar el análisis de varios de ellos a posteriori, si es necesario.

Resulta evidente que de los desarrollos antes mencionados, los trabajos realizados por Canadá desde mucho tiempo atrás (Ref. 4 - 9) constituyen el apoyo más importante para nuestra propia evaluación. (Las referencias 4 a 9 son algunas de las que permiten ubicar la importancia atribuida en Canadá al ciclo del torio como estrategia futura y, por consiguiente, poseen un carácter general.)

A ello se agregarán elementos de nuestro propio contexto que veremos más adelante.

En general podemos agrupar los principales elementos para

(*) Una memoria previa sobre el uso del torio aunque de carácter diferente fue publicada en CNEA en 1976 (Ref. 3), la que contiene además una larga lista bibliográfica.

evaluar el potencial del ciclo del torio en la siguiente forma:

1.- Costos de producción, precios y disponibilidades de concentrados de uranio y de torio.

2.- Principales áreas donde falta el necesario desarrollo tecnológico y su optimización a escala comercial del ciclo externo de los combustibles, fundamentalmente en lo que se refiere a reprocesamiento, refabricación de elementos combustibles (E.C.) activos, manipuleo y transporte de éstos, tratamiento de desechos, optimización y análisis de las estrategias más importantes.

3.- Modificaciones a aportar a las centrales nucleares de diseño actual para operar con ciclo de torio y desarrollo de la física de la operación de las mismas.

4.- Evaluación de costos de las distintas etapas del ciclo de combustible en plantas de capacidad comercial.

5.- Elección de la o las estrategias más convenientes de uso de uranio-torio y comparación económica global con otras alternativas.

II.- RECURSOS MINERALES

II. 1.- Generalidades

El primer elemento importante a tener en cuenta es evidentemente las disponibilidades de torio. Sin embargo se trata, en realidad, de conocer y mantener actualizado nuestro conocimiento de las disponibilidades tanto de torio como de uranio, y en cada caso tanto en nuestro territorio como en el mercado internacional, entrando el costo de obtención y precio del concentrado de mineral como parámetros determinantes.

En este sentido conviene tener presente que, debido a su mayor existencia en la corteza terrestre y a su menor actividad química, el torio aparece generalmente menos disperso que el uranio; por consiguiente los minerales de torio poseen normalmente una ley más elevada que en el caso de los minerales de uranio, lo que tiende a mejorar su costo de obtención.

Con la óptica expuesta, la situación actual puede resumirse como sigue :

II. 2.- Uranio en Argentina

Las disponibilidades de uranio se dan en la tabla N° 1, ac-

tualizadas al 31 de diciembre de 1980 (Ref. 10).

Cabe señalar que las categorías de costos indicadas en esta tabla son las establecidas por el O.I.E.A. pero poseen un carácter puramente nominal, indicando más bien una valoración relativa según la ley de los yacimientos y el grado de conocimiento que se tenga sobre su volumen. En muchos países los costos de elaboración del concentrado de uranio (yellow-cake) son superiores a los nominales del O.I.E.A. En particular, en nuestro país el costo promedio durante 1980 del kg del U en esa forma, fue de aproximadamente 200 U\$S. A su vez la producción total anual fue de aproximadamente 200 ton U_3O_8 en el mismo año (Ref. 11).

Cabe consignar, además, que la ley promedio de los yacimientos argentinos actualmente en explotación es de 0,8 a 1 kg/ton de mineral, es decir, inferior a las leyes de los correspondientes a los grandes productores mundiales.

A fin de evaluar el aumento de los recursos en el tiempo, es más prudente utilizar como parámetros las reservas mineras o R.R.A. de menor categoría de costos. El aumento de las reservas mineras de U en nuestro territorio fue del 4 % anual en los 2 últimos años, pero conviene tener presente que se trata de un parámetro muy variable.

11.3.- Torio en Argentina

El conocimiento de las existencias de torio en territorio argentino fue por oposición al caso anterior, extremadamente pobre hasta la fecha.

Fundamentalmente se hicieron algunos hallazgos de minerales de torio como consecuencia de la búsqueda de minerales de uranio, especialmente en el período inicial de dichas actividades en el país, entre 1952 y 1958 (Ref. 12, 13).

De esas manifestaciones toríferas, encontradas como se dijo en forma prácticamente ocasional, A.M.O. SANTOMERO estimó en 1978 unas "reservas posibles" del orden de 1300 ton de ThO_2 en yacimientos con leyes entre 2,5 y 4,5 kg/ton de mineral (Ref. 14).

Tabla N° 1

Recursos de Uranio en Argentina
al 31.12.1980 (Toneladas de U)

Categoría según costo concentrado (en U\$S/kg U)	Recursos razonablemente asegurados	Recursos adicionales estimados	Subtotales
< 80	24.990	3.825	28.815
80 a 130	5.270	9.563	14.833
> 130	2.635	7.225	9.860
Totales	32.895	20.613	53.508

Reservas mineras = 24.990 ton U

Recursos totales estimados = 53. 508 ton U

Hasta hace muy pocos años no hubo en realidad ningún programa instrumentado de prospección de torio por no haberse planteado un interés concreto en CNEA por este elemento. Por otro lado los trabajos de radiometría mediante prospección aérea se efectuaban midiendo la radiación total (sin ninguna discriminación), con lo cual de esa masa de información no surgieron indicaciones sobre existencias de torio.

En estos últimos años se efectuó por primera vez prospección aérea con discriminación de radiación correspondiente a uranio, torio y potasio. Este trabajo reciente cubrió 100.000 km² en toda la zona central de Chubut y una pequeña zona en el norte de Santa Cruz. Ciertas anomalías radimétricas correspondientes a minerales de torio se observaron y

en estos meses se ejecutan las verificaciones correspondientes sobre el terreno, existiendo indicaciones favorables en varias áreas (Las Plumas, valle del Río Chubut, oeste de Sarmiento, etc.), mientras una ya fue descartada por no poseer valor económico.

Además se iniciará a la brevedad la prospección aérea (con discriminación) de 23.000 km² en Córdoba y Santiago del Estero (Ref. 15).

Cuando se complete el análisis de la información de ambos grandes trabajos de prospección aérea se dispondrá de datos complementarios de los considerados en la Ref. 14 y podrá así darse un paso importante hacia una estimación realista de los recursos de torio en nuestro territorio. Ello es, evidentemente, un elemento indispensable para cualquier análisis posterior sobre el potencial del ciclo del torio en nuestro país.

II.4.- Uranio en el mercado internacional

La tabla N° 2 muestra los principales recursos en el mundo (Ref. 16).

La expansión de los recursos a nivel mundial continuó a ritmo sostenido, sobre todo en Canadá y Australia, en los últimos años.

Pero el elemento más importante a señalar es, de lejos, el efecto sobre los precios del uranio de la fuerte desaceleración e incluso suspensión total en los programas de instalación de centrales nucleares de muchos de los países industrializados (USA, Alemania Federal, Austria, Suecia, U.K., etc.). Esto llevó a una estagnación en los últimos años y luego brusca caída en dichos precios en el curso de 1980: de 45 U\$S en marzo a 28 U\$S en octubre el precio de la libra de uranio. (Esto condujo además a grandes empresas productoras como la COGEMA a prever una disminución del orden de 10 a 20 % en su producción de uranio a partir de 1981). (Ref. 17).

Niveles tan bajos del precio del uranio hacen retroceder fuertemente las posibilidades económicas del empleo del torio como combustible nuclear.

El precio internacional del uranio es, por consiguiente, un parámetro que debe ser seguido de cerca en toda evaluación sobre el

potencial del ciclo del torio.

Tabla N° 2

Principales recursos de uranio en el mundo, excluidos U.R.S.S.,
China y Europa Oriental en 1979 (miles de ton U)

Fuente: NEA/IAEA (Ref. 16)

País	Rec. Razon. Asegurados		Rec. Adic. Estimados	
	80 \$/kg U	130 \$/kg U	80 \$/kg U	130 \$/kg U
USA	531	708	773	1158
Sud-Africa	247	391	54	139
Suecia	0	301	0	3
Australia	290	299	47	53
Canadá	215	235	370	728
Niger	160	160	53	53
Namibia	117	133	30	53
Brasil	74	74	90	90
Francia	40	55	26	46
Gabón	37	37	0	0
India	30	30	1	24
Argentina	23	28	4	9
Argelia	28	28	0	5
Groenlandia	0	27	0	16
R. Centroafricana	18	18	0	0
Totales	1850	2590	1480	2450

11.5.- Recursos toríferos en el mundo

A diferencia del caso del uranio, el conocimiento de los recursos toríferos en el mundo es bastante limitado hasta el presente. En efecto, poco incentivo ha existido para emprender programas de envergadura de exploración dado que el uso corriente del torio fue hasta ahora muy reducido en general, y particularmente en los reactores nucleares.

Si bien se sabe que sobre la corteza terrestre la masa total de Th debe ser varias veces superior a la de U, las reservas y recursos establecidos a la fecha demuestran un conocimiento muy incompleto de las existencias de torio. Esto se ilustra en la Tabla N° 3, donde además se indican los valores de los principales recursos de torio por país.

Tabla N° 3

Principales recursos de torio en el mundo, excluidos U.R.S.S.,
China y Europa Oriental en 1979 (miles de ton Th)

Fuente: NEA/IAEA (Ref. 16)

País	Rec. Razon. Asegurados	Rec. Adic. Estimados
Brasil	68	1.200
Canadá	0	293
Egipto	15	280
Finlandia	0	60
Groenlandia	54	32
India	319	0
Noruega	132	132
Turquía	330	440
USA	122	278
Total Th	1.073	2.745
(Total U)	(2.590)	(2.450)

El costo del torio, obtenido generalmente como subproducto fue en los últimos años del orden de 24 \$/ kg Th. Se estima que el torio obtenido en depósitos específicos variará en general entre 40 y 80 \$/ kg Th (Ref.18).

No obstante, dependiendo del mercado futuro y teniendo en cuenta el bajo efecto del costo del torio sobre el precio del KWhé generado con reactores altamente convertidores, es posible la explotación de yacimientos con costos hasta aprox. 150 \$/ kg ThO₂ (Ref. 19).

Actualmente se produce regularmente torio en cantidades del orden de 150 ton ThO₂ por año en Francia e India. Existen proyectos para producciones de cierta significación en USA, Canadá, India, Egipto. etc., en particular como subproducto de la producción de concentrado de uranio.

III.- FACTIBILIDAD TECNOLÓGICA

III. 1.- Generalidades

Existe un conjunto de elementos que hacen a la factibilidad tecnológica de uso del torio como combustible nuclear en reactores tipo D_2O que son prácticamente independientes de la estrategia elegida y que, por sobre todo, revisten la máxima importancia.

En la actualidad varios de los problemas técnicos de cada uno de los eslabones del ciclo de combustible a base de torio han sido resueltos, pero siempre a escala de laboratorio y en pocos casos a escala de planta piloto. Teniendo en cuenta que el objetivo es llegar a centrales nucleares que usen dicho ciclo junto a plantas del ciclo externo de talla comercial, es obvio que un sinnúmero de problemas a resolver subsisten y además es posible que varios de ellos aún ni siquiera hayan sido detectados.

En cada caso corresponderá evaluar globalmente en tiempo y en costos los programas necesarios de investigación, desarrollo y demostración industrial para alcanzar esos objetivos.

Podemos dividir los principales elementos de factibilidad tecnológica en la siguiente forma:

- 1.- Modificaciones a introducir en una central nuclear tipo

CANDU-PHW y eventualmente en una tipo D₂O-recipiente de presión.

2.- Desarrollo de la física de la operación (incluyendo el movimiento del combustible), lo que en parte depende de la estrategia elegida.

3.- Reprocesamiento.

4.- Enriquecimiento.

5.- Refabricación de E.C. activos.

III.2.- Modificaciones a introducir en una central nuclear CANDU-PHW

Del conjunto de problemas tecnológicos que plantea el uso del ciclo del torio en reactores tipo D₂O, puede decirse que las modificaciones a realizar en una central CANDU-PHW son los problemas más resolubles; de hecho tales modificaciones son globalmente de poca importancia y además buena parte de ellas ya han sido razonablemente estudiadas.

(Ref. 20). Ellas son:

- modificaciones al sistema de control de reactividad del reactor;
- leves modificaciones a los sistemas de parada del reactor;
- probable uso más intensivo de las máquinas de recambio de combustible a causa de una estrategia de movimiento de los E.C. seguramente más compleja que la simple usada hasta ahora (Ref. 21).
- blindajes adicionales en el Sistema de Manejo de E.C. (S.M.E.C.) para el combustible gastado, debido a su mayor quemado de extracción;
- introducción de blindajes en el S.M.E.C. para el combustible nuevo en su almacenamiento y en todo su recorrido hasta las máquinas de recambio debido a la actividad importante de los E.C. frescos;
- resultan de lo anterior importantes cambios en las normas de operación (cambios en el sistema de control) y en particular de movimiento del combustible tanto fresco como gastado, y eventualmente de los E.C. parcialmente quemados que se dejen decaer para aumentar el contenido de ²³³U a partir del ²³³Pa. (Ref. 21).

- modificaciones eventuales en el paso de la red y sobre todo en el E.C. (distribución del enriquecimiento por coronas, menor diámetro de barra en la corona externa). (Ref. 22). No obstante, pocas dificultades se prevén para extender la tecnología básica actual de fabricación de E.C. a los correspondientes a óxidos mixtos propios del ciclo del torio (Ref. 23). (El problema de la fabricación de E.C. propiamente dicha es considerado en III.7).

Ninguna de estas modificaciones parece difícil de ser resuelta; en cambio, algunas otras requeridas por estrategias que apuntan a un elevado factor de conversión neutrónico ($C \geq 1$) resultan ser mucho más exigentes, p.ej.:

- disminución de la cantidad de material estructural en el núcleo mediante reducción del espesor de tubo de presión y de vaina de los E.C.;
- elevación del tenor de enriquecimiento del D_2O del moderador de 99,75 % a 99,95 % (Ref.29).

III.3.- Modificaciones a introducir en una central nuclear D_2O a recipiente de presión

El estudio del uso del ciclo del torio en reactores a agua pesada con recipiente de presión (tipo KWU) solo fue abordado recientemente y en forma muy preliminar dentro del marco de estrategias avanzadas fomentadas por la INFCE (Ref. 24, 25).

Esta es una área que requerirá una importante profundización en el futuro, dadas las grandes diferencias resultantes en la estrategia de movimiento del combustible en el reactor debido a la disímil longitud en los E.C. tipos CANDU y PHWR de KWU.

III.4.- Física del Reactor

La economía neutrónica en reactores D_2O con ciclo de Th es un elemento clave entre los que hacen a la factibilidad tecnológica por afectar directamente el factor de conversión y el quemado de extracción, y de allí los consumos de uranio y torio naturales y el costo del combustible en el KWh(e).

Importantes incertezas subsisten en parámetros neutrónicos básicos (de productos de fisión y de la interacción entre los diversos nucleídos pesados presentes en el combustible) y se requieren además métodos de cálculo mucho más elaborados que los usados al presente (p.ej. para tener en cuenta que la composición del combustible depende de la historia de su irradiación). Finalmente un extenso panorama de experimentación sobre el comportamiento dinámico de un reactor con combustible a base del ciclo $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ se requerirá para poder optimizar el sistema de control y la estrategia de movimiento de los E.C.

La duración de este programa fue estimada en aprox. 15 años para el reactor CANDU-PHW (Ref. 26).

III.5.- Reprocesamiento

Obviamente, no existe actualmente en ningún país reprocesamiento de E.C. a base de Th a escala comercial.

En el caso canadiense solo se dispone de estudios de laboratorio, pero a ellos cabe agregar desarrollos mayores logrados en el pasado en otros países en conexión con los reactores de alta temperatura, particularmente los HTGR de General Atomic en USA. El proceso denominado "Thorex" de extracción por solventes ya está en gran medida desarrollado; no obstante su implementación específica en el caso de E.C. CANDU que contendrán uranio, torio y plutonio significará un esfuerzo importante.

El programa de desarrollo previo al proyecto de una planta comercial se estima que durará aproximadamente 15 años para el caso CANDU-PHW (Ref. 26).

III.6.- Enriquecimiento

Los ciclos de torio concebidos en el caso CANDU-PHW implican el enriquecimiento del combustible con materia fisible "externa", ^{235}U o plutonio, en prácticamente todas las situaciones.

Independientemente de la fuente de provisión de estas materias físis, ventajas relativas pequeñas resultan de usar una u otra de ellas en las distintas etapas del ciclo (operación del reactor, reproce-

samiento, refabricación de E.C.).

Por lo tanto, la elección entre ambas se haría fundamentalmente sobre la base de la fuente de provisión. En lo que hace a la obtención de uranio muy enriquecido en ^{235}U (~93%) la situación es muy incierta en nuestro caso en la época actual. El uso de plutonio implicará, en cambio, implementar a escala comercial el ciclo U/Pu, es decir, operar un sistema de centrales a U natural en paralelo con el sistema de centrales con ciclo de Th, y reprocesar ambos tipos de E.C. a escala comercial.

III. 7.- Refabricación de E.C. activos

Como es bien conocido, la fabricación de E.C. a base de combustible reciclado de Th y U debe hacerse en forma remota por la presencia de actividad γ muy penetrante. Esto lleva a cuestionar el interés de proseguir con el método actual de pastillas sinterizadas y por consiguiente nuevos desarrollos podrían ser necesarios. A ello se agrega el diseño conceptual de una planta de talla comercial para la fabricación de dichos E.C., la operación de una planta piloto, la construcción de una facilidad de simulación inactiva para resolución de problemas operativos, y finalmente la construcción de una planta de demostración.

Un estudio del diseño conceptual de esta última, para una capacidad anual de 100 ton E.P./año^(*), fue realizado a fin de identificar las áreas cuyo análisis debe ser profundizado con prioridad (Ref. 27).

El programa total previo al proyecto de una planta comercial se estima en aprox. 20 años de duración (Ref. 26).

(*) E.P. = Elementos pesados = uranio, torio, plutonio, en conjunto.

IV.- ESTRATEGIAS DE USO DEL Th EN CENTRALES TIPO D₂O

IV.1.- Generalidades

Como se mencionó previamente, diversas estrategias para utilizar el ciclo del torio en reactores de la línea agua pesada han sido hasta ahora estudiadas en diversos países y se puede decir que las presentaciones efectuadas a la INFCE, así como los informes finales de ésta, constituyen una visión de conjunto sobre la cuestión en los momentos más recientes (Ref. 24). Desde nuestro punto de vista, los trabajos realizados por AECL en la materia constituyen la fuente más importante y a la vez más completa para nuestra propia evaluación. A ella cabrá agregar trabajos independientes en ciertas áreas, particularmente evaluaciones económicas de costos de reprocesamiento y refabricación de E.C. activos, propios del ciclo del torio (por ejemplo Ref. 28). Trabajos de otro origen (Alemania Federal, USA, India, Italia, Rumania, etc.) que pueden aportar elementos complementarios se encuentran enumerados en Ref. 24.

En lo que sigue veremos las principales estrategias estudiadas por AECL, todas basadas en el diseño actual del CANDU-PHW 600 MWe standard (E.C. de 37 barras) extrapolado, según el caso, a 1000 ó 1200 MW(e). Del mantenimiento de la potencia máxima por canal combustible, surgen distintas potencias específicas en cada caso.

En estas estrategias, para la carga inicial de todos los reactores se requiere generalmente, además de torio natural, materia físil externa al ciclo del Th obtenida del uranio natural (^{235}U o Pu). Llamaremos reactores de primera generación en cualquier estrategia a aquellos para los cuales esta clase de materia físil sea la única existente y disponible para el arranque de los mismos. En cambio para segunda o posterior generación existirá ya un cierto inventario de ^{233}U generado, que podrá ser suficiente para la carga inicial en el caso en que el factor de conversión global del ciclo $\hat{C}$ sea ≥ 1 en la estrategia en cuestión; en caso contrario a este ^{233}U deberá adicionarse materia físil externa para el arranque del reactor.

En los reactores de primera generación, durante la operación posterior al arranque, los E.C. frescos se fabricarán modificando sucesivamente su composición para cada recarga debido a que el ^{233}U irá

reemplazando progresivamente al ^{235}U o Pu "externos", sea en forma parcial o total. Esto da lugar a un transitorio de operación relativamente largo, antes de alcanzarse un régimen de equilibrio en el cual los E.C. frescos poseerán en adelante una composición constante en todas las recargas.

Los E.C. para carga inicial de la primera generación se fabricarán utilizando torio natural virgen junto a uranio muy enriquecido en ^{235}U o bien plutonio. Para las recargas, en cambio, se recuperará del reprocesamiento la parte uranio que contendrá en gran medida ^{233}U y la parte torio que contendrá esencialmente ^{232}Th (Ver Tabla N° 4). No obstante la recuperación de este torio, al menos en las primeras épocas de uso comercial del mismo, no es seguro: ella dependerá de su competitividad económica frente al torio natural obtenido de sus minerales. La fabricación de E.C. para las recargas se hará entonces a partir del uranio reprocesado, de torio (minero, o bien reprocesado más minero para compensar el ^{232}Th consumido en la irradiación de la recarga precedente) y la adición de materia fisible externa al ciclo (U muy enriquecido en ^{235}U o Pu), a menos que ésta última ya no sea necesaria (régimenes de equilibrio en estrategias con $\hat{C} \geq 1$).

Tabla N° 4

Composición isotópica del uranio reprocesado en el concepto CANDU-PHW/Th con estrategia autosuficiente en régimen de equilibrio (Ref. 29 y 26)

Isótopo	Contenido (%)
U- 232	.03
U- 233	61.
U- 234	23.
U- 235	6.
U- 236	9.
U- 238	.2

Los requerimientos de uranio natural resultarán, en cada caso, del uranio muy enriquecido en ^{235}U a fabricar, o de la operación de otro reactor utilizando el ciclo del uranio, p.ej. CANDU-PHW actual, y del cual por reprocesamiento se obtendría plutonio. En esta segunda variante deben computarse el inventario total más los consumos en operación de ambos sistemas de centrales, y de la misma manera en el cómputo económico debe incluirse la energía eléctrica generada por ambos sistemas.

IV. 2.- Sobregeneración

El valor de η_t (factor de multiplicación neutrónica térmica) del ^{233}U es lamentablemente muy cercano al umbral (≈ 2.2) a partir del cual la sobregeneración es factible en la práctica.

El análisis de las posibilidades del CANDU-PHW operando con ciclos de torio como reactor sobregenerador, es decir operando con un factor de conversión neutrónico C apreciablemente mayor que la unidad, fue realizado en la Ref. 29. Las conclusiones son que, como consecuencia de la intrínseca economía neutrónica del reactor CANDU-PHW en su versión actual, queda un muy pequeño margen para una optimización adicional. De esto y del valor de η_t del ^{233}U resulta que el CANDU-PHW como reactor sobregenerador está prácticamente descartado: en el extremo más optimista del análisis la sobregeneración que se lograría sería muy modesta, mientras que en el extremo conservativo la muy pequeña sobregeneración que se podría alcanzar está dentro de las incertezas del cálculo, o sea que podría ser nula. Una sobregeneración de alguna significación solo sería posible si un aumento de gran envergadura fuera admitido en los costos de capital fijo y del combustible, esencialmente para disminuir la potencia específica y el quemado de extracción del combustible, Q_{ex} , por debajo de los valores actuales con la estrategia U natural en un solo paso. De esta forma se atenuarían significativamente las absorciones parásitas en ^{233}Pa , ^{135}Xe y otros productos de fisión, pero se incrementaría significativamente el costo del kWh(e). (*)

IV. 3.- Estrategia Autosuficiente en el Equilibrio

La estrategia de uso del torio en reactores CANDU-PHW que posee el mayor valor de C y que aparece como viable con el conocimiento tecnológico actual es la denominada "autosuficiente en el equilibrio": una vez alcanzadas las condiciones de régimen de equilibrio, ella posee un factor de

(*) Kilowatt-hora eléctrico generado.

conversión global del ciclo $\hat{C}$ igual a la unidad, con lo cual para el funcionamiento regular del reactor requerirá, entonces, únicamente torio como aporte externo al combustible reprocesado.

Para la carga inicial de combustible de los reactores de primera generación así como para el posterior transitorio de operación antes de llegarse al régimen de equilibrio requiere, además de torio, uranio natural para obtener la materia fisible adicional necesaria (^{235}U ó Pu). Esta estrategia fue estudiada por primera vez en forma específica para una central de 1200 MW(e) en la Ref. 30. (Véase además Ref. 29 y 26).

Su gran atractivo estratégico (concebido inclusive en términos de varias generaciones de centrales, es decir tiempos del orden de cientos de años) es que, excepto los requerimientos iniciales de uranio (carga inicial y transitorio de operación de la primera generación de reactores), la operación posterior del sistema de centrales nucleoelectricas funcionando con esta estrategia es absolutamente independiente de los recursos y precio del uranio y solo se vería limitada por las existencias de torio natural (Ver Anexo N° 3). Esto es válido no solo para los reactores de la primera generación una vez que alcanzaron el régimen de equilibrio, sino para todos los demás reactores (generaciones segunda y posteriores) en todo momento. En efecto estos últimos reactores operarán desde el comienzo en régimen de equilibrio, suponiendo iguales todas las centrales del sistema; su carga inicial de fisible se obtiene exactamente del reprocesamiento del combustible de la última recarga del reactor de la generación precedente una vez que éste llegó al fin de su vida útil. Sin embargo, y siempre desde un punto de vista estratégico, el inconveniente de la estrategia autosuficiente en el equilibrio es que no permite la expansión del sistema de centrales sin el concurso de nuevas cantidades de uranio natural para el arranque de centrales adicionales de primera generación, a través del aporte de ^{235}U ó Pu .

Desde una perspectiva mucho más próxima, debe puntualizarse que existen vallas técnicas (además de aquellas generales vistas en la sección III) y económicas para su adopción en forma comercial, considerándose que al momento actual las vallas económicas son inapelables.

Estas vallas son:

IV.3.1.- Técnicas

En términos generales la estrategia autosuficiente está cerca del límite de lo tecnológicamente factible y requiere asegurar la más eficiente economía neutrónica en el reactor y las más bajas pérdidas de materia fisible en el ciclo de combustible para asegurar la condición $\hat{C} = 1$. Se ha calculado que ella es posible con los siguientes requerimientos tomando como base el diseño actual del CANDU-PHW.

- a) Mantener la potencia específica media en niveles modestos ($\sim 26 \text{ MW(t)}/\text{ton E.P.}$), **similar al actual.**
- b) Aumentar la pureza del D_2O moderador de 99,75 % a 99,95 %.
- c) La reserva total de reactividad debe reducirse al menor nivel considerado factible (700 pcm^(*) para salto del ^{135}Xe y 500 pcm como margen para control) con lo cual resulta un quemado de extracción juzgado como el mínimo aceptable (10 MWd/kg.E.P.)
- d) Para alcanzar un valor de $\hat{C}$ igual a la unidad es, además, esencial que las pérdidas totales de ^{233}U en el ciclo, p, en reprocesamiento más refabricación de E.C., estén limitadas al 0,5 %. Pérdidas totales de 1 % son admisibles, compensándolas con una mayor economía neutrónica y manteniendo el objetivo de 10 MWd/kg E.P. en el quemado de extracción; estas economías pueden ser: disminución de las absorciones en materiales estructurales, particularmente en tubos de presión y vainas de E.C., uso de barras ajustadoras de Th para producir ^{233}U adicional, etc. Todo ello a su vez debe considerarse a la luz de las incertezas del cálculo neutrónico: 500 pcm de error en reactividad, que es un valor realista, conduce a un error de 2,5 MWd/kg E.P. en el quemado de extracción.

IV.3.2.- Económicas

Esta estrategia solo permite un quemado de extracción muy modesto con lo cual la frecuencia de operaciones de reprocesamiento y refabricación es exageradamente elevada, así como el inventario total de combustible. A pesar de que el consumo de torio, al igual que los requerimientos iniciales de uranio, no son considerables, el costo del combustible en el KWh(e) producido es bastante mayor que el actual a base de U natural en un solo paso. Esto es así tomando el juego de parámetros de costos unita-

(*) Unidad de reactividad: 1 pcm = 10^{-5} .

rios más favorable a esta estrategia, dentro de los considerados probables en la actualidad (Ver capítulo VI).

IV. 4.- Estrategias con Reactor Convertidor Eficiente

A fin de disminuir en menor o mayor grado el peso de las operaciones de reprocesamiento y refabricación de E.C., toda una gama de estrategias posibles se vuelven económicamente interesantes por debajo del caso límite anterior, es decir con factores de conversión $\hat{C} < 1$, para lograr quemados de extracción del combustible $Q_{ex} > 10 \text{ MWd/kg.E.P.}$

Ello es posible en régimen de equilibrio merced a la adición sistemática de materia fisible externa (Pu ó ^{235}U) al combustible reprocesado (U y normalmente también Th) y al Th ingresado para compensar la parte consumida, en toda refabricación de E.C.; es decir que se aplica el mismo método que para la carga inicial y el transitorio de operación, aunque en proporciones algo distintas.

En particular AECL estudió ciertas estrategias suponiendo alcanzado el objetivo de 0.5 % como pérdidas de fisible en el ciclo externo y los restantes requerimientos dados en IV.3.1.

Ellas son las siguientes:

a) Estrategia Intermedia, caracterizada por los siguientes valores

$$\hat{C} = 0.96$$

$$Q_{ex} = 18.7 \text{ MWd/kg E.P. con adición de 1 g de Pu -fisible por kg. de E.P.; o bien}$$

$$Q_{ex} = 19.5 \text{ MWd/kg E.P. con adición de 1 g de } ^{235}\text{U (U enriq. 93\%)} \text{ por kg de E.P.}$$

b) Estrategia de Alto Quemado, caracterizada por los siguientes valores

$$\hat{C} = 0.88$$

$$Q_{ex} = 37.2 \text{ MWd/kg E.P. con adición de 5 g de Pu-fisible por kg de E.P.; o bien}$$

$$Q_{ex} = 37.5 \text{ MWd/kg E.P. con adición de 5 g de } ^{235}\text{U (U enriq. 93\%)} \text{ por kg de E.P.}$$

Por otra parte, en ocasión de la INFCE AECL definió un reactor CANDU con ciclo de torio de referencia con requerimientos más realistas y

buscando un compromiso entre el objetivo de un máximo aprovechamiento de los recursos de uranio y torio y un mínimo impacto del costo total del combustible sobre el costo del KWh(e) producido. Obviamente, esta estrategia no posee ningún carácter absoluto puesto que la estimación económica depende en gran medida del juego de costos unitarios elegido.

Esta estrategia corresponde a las características actuales del CANDU-PHW, únicamente extrapolado a 1000 MW(e), y suponiendo un objetivo algo menos ambicioso, 1 %, como pérdidas de físil en el ciclo externo:

- c) Estrategia de Referencia, caracterizada por los siguientes valores:

$$\hat{C} = 0,86$$

$$Q_{\text{ex}} = 30,1 \text{ MWd/kg E.P. con adición de aprox. 5 g de Pu físil por kg.E.P.; ó bien}$$

$$Q_{\text{ex}} = 29,3 \text{ MWd/kg E.P. con adición de aprox. 4 g de } ^{235}\text{U por kg E.P.}$$

Las composiciones de los E.C. frescos y descargados para todas estas estrategias así como para la actual en CANDU a U natural y paso único se dan en las Tablas N° 5 y 6, suponiendo en todos los casos alcanzado el régimen de equilibrio.

IV. 5.- Aspectos específicos de las estrategias con $\hat{C} \leq 1$.

Como se mencionó anteriormente, en todas estas estrategias existen requerimientos de uranio natural: en el caso Autosuficiente en el equilibrio ($\hat{C} = 1$) únicamente en la primera generación para la carga inicial y el transitorio de operación; en las estrategias con Reactor Convertidor ($\hat{C} < 1$) toda vez que se fabriquen E.C.(cargas iniciales y recargas de todas las generaciones).

Cada estrategia presentará a su vez dos variantes, según se adicione uranio muy enriquecido en ^{235}U o bien plutonio, en nuestro caso obteniendo éste último de la operación de nuestras centrales que hasta el presente generarán, cada una, Pu con composiciones levemente distintas entre sí.

Si bien en cuanto a performances ambas variantes no son radicalmente diferentes, ellas implicarían enormes desigualdades en la implementación industrial del ciclo de combustible como se indicó en III.6.

TABLA N° 5

Composición de los E.C. frescos^(*) y descargados^(**) en conceptos CANDU-PHW con ciclos de U natural (pase único) y de torio con adición de plutonio ($\hat{C} < 1$). Pot. eléct.= gama 1000-1200 MWe. Régimen de equilibrio.

(*) 1^a. columna(F). (**) 2^a. columna (D).

Parámetro	Estrategia U-nat. (pase único)	Estrategias Th (pases múltiples) con $\hat{C} < 1$					
		Alto Quemado		Referencia		Intermedia	
Potencia específica (MW / kg.E.P.)	0.0234	0.0263		0.0286		0.0263	
C ; $\hat{C}$	0.77 ---	0.89	0.88	0.88	0.86	0.97	0.96
Pérdidas : p (%)	---	0.5		1.0		0.5	
Quemado de extracción: Q_{ex} (MWd / kg.E.P.)	7.3	37.2		30.1		18.7	
Adición de Pu-físil (g. / kg.E.P.)	---	5.0		5.6		1.0	
Composición del E.C. (g. / kg.E.P.)	F D	F	D	F	D	F	D
U- 238	992.9	985.9	0.	0.	0.	0.	0.
U- 235	7.1	2.2	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3
Th-232	---	---	967.	934.	964.	928.	973.
U- 233 (+ Pa-233)	---	---	15.0	15.0	14.8	14.9	15.2
Pu- físil	---	2.6	5.0	~0.	5.6	~0.	1.0
Pu- total	---	3.6	7.4	~0.	7.8	~0.	1.5

TABLA N° 6

Composición de los E.C. frescos (*) y descargados (**) en conceptos CANDU-PHW/Th autosuficiente en el equilibrio ($\hat{C} = 1$) y convertidores con adición de U enriquecido en ^{235}U ($\hat{C} < 1$). - Pot.eléct.= gama 1000-1200 MWe.- Régimen de equilibrio.

(*) 1^a. columna (F). (**) 2^a. columna (D).

Parámetro	Alto Quemado		Referencia		Intermedia		Autosuficiente	
Potencia específica (MW / kg.E.P.)	0.0263		0.0286		0.0263		0.0263	
C ; $\hat{C}$	0.89	0.88	0.88	0.86	0.97	0.96	1.01	1.00
Pérdidas : p (%)	0.5		1.0		0.5		0.5	
Quemado de extracción : Q_{ex} (MWd / kg.E.P.)	37.5		29.3		19.5		10.0	
Adición de ^{235}U (g. / kg.E.P.)	5.0		4.3		1.0		----	
Composición del E.C. (g. / kg.E.P.)	F	D	F	D	F	D	F	D
Th-232	962.	928.	959.	931.	970.	952.	975.	964.
U- 233 (+ Pa-233)	14.8	14.8	14.6	14.7	15.1	15.1	15.1	15.1
U- 235	6.9	1.9	6.5	2.2	2.7	1.7	1.3	1.3
U- 238	3.0	2.6	3.1	2.9	1.1	1.0	~ 0.	~ 0.
Pu- físil	---	~ 0.	---	0.06	---	~ 0.	---	---
Pu- total	---	~ 0.	---	0.08	---	~ 0.	---	---

Excepto para las generaciones segunda y posteriores en las que normalmente el reactor arranca directamente en condiciones de equilibrio, en el caso de primera generación debe pasar por un largo transitorio de operación que representa del orden de la mitad de la vida útil del reactor. Sus características de operación son cambiantes y las principales de ellas así como sus efectos sobre la economía del ciclo de combustible son analizadas en Ref. 31 y 32.

IV. 6.- Otras estrategias

Además de las estrategias anteriormente descritas estudiadas por AECL en los últimos años, debe citarse el concepto de ciclo U-Th o "valubreeder" desarrollado por W.B. LEWIS (Ref. 33). Aparentemente por argumentos económicos y por ser su concepción más compleja que la de los reactores antes descritos (al involucrar varios tipos de combustibles junto a una importante masa de uranio levemente enriquecido) no fue profundizado su análisis en estos últimos años.

Toda otra gama de estrategias fue analizada en mayor o menor grado apuntando a un ciclo de combustible "resistente a la proliferación" de materiales aptos para explosivos. En estos casos suponiendo accesible el reprocesamiento pero no el enriquecimiento, se "desnaturaliza" el elemento físil uranio intrínseco del ciclo (el cual contiene principalmente el físil ^{233}U) mezclándolo con uranio natural o medianamente enriquecido en ^{235}U . De esta manera pásase a operar con un "nuevo" uranio cuyo contenido en ^{233}U (más el equivalente de ^{235}U) es a lo sumo del orden del 12%. En particular la Estrategia de Referencia indicada en IV.4 en su versión con uranio desnaturalizado utiliza como entradas a la fábrica de E.C.: uranio enriquecido al 63 % en ^{235}U y uranio reprocesado del mismo reactor con un contenido de aprox. 10 % en ^{233}U y de aprox. 2 % en ^{235}U , en régimen de equilibrio.

Los inconvenientes de estas estrategias con uranio resistente a la proliferación son de naturaleza económica, de menor aprovechamiento de los recursos minerales y aún tecnológicos. En efecto la presencia de una importante masa absorbente de ^{238}U empeora considerablemente el quemado de extracción y el factor de conversión neutrónico, los requerimientos de uranio aumentan, y en el caso Autosuficiente en el Equilibrio probablemente ello

no sea factible técnicamente por la baja economía neutrónica propia del combustible.

V.- APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS DE
TORIO Y URANIO.

V. 1.- Características principales del aprovechamiento de los recursos de
torio

Hay dos elementos importantes a tener en cuenta en lo que respecta al aprovechamiento del torio.

En primer lugar está el hecho de que el torio natural no posee ningún isótopo físil con lo cual su aprovechamiento está inevitablemente supeditado a la provisión de inventarios físiles provenientes del uranio y esto lleva inmediatamente a tener que considerar la mejor forma de utilizar este otro material nuclear: en conjunción o no con el torio.

Por otro lado las limitaciones intrínsecas del diseño de los reactores a agua pesada actuales con ciclo de torio no hace previsible la sobregeneración de ^{233}U con ellos y, en el mejor de los casos, se podría alcanzar la estrategia autosuficiente en el equilibrio ($\hat{C} = 1$). Esto hace que, en general, sólo se consideren realistas estrategias con reactor convertidor ($\hat{C} < 1$), para los cuales el aprovechamiento de los recursos de torio es parcial.

Este aprovechamiento parcial de los recursos de torio es sensible a pequeñas variaciones en el factor de conversión neutrónico C , a las pérdidas de materias físiles y fértiles en el ciclo externo del combustible p y p_e y al quemado de extracción Q_{ex} resultante, que en parte depende de C . (Ver anexos N° 2 y 3).

Todo lo anterior llevaría a considerar la introducción de ciclos de torio únicamente como una manera de disminuir los consumos de uranio en mayor o menor grado, según la estrategia adoptada.

Como se indicó en IV.1., los requerimientos de uranio y de torio naturales se pueden desdoblar de la siguiente forma:

- inventarios totales (dentro y fuera del reactor) para carga inicial de primera generación;
- consumos en operación nominal en régimen de equilibrio;

- adicionales en consumos durante el transitorio de operación de la primera generación;
- adicionales eventuales en inventarios para carga inicial de generaciones posteriores. (Recordando que al final de la vida útil de una central de una cierta generación su inventario total puede utilizarse para arrancar otra central idéntica de la generación siguiente, estos últimos requerimientos serían normalmente innecesarios).

Hemos supuesto que solo la primera generación no arranca en régimen de equilibrio, lo cual es correcto en las estrategias aquí consideradas.

Elementos decisivos a considerar con relación a estos requerimientos, además de los propios de cada estrategia, son los siguientes:

- Las masas involucradas en los inventarios externos, las cuales son proporcionales a la duración del ciclo externo del combustible entre dos pasajes sucesivos del mismo por el reactor (duración del ciclo externo). Esto comprende los tiempos de enfriamiento de E.C. descargados, de reprocesamiento, de refabricación, de transportes y almacenamientos temporarios. Estimaciones muy dispersas existen hasta ahora de la duración del ciclo externo: 1.5 años (Ref.30, 1976); 1 año (Ref.20, 1978); 2 años (Ref.26, 1979-1980), sin contar en este último caso el tiempo de almacenamiento. Un valor típico del tiempo de almacenamiento de los E.C. nuevos disponibles para ser cargados en el reactor es 0.5 años.
- En lo que respecta el aprovechamiento del torio debe tenerse en cuenta que sus consumos serán seguramente muy elevados durante un tiempo apreciable en el cual no se recupere el Th reprocesado por su mayor costo frente al Th minero.
- En el mismo contexto puede imaginarse que ninguna recuperación se haría del Pu reprocesado en combustibles a base de Th con adición de Pu, dado que sus cantidades serían normalmente mínimas y a su vez el Pu reprocesado poseería un alto contenido de ^{240}Pu . Solo se recuperaría la fase uranio del reprocesamiento, valiosa por su contenido físil (^{233}U , ^{235}U) y que da sentido a la utilización del ciclo del torio.

V. 2.- Variación de los parámetros principales del ciclo con la adición de físil externo en régimen de equilibrio

Se vió en el capítulo IV que la adición progresiva de físil externo en régimen de equilibrio, hacía pasar de la "estrategia autosuficiente en el equilibrio" (EAE) a "estrategias de reactor convertidor" (ERC) variando el contenido de dicho físil de cero a un valor m de g /kg E.P.

Con ello se consigue un aumento en el quemado de extracción Q_{ex} por la ganancia en reactividad del combustible que dicha adición provoca. (El valor mínimo de Q_{ex} en los casos vistos, 10 MWd /kg E.P., corresponde a la EAE). Este aumento de Q_{ex} , a su vez, lleva a disminuir el número total de reciclados del combustible, es decir del número de operaciones (y por ende de las masas de E.P.) de reprocesamiento y fabricación de E.C. para una misma energía eléctrica total producida. Desde este punto de vista, cuanto mayor sea el contenido de físil externo en régimen de equilibrio más bajos serían los costos del KWe instalado y del KWhe generado.

El consumo de uranio natural en régimen de equilibrio crecería en principio en forma proporcional a la masa m de físil externo en los E.C. frescos pero, debido al aumento de Q_{ex} con m, la relación no es lineal. (En efecto, el consumo de U-nat. mencionado se amortigua al aumentar m gracias a la mayor energía eléctrica total producida con cada carga de E.C. debido al aumento de Q_{ex}). Desde este otro punto de vista cuanto menor sea el contenido de físil externo en los E.C. sería más ventajoso, y el caso ideal sería la EAE con un consumo nulo de U-nat. en régimen de equilibrio.

En lo que respecta al aprovechamiento del torio natural con reciclado de Th, nuevamente surgen efectos opuestos al aumentar el contenido de físil externo. Por un lado vimos que se logra un aumento en Q_{ex} y por consiguiente una disminución en el número de reciclados del combustible. Esto último implica entonces, una menor pérdida total de Th en el ciclo externo a lo largo de los reciclados por ser menor el número de ellos. Por otra parte, al aumentar m disminuye el factor de conversión neutrónico en régimen de equilibrio (por tratarse de combustible con un mayor quemado promedio y por lo tanto con mayor cantidad de absorbentes parásitos). De esta forma, la masa total de Th susceptible de ser convertida en ^{233}U , y por consiguiente de ser aprovechada, disminuye al aumentar m (Ver Anexo N° 3). La situación de compromiso resultante de ambos efectos opuestos será función de las pérdidas porcentuales de fértil en el ciclo externo, p_e , además de depender de Q_{ex} , y por lo tanto de C.

TABLA N° 7

Consumos anuales en operación en régimen de equilibrio en conceptos CANDU-PHW/Th.- Pot. electr. = 1000 MWe netos.-
 Factor de carga = 80 %.- Pérdidas en reprocesamiento = 1 % en estrategia de referencia, =0.5 % en las restantes.-
 Cantidades en toneladas/año.- Ver pot. específ. y Q_{ex} en tablas N° 5 y 6.

Parámetro	Ciclo U-nat. (pase único)	Ciclos de Th con adición de Pu		
		Alto Quemado	Referencia	Intermedia
Pu- físil	----	0.134	0.186	0.0535
Pu- total	----	0.201	0.279	0.0803
U- nat. requerido (*)	136.7	49.65	68.91	19.82
Th-nat. (sin recicl.)	----	26.9	32.2	53.5
Th-nat. (con recicl.)	----		1.35	
	Ciclo Th / EAE	Ciclos de Th con adición de ^{235}U (93% en U)		
^{235}U (93% en U)	----	0.134	0.160	0.0513
U- nat. requerido(**)	----	23.6	28.2	9.04
Th-nat. (sin recicl.)	100.1	26.7	32.7	51.3
Th-nat. (con recicl.)			1.20	

(*) Para ciclos de Th corresponde a centrales CANDU-PHW de iguales características a U-nat. para obtener el Pu.

(**)Contenido supuesto en colas de planta de enriquecimiento = 0.2 % de U-235.

En el caso de no realizarse reciclado de Th, el consumo del mismo en régimen de equilibrio está directamente determinado por el ritmo de recambio de E.C., es decir por Q_{ex} , y por el volumen de cada recarga, es decir por el inventario interno. Especialmente el primer factor hace disminuir de manera importante el consumo de Th (sin reciclado) al aumentar la masa $\underline{m}$ de físil externo adicionado en los E.C.

Los principales elementos descritos en esta sección y en particular los consumos en régimen de equilibrio en los casos de interés se dan en la tabla N° 7. Los parámetros para deducir los consumos y requerimientos de U natural se obtienen en los Anexos N° 4 y 5.

V. 3.- Inventarios internos

El contenido de materia físil total del núcleo del reactor está dado por los inventarios internos de uranio físil reciclado y de físil externo adicionado.

El inventario interno del reactor es un parámetro de primera importancia pues determina parámetros tales como Q_{ex} y el requerimiento de U-nat. para la totalidad de la vida útil, desde luego en conjunción con otros factores. En el arranque de una central de primera generación se tendrá únicamente físil externo con el inventario interno dado en la tabla N° 8 para casos de nuestro interés.

TABLA N° 8

Inventario interno de físil en conceptos CANDU-PHW/Th en la carga inicial de primera generación.- Pot. elct. = 1000 MWe. Cantidades en toneladas. (Las potencias específicas no son idénticas; ver sus valores en las tablas N° 5 y 6).

Estrategia	Con adición de Pu	Con adición de U- 235
Alto Quemado	3.11	2.89
Referencia	3.03	2.76
Intermedia	2.85	2.64
Autosuficiente	2.78	2.53

NOTA : En el equivalente CANDU-PHW/ U-nat. pase Único (diseño actual) el valor correspondiente es considerablemente menor, 0.92 ton , aún sin tener en cuenta el empobrecimiento de los E.C. centrales.

Vemos inmediatamente que los inventarios internos de materia físil son en general considerables en las centrales a Th comparados con los correspondientes a una central equivalente a U-nat. Esto constituye una fuerte desventaja para las primeras porque hará crecer significativamente los costos de capital (debidos a dicho inventario) en la composición del costo final del KWe generado, por causa del alto costo de la materia físil.

El origen del voluminoso inventario interno de físil, como se sabe, es la elevada sección eficaz de captura térmica del ^{232}Th (aprox. 3 veces mayor que la del ^{238}U) lo que conduce a requerir una relación de físil / fértil (en este caso Th) correspondientemente mayor. Si además se busca incrementar el quemado de extracción, el contenido de físil debe ser aún mayor y así resultan los valores dados en la tabla N° 8.

Los requerimientos de U natural para dichos inventarios internos de físil para la carga inicial del reactor son evidentemente proporcionales a ellos. En el caso de utilizarse Pu obtenido de una central CANDU-PHW a U-nat. de la misma capacidad, 1000 MWe netos, se requerirán 392.0 toneladas de U natural a consumir por cada tonelada de Pu- físil a producir para dicho inventario (Ver Anexo N° 4). En el caso de utilizarse U enriquecido al 93 % en ^{235}U , y con la hipótesis de 0.2 % de ^{235}U en las colas del enriquecimiento, se requerirán 195.3 toneladas de U natural para fabricar cada tonelada de ^{235}U del inventario (Ver Anexo N° 5).

Vemos que en el caso de adición de Pu se requiere consumir cerca de 1200 toneladas de U-nat. para obtener el Pu necesario para el arranque de la central a torio de referencia canadiense. De acuerdo a lo visto en el Anexo N° 4 esa masa de U-nat. se consumirá en una central CANDU-PHW/U-nat. de 1000 MWe con $L_f = 80\%$ en aprox. 8 años de operación y en una central como la de Embalse Río 3° con el mismo L_f en aprox. 13 años de operación, y esto no incluye el inventario externo.

Resta considerar aquí los inventarios internos de torio. En los casos estudiados por AECL se conservó fija la potencia específica del reactor excepto en la estrategia de referencia (Ver tabla N° 6). Dado que en todos los casos el ^{232}Th representa entre el 94 y el 97.5 % aprox. del total de elementos pesados, si se conserva la potencia específica media lo mismo ocurrirá con el inventario interno de Th al pasar de una estrategia a otra.

Los valores son de 4 a 10 veces menores que los requerimientos de U-nat. como se indica en la tabla N° 9.

TABLA N° 9

Requerimientos de U y Th naturales para la carga inicial (inventario interno de primera generación) en conceptos CANDU-PHW/Th de 1000 MWe netos. Masas en toneladas. (Para los casos con adición de Pu se supone éste proveniente de una central idéntica a U-nat. pase único de igual capacidad. Ver Anexo N° 4).

Parámetro	Estrategia Th Referencia		Estrategia Th Autosuficiente	
Pot. espec. media inic. (MW / ton E.P.)	28.6		26.3	
	Con adic. Pu	Con adic. U-235	Con adic. Pu	Con adic. U-235
E.P. presente	120.0	120.0	130.5	130.5
Th presente	115.1	117.0	127.4	128.0
U-nat. requerido	1187.8	539.0	1089.8	494.1

NOTA : Para la central equivalente CANDU-PHW/U-nat. el inventario interno es de 129.48 toneladas de U natural (Ver Anexo N°4).

V. 4.- Efecto de las pérdidas en el ciclo externo y del inventario externo sobre los requerimientos de U natural

Si se diera prioridad al objetivo de reducir los requerimientos de U natural es evidente que conviene elegir una estrategia con menor contenido de físil externo (lo cual además, lleva normalmente a incrementar el factor de conversión neutrónico y con ello a lograr también un mayor aprovechamiento del Th natural). Sin embargo la caída en Q_{ex} es muy rápida en tal caso, con lo cual puede haber un incremento nulo e incluso una reducción en el Factor de conversión global del ciclo (*), afectando esto el aprovechamiento del Th natural. Pero más importante aún es lo que acontece con los requerimientos de U natural, material evidentemente más importante para el ciclo del torio y para las restantes estrategias basadas en el ciclo del uranio.

(*) Ver Anexo N° 2.

Para adiciones muy bajas de físil externo, el reducido valor de Q_{ex} implica importantes pérdidas totales de físil en el ciclo externo, por lo cual no es posible anular el consumo de U natural en régimen de equilibrio, excepto que se introduzcan las mejoras requeridas para lograr la estrategia Autosuficiente en el Equilibrio (E.A.E.).

A esto se agrega el hecho de incrementarse el inventario externo de E.C. y por consiguiente de U natural comprometido a través del físil externo adicionado.

Ambos efectos, en ausencia de una ajustada optimización que permita lograr o aproximarse considerablemente a la E.A.E., llevan a encontrar el mínimo de requerimientos de U natural para el inventario total (interno + externo), en valores intermedios de adición de físil externo, con los cuales se logra un Q_{ex} del orden de 20-25 MWd/kg.E.P.. Ello en el caso de una duración del ciclo externo de aprox. 2 años, valor realista, debido fundamentalmente a la importante masa de físil adicional presente en el inventario externo.

En el caso de una duración del ciclo externo de 1.5 años, uso de Pu como físil adicional y las demás características antes dadas, el U natural comprometido para el inventario total pasa de aprox. 1700 toneladas en la estrategia autosuficiente a 1500 toneladas en la estrategia intermedia, es decir que desciende a pesar de requerir esta última la adición regular de físil externo, lo que no sucede con la primera estrategia. A su vez, estas cifras se reducen a cerca de la mitad si se utilizara ^{235}U como físil adicional.

V. 5. Requerimientos de U y Th naturales para la totalidad de la vida útil de la central

Los requerimientos totales de Th en cualquiera de las estrategias vistas es de suponer que no representarán un impedimento de importancia. Más bien debe recalcar que estos requerimientos dependerían seguramente menos de la estrategia propiamente dicha que del hecho de que se recicle o no el Th reprocesado, y en el caso de reciclarse, de las pérdidas de fértil en el ciclo externo, p_e .

Tomando el caso más realista, la estrategia de referencia (con adición de ^{235}U) con 2.5 años de duración total del ciclo externo

y pérdidas de fértil $p_e = 1 \%$, se tendrían los siguientes valores aproximados (en toneladas de Th) para la central de 1000 MWe netos :

	<u>Con reciclado</u>	<u>Sin reciclado</u>
- Inventario interno :	115	115
- Inventario externo:	82	82
- Consumo total para T = 30 años, $L_f = 80 \%$:	<u>36</u>	<u>980</u>
TOTAL :	233	1177

Los requerimientos de U natural, a su vez, son altamente dependientes de los siguientes parámetros :

- Que se trate de centrales de 1^a generación o no.
- Del uso de Pu o de ^{235}U como físil externo para el arranque, transitorio de operación y, excepto en el caso E.A.E., para la operación en régimen de equilibrio.
- De la duración del ciclo externo.
- Y, evidentemente, de otros parámetros fundamentales que en nuestro caso no se harán intervenir: capacidad eléctrica de la central, quemado de extracción más o menos optimizado, diseño general del reactor y en particular de los E.C., etc.

Daremos aquí los requerimientos de U natural nuevamente para las dos estrategias que resultan de mayor interés para este análisis:

- La estrategia de referencia en sus dos versiones, con adición de Pu o de ^{235}U , y en la que se supone una pérdida de materia físil (y fértil) en el ciclo externo de 1.0 %. Podemos considerar a ésta como una vía realista, suponiendo desarrollado el ciclo externo del combustible a escala industrial.
- La estrategia autosuficiente, también en sus dos versiones, donde el físil externo se usaría solamente para el inventario inicial y el transitorio de operación de centrales de 1^a generación. Aquí las pérdidas porcentuales supuestas son de 0.5 % y podemos considerar a ésta como una estrategia optimista cercana al extremo de lo tecnológicamente factible con el conocimiento actual y, como veremos luego, con míni-

mas posibilidades en cuanto a competitividad comercial.

Como ya vimos, los inventarios de una central al final de su vida útil, permiten arrancar una central similar de la generación siguiente y se puede contar con que a partir de la 2^a. generación las centrales arrancan directamente en régimen de equilibrio. De esto resulta que para esas centrales los requerimientos de U natural están dados únicamente por los consumos dados en la tabla N°7 por corresponder ellos al régimen de equilibrio. Siempre para dichas centrales resulta así un importante ahorro de U natural respecto de las centrales actuales a U-nat./pase único. Sin embargo esta es la perspectiva a muy largo plazo, donde teóricamente se podría llegar a operar un sistema de centrales a Th/E.A.E., que si bien no tendría ninguna expansión en su capacidad eléctrica total, tendría en cambio el gran atractivo de poseer un consumo nulo de U natural y un mínimo consumo de Th natural.

Pero con una perspectiva a tiempos más cercanos debemos focalizarnos en la primera generación de centrales, caracterizadas por requerir un importante inventario físil, es decir un importante requerimiento inicial de U natural. Este requerimiento se consigna en la tabla N° 10, con valores tomados de las referencias 26 y 34 y de los Anexos N° 4 y 5.

Esta tabla resume la capacidad del ciclo del Th para disminuir los requerimientos de U natural a lo largo de los 30 años de la vida útil nominal de las centrales de primera generación, respecto de las centrales actuales U-nat./pase único. Si bien los valores mostrados son bastantes elocuentes por sí mismos, caben las siguientes observaciones :

- El uso de U altamente enriquecido en ²³⁵U implica un consumo directo de U natural pero que representa un ahorro de importancia, ya que sería de 35 - 39 % del actual en el caso de la estrategia de referencia.
- El uso de Pu implicaría que la central a Th en sí misma no tendría consumo directo alguno de U natural. En contrapartida el arranque y la operación de la misma están supeditados a la opera-

TABLA N° 10

Requerimientos de U natural para la totalidad de la vida útil de una central en conceptos CANDU-PHW/Th en función de la duración del ciclo externo. Comparación con el caso CANDU-PHW/U-nat. a pase único. Pot. eléct. neta = 1000 MWe. Vida útil de la central = 30 años. Factor de carga promedio $L_f = 80 \%$. Parámetros de producción de Pu y de ^{235}U en Anexos N° 4 y 5. Masas en toneladas. (No se consideraron las pérdidas de U natural previas, en conversión a UO_2 y en fabricación de E.C. U-nat.).

Parámetro	Estrategias CANDU-PHW		
	U-nat. (pase único)	Th-referencia	Th-E.A.E.
Q_{ex} (MWd / kg E.P.)	7.3	30.1(*) 29.3(**)	10.0
Conversión Neutrónica	0.77	0.88	1.01
Pérdidas de físil supuestas.	----	1 %	0.5 %
Conversión global	----	0.86	1.00
U NAT. REQUERIDO			
<u>Dur. ciclo ext.</u> = 1 año			
Con adición de Pu	----	3445.	1933.
Con adición de ^{235}U	----	1474.	871.
Consumido en reactor	4193.	----	----
<u>Dur.ciclo ext.</u> = 2 años			
Con adición de Pu	----	3518.	2775.
Con adición de ^{235}U	----	1624.	1248.
Consumido en reactor	4193.	----	----

(*) Con adición de Pu.

(**) Con adición de U-235.

ción simultánea de un vasto sistema de centrales U-nat. Se requiere en particular, operar cada central de este último tipo durante gran parte de su vida útil a fin de producir y acumular el voluminoso inventario total requerido para el arranque de cada central Th/Pu.

- La central con E.A.E. de la primera generación no aparece, en el aspecto aprovechamiento del U natural, como mucho más interesante que una operando como reactor convertidor, tal el caso de la estrategia de referencia, para duraciones conservativas del ciclo externo (aprox. 2 años).
- Si uno tiene en cuenta que desde el presente hasta la probable introducción del ciclo CANDU-PHW/Th en escala comercial existe un tiempo del orden de 20 años como mínimo en el caso canadiense, se puede considerar que el Pu generado en centrales como las actuales ya estaría disponible por sí mismo para el arranque de las centrales a Th. Pero esta posibilidad debe compararse globalmente con otras para obtener la mejor utilización del Pu generado, incluyendo el reciclado del Pu en las centrales U-nat. o una estrategia a largo plazo centrada en los reactores rápidos.
- Como conclusión podemos decir que las estrategias de uso del Th consideradas por AECL logran importantes ahorros en consumos anuales de U natural a largo plazo, a expensas de requerir una cantidad muy elevada de este material a fin de producir los necesarios inventarios iniciales de fisil, tomando como referencia las centrales actuales U-nat. a base único.

VI.- CALCULOS ECONOMICOS Y COMPARACIÓN GLOBAL DE LAS DISTINTAS ESTRATEGIAS

VI. 1.- Costo básico del KWe instalado y del KWe producido

La determinación del costo del KWe producido en una central nuclear hace intervenir un gran número de parámetros y el costo final resultante está formado por dos grandes ítems: los costos de capital directos e indirectos y los costos de operación incluyendo los mantenimientos y la clausura de las instalaciones al final de su vida útil.

En el caso de una central tipo D_2O los costos de operación incluyen : la operación propiamente dicha, mantenimientos, eventual provisión de D_2O para compensar pérdidas, provisión de E.C. frescos, almacenamiento de E.C. descargados y clausura de las instalaciones.

Para ubicar la importancia relativa de cada componente, estos se dan en la tabla N° 11 donde se consideraron centrales de 1000 MWe netos en complejos de 4 unidades idénticas, con valores tomados de ref. 26.

Allí se consideraron: vida útil $T = 30$ años, factor de carga promedio $L_f = 80 \%$, interés anual y tasa de redescuento del 4% e inflación nula. El valor de los restantes parámetros puede verse en refs. 26 y 34, y el detalle del método de cálculo en ref. 34.

Las hipótesis y parámetros introducidos en las componentes dependientes del combustible serán discutidos con más detalle a continuación. Pero ya es posible observar que aún en una situación favorable como es la del combustible CANDU a U natural, el costo del combustible a lo largo de la vida completa de la central U-nat. representa aproximadamente 30% del total.

TABLA N° 11

Composición del costo del KWe instalado y del KWe generado en centrales de 1000 MWe netos a U-nat. pase único y Th-referencia con adición de U-235. (Ver hipótesis en el texto principal). Costos en dólares canadienses de 1978.

Componente del costo	U-nat. (pase único)		Th-referencia	
	Monto (M\$)	%	Monto (M\$)	%
COSTOS DE CAPITAL				
- Directos (Instalaciones, equipos, componentes, etc)	350.7	22.4	348.7	21.9
- Indirectos generales (ingeniería, D ₂ O, puesta en marcha, intereses hasta puesta en marcha, etc)	506.7	32.4	518.5	32.6
- Indirectos de combustible (inventario total inicial de E.C.)	22.6	1.5	155.2	9.8
COSTOS DE OPERACION (traídos a fecha de puesta en marcha)				
- Costos generales (operación, mantenimientos, reposición D ₂ O, clausura)	231.6	14.8	231.2	14.5
- Recargas de E.C. y eventual almacenamiento de E.C. gastados.	451.0	28.9	337.5	21.2
COSTO TOTAL PARA LA VIDA UTIL (a fecha de p. en m.)	1562.6	100.	1591.1	100.
Costo del KWe instalado (a fecha de p. en m.)	\$ 1562.6		\$ 1591.1	
Costo promedio del KWe a generar.	m\$ 12.9		m\$ 13.1	

En el cálculo económico de referencia 26 se utilizaron valores de los parámetros económicos generalmente optimistas para las estrategias de Th - referencia con lo que se logra descender los costos del combustible para operación al 21 %, pero aún así esta ganancia es a su vez anulada por el incremento en los costos indirectos de capital, fundamentalmente los debidos a la carga inicial de combustible. En efecto se pasa de un costo total para ese concepto de 22.6 a 155.2 M\$ canadienses 1978 entre ambas estrategias, debido al impacto del voluminoso inventario físil inicial requerido por la central a torio. Esto lleva finalmente a costos de generación unitarios levemente mayores para esta última central, siempre para el juego de parámetros adoptados en este cálculo.

Para completar este panorama general corresponde ver el caso de estrategias de Th con adición de Pu, lo que supone dos sistemas distintos de centrales, uno a U-nat. y el otro a Th/Pu. Una vez alcanzado el régimen de equilibrio, el primer sistema representa el 33.25 % de la capacidad instalada total y, además de generar energía eléctrica, provee Pu al segundo sistema que poseerá así una capacidad complementaria del 66.75 % del total. La tabla N° 12 resume los costos unitarios de generación en los casos mencionados y en particular la última columna da los valores para la asociación de ambos sistemas en la proporción correspondiente.

TABLA N° 12

Costos de generación unitarios en las estrategias de mayor interés. Ver hipótesis en el texto principal. Costos en dólares canadienses 1978. Las estrategias Th dadas corresponden a la estrategia Th-referencia.

Parámetro	U-nat. (pase ún.)	Th/U-235	Th/Pu (aislado)	Asociación U-nat. + Th/Pu
KWe instalado a fecha de p.en. m. (\$)	1562.6	1591.1	1503.9	1523.3
KWhe producido (m\$)	12.9	13.1	12.4	12.6

VI. 2.- Costos unitarios del ciclo de combustible

La tabla N° 13 da los costos unitarios de cada etapa del ciclo utilizados en el cálculo hecho en ref. 26 y resumido en la sección precedente.

TABLA N° 13

Valores de referencia de los parámetros económicos del ciclo de combustible (costos unitarios) tomados de ref. 26 (\$ = dólares canadienses 1978).

Etapa del Ciclo	Costo unitario
- Precio del Concentrado de U (U_3O_8)	99 \$ / kg U_3O_8 (=117\$ / kg U)
- Precio del Concentrado de Th (ThO_2)	20 \$ / kg Th
- Fabr. de E.C. UO_2 a U-nat. (incluyendo la conversión a 2UO_2)	55 \$ / kg U
- Conversión completa U_3O_8 a UF_6	5 \$ / kg U
- Enriquecimiento de U	100 \$ / S.W.U.
- Fabr. de E.C. Th (ThO_2 + físil) inactivos	75 \$ / kg E.P.
- Fabr. de E.C. Th (ThO_2 + físil) activos	140 \$ / kg E.P.
- Reprocesamiento (incl. almacen. desechos) fase U en ciclo del Th	110 \$ / kg E.P.
- Reprocesamiento (incl. almacen. desechos) fase Pu en ciclo del U	88 \$ / kg E.P.

Este juego de parámetros en el momento actual (principios de 1981) aparece como fuertemente favorable a la competitividad de los ciclos del torio. En efecto, se puede decir que los valores elegidos en ref. 26 acentúan exageradamente los parámetros económicos en la dirección de aumentar los costos del combustible de la estrategia U-nat. pase único y de disminuir los correspondientes a las estrategias a base del ciclo del torio:

- Altos precios del concentrado de uranio
- Bajos precios del concentrado de torio
- Bajos costos de reprocesamiento

- Muy bajos costos de fabricación de E.C. activos, propios del ciclo del torio.

A continuación se verán valores generalmente más realistas en la actualidad, o bien propuestos por otras fuentes para cada uno de estos ítems. Esto debe tomarse sin perjuicio del hecho de que siendo Canadá un país con importantes recursos de Th y de U, su perspectiva del problema esté más condicionada por sus elementos internos que por los precios del mercado internacional en lo que respecta a esos minerales, lo cual evidentemente no sería nuestro caso (Ver capítulo II).

VI. 3.- Costos de los concentrados de U y de Th

La situación actual en esta área ya fue discutida en el capítulo II. Comparando aquello con los valores utilizados en ref. 26 vemos que resulta lo siguiente:

a) Concentrados de U

En el mercado internacional el precio del concentrado de uranio a la fecha se sitúa alrededor de 60 \$ el kg de U, prácticamente la mitad del valor dado en la tabla N° 13.

b) Concentrados de Th

Por su muy baja demanda y la consiguiente muy baja producción, la estimación del precio del concentrado de torio es mucho más vaga. Si bien se produjo en los últimos años a precios del orden de 24 \$ el kg de Th, las estimaciones para una eventual explotación en gran escala hacen subir ese precio a valores de 40 - 80 \$ el kg de Th y aún mayores (Ref. 18 y 19).

La situación para los recursos argentinos de U y de Th es, a su vez, muy distinta. Por razones de coyuntura económica, el costo actual^(*) del concentrado de uranio es muy elevado (del orden de 200 \$ el kg de U). Por otra parte no solo no existe explotación alguna de Th, sino que las evidencias de que se disponen apuntan todas a un muy modesto volumen de recursos de Th en nuestro territorio.

(*) Principios de 1981.

VI. 4.- Costos de refabricación de E.C. inactivos y activos

Los costos adoptados como referencia en ref. 26 son de 75 \$ y 140 \$ canadienses 1978 respectivamente. No existen muchas estimaciones publicadas de estos parámetros que son de los más cruciales para la competitividad comercial del ciclo del Th en centrales nucleoelectricas. Esto no debe sorprender si se tiene en cuenta el conocimiento embrionario del problema y que la larga etapa de desarrollo, prevista en 20 años más por AECL, conduce en este momento a una visión muy modesta de la economía de una planta industrial de fabricación de E.C. activos con manipulación a distancia tras importantes blindajes gamma para la casi totalidad de las operaciones.

No obstante y a título de comparación, es importante mencionar las estimaciones realizadas en forma independiente en USA para Noviembre de 1979 (Ref.28). Allí se encuentran valores considerablemente mayores que los anteriores. Expresados en u\$s de 1979 (lo que apenas cambia la escala) y para E.C. de reactores LWR por unidad de masa de combustible (lo cual tampoco es una modificación cualitativa en los costos), se tiene:

a) E.C. Th con adición de Pu

Sería el caso de la carga inicial (combustible no-activo); el blindaje requerido es modesto y es esencialmente el que corresponde al Pu. Las estimaciones corresponden a considerar un alto o un bajo interés en la financiación de la planta, y al uso o no de blindajes para mantenimientos. Ellas son:

a.1) Bajo interés

Sin blindaje-mantenimiento:	378 \$ / kg E.P.
Con blindaje-mantenimiento:	580 \$ / kg E.P.

a.2) Alto interés

Sin blindaje-mantenimiento:	562 \$ / kg E.P.
Con blindaje-mantenimiento:	885 \$ / kg E.P.

b) E.C. activos (Th + ²³³U)

Sería el caso de E.C. fabricados con combustible reprocesado, lo usual para las recargas de E.C. a la central en operación. Los valores son:

- Bajo interés:	572 \$ / kg E.P.
- Alto interés:	874 \$ / kg E.P.

Obviamente estos últimos valores son los de mayor peso en el cómputo del costo unitario de generación especialmente si la estrategia posee un quemado de extracción no demasiado elevado.

VI. 5.- Costos de reprocesamiento

Caben aquí los comentarios generales de la sección anterior en cuanto a la dificultad de una estimación realista. Sin embargo existe un cierto nivel reciente de reprocesamiento a escala comercial ejecutado esencialmente por United Reprocessors que engloba las capacidades en la materia de Francia, Gran Bretaña y Alemania Federal, en las grandes plantas de La Hague (Fr.) y Windscale (G.Br.). En este caso se trata, desde luego, de la recuperación de Pu de E.C. de centrales tipo PWR, BWR y en menor medida de las restantes de Europa Occidental y Japón.

Las estimaciones para E.C. de ciclos de torio en centrales LWR dadas en ref. 28 nuevamente son superiores al valor de 110 \$ / kg E.P. adoptado en el estudio de AECL de ref. 26. Esas estimaciones son:

- Bajo interés: 142 a 155 \$ / kg E.P.
- Alto interés: 299 a 324 \$ / kg E.P.

VI. 6.- Efectos de los costos unitarios del ciclo de combustible sobre el costo del KWhe

Un aspecto de importancia a considerar es el impacto de los costos unitarios del ciclo sobre el costo final del KWhe generado. Para un incremento de 100 \$ en el costo unitario de cada una de las etapas del ciclo por separado, en ref. 26 se encontraron los incrementos en los costos del KWhe dados en la tabla N° 14.

Se observa en particular que si bien la estrategia Th-referencia con adición de Pu es la menos sensible a incrementos en el precio del uranio natural (ya que hace una elevada utilización global del mismo), es en cambio extremadamente sensible a los costos de reprocesamiento, los que en esta estrategia aparecen por las contribuciones de ambos sistemas de centrales (a U-nat. y a Th/Pu). Para la

TABLA N° 14

Efectos de los costos unitarios del ciclo de combustible sobre el KWhe. Valores en milésimos de dólares canadienses 1978. Incrementos independientes de 100 \$ en cada rubro. Estrategias U-nat. pase único y Th-referencia.

Parámetro	U-nat. (pase ún.)	Th-ref. + Pu	Th-ref. + U-235
Costo de Referencia KWhe	12.9	12.6	13.1

INCREMENTOS DE 100 \$ EN:			
- Costo del concentrado de U (por kg U)	2.16	0.72	1.15
- Enriquecimiento (por SWU)	----	----	1.39
- Reprocesamiento (por kg E.P.)	----	1.52	0.40
- Fabricación E.C. activos (por kg E.P.)	----	0.35	0.40

estrategia Th-referencia con adición de ^{235}U lo que interviene es directamente la suma de los costos unitarios de reprocesamiento más refabricación, de allí que los efectos de estos parámetros por separado sean idénticos.

Cabe notar que los impactos de los costos unitarios de reprocesamiento y refabricación en ambas variantes de la estrategia Th-referencia son, a su vez, moderados gracias al elevado quemado de extracción Q_{ex} de esta estrategia, con lo que se minimiza el número de operaciones del ciclo externo. Para otras estrategias Th con menores valores de Q_{ex} , estos valores se incrementarán aproximadamente en forma inversa a Q_{ex} . Ellos serían por lo menos 3 veces superiores para la estrategia Autosuficiente en el Equilibrio (Ver Tabla N° 6).

VI. 7.- Reexaminación de los costos propuestos

De lo anterior resulta evidente que si uno aplicara otros juegos de costos unitarios del ciclo, en particular usando los valores reales actuales para el concentrado de uranio y, para los restantes parámetros, valores elegidos entre los propuestos en refs. 18 y 28 resultarían costos del KWhe mayores para las estrategias Th. Por lo antes mencionado dicho aumento en el costo del KWhe sería moderado en la estrategia Th-referencia (alto valor de Q_{ex}) y máximo en la Th-autosuficiente (mínimo valor de Q_{ex}).

Esto es así pues sistemáticamente los valores dados en esas referencias incrementan el costo del concentrado de Th, y sobre todo los costos de reprocesamiento y de refabricación de E.C. activos.

Concretamente si se toma el precio actual del concentrado de U, 60 \$ / kg U, se produciría un descenso en los costos de las tres estrategias, pero este descenso sería del orden de 1 m\$ en el caso U-nat. pase único mientras que sería de solo la mitad de ese valor o aún menos en las estrategias Th-referencia. En contrapartida, si consideramos los costos propuestos en ref. 28 para la fabricación de E.C. activos, p.ej. en el caso más optimista de bajo interés (572 \$ / kg E.P.), mientras el KWhe obviamente no variará en el caso U-nat. pase único, se produciría un incremento de 1.7 m\$ en las estrategias Th-referencia. Algo similar ocurrirá con los costos de reprocesamiento, y en ese caso la más afectada es evidentemente la estrategia Th-ref. con adición de Pu.

Para concluir es interesante notar que en las estrategias Th entra generalmente la suma directa (o de lo contrario ponderada) de los costos de reprocesamiento y refabricación como parámetro que determinará el costo del KWhe. Dicha suma en ref. 26 vale 250 \$ / kg E.P. en el caso más desfavorable (valor máximo), mientras que en ref. 28 en las mismas condiciones pero buscando el valor mínimo (bajo interés) valdría 720 \$ / kg E.P. Es interesante notar entonces que de los estudios de sensibilidad realizados por AECL (ref. 26) surge que, si adoptamos el último valor y manteniendo todos los demás parámetros sin cambios, la estrategia Th-referencia con adición de ^{235}U recién se haría competitiva frente a la actual U-nat. pase único para un precio del concentrado de U del orden de los 600 \$ / kg U, el cual es unas diez veces superior al

actual. Para el caso Th-referencia con adición de Pu la situación es levemente mejor: esta estrategia poseería el mismo costo del KWhe generado que la estrategia actual CANDU-PHW/U-nat. pase único para un precio del concentrado de uranio de 400 \$ / kg U.

VII.- EVALUACION PRELIMINAR Y
CONCLUSIONES

VII. 1.- Evaluación preliminar

Si nos atenemos al cuadro actual aquí descrito, se puede establecer en forma preliminar que la utilización del ciclo del torio en centrales nucleares a agua pesada no surge como una alternativa claramente interesante para nosotros, como lo harían pensar a priori las consideraciones básicas de la reproducción de materia fisible con este elemento. Este resultado se apoya en los siguientes elementos:

- Las muy modestas reservas de Th actualmente conocidas sobre nuestro territorio, así como las indicaciones últimas de prospección de Th que tienden al mismo resultado. A ello se une la falta de un interés internacional generalizada por este elemento, lo cual puede resultar en un factor adverso no solo en lo que respecta la producción y precio del mineral sino otros aspectos específicos del ciclo de combustible cuya tecnología estará en manos de un mínimo de proveedores y posiblemente la misma tendrá también un mínimo de clientes.
- El importante esfuerzo de desarrollo que, a nivel internacional, se debe realizar para demostrar la factibilidad y a continuación implementar el ciclo externo del combustible. Las estimaciones canadienses, repetidas en numerosas oportunidades, sitúan el comienzo de la etapa a escala comercial para después del año 2000, teniendo en cuenta los 20 años estimados como necesarios para los programas de desarrollo previos.
- Los ahorros moderados de uranio que se logran en la primera generación de centrales a lo largo de sus 30 años de vida útil nominal, debido a los elevados inventarios físeles que deberán acumularse previamente para poder arrancar esas centrales.

- Finalmente la competitividad económica de las centrales a torio está subordinada a mantener muy moderados costos de reprocesamiento y de fabricación de E.C. activos en conjunción con precios muy elevados del concentrado de uranio que encarezcan apreciablemente el KWhe de las centrales a U-nat. pase único.

VII. 2.- Conclusiones

El objetivo del presente trabajo fue reunir los elementos de peso para evaluar y eventualmente decidir acciones respecto de la introducción del ciclo del torio en nuestra línea de centrales a agua pesada, en particular en la variante CANDU. Se puso énfasis en coleccionar la mayor información de importancia, y además actualizada, tanto de AECL como de otras fuentes, así como la inclusión de ciertos datos, valores de parámetros o conclusiones parciales resultantes de nuestra propia labor.

Consideramos que en el estado actual no es posible llegar a una decisión definitiva al respecto, aún sin considerar otras vías alternativas de reactores de potencia avanzados, como los reactores rápidos. Más aún, tal decisión no surge como de premura si se tiene en cuenta que para Canadá la introducción comercial de las Centrales D₂O/Torio sería para después del año 2000, con lo cual y teniendo en cuenta el avance canadiense en la materia resultaría para nuestro país una introducción eventual dentro de unos 30 años.

Sin embargo, consideramos que con cierta periodicidad deberá reactualizarse el conjunto aquí presentado, particularmente en lo que concierne a algún cambio cualitativo en el conocimiento de recursos de torio en nuestro territorio, al plazo total estimado como necesario para el desarrollo del ciclo externo del combustible a base de torio y a los costos de reprocesamiento y de fabricación de E.C. activos propios del ciclo del torio. Esto es así pues cualquiera de estas circunstancias puede modificar en profundidad las conclusiones anteriores.

AGRADECIMIENTO

El autor desea manifestar su agradecimiento al Dr. H.J. Erramuspe por haber impulsado la iniciación de este trabajo y por haberle suministrado abundante documentación técnica, recopilada por él, que fue de utilidad para su preparación. Agradece asimismo al Dr. M.B.A. Crespi por sus valiosos comentarios y su sostenido apoyo y por la revisión crítica de la totalidad del manuscrito final.

R E F E R E N C I A S

- 1.- C. CASTRO MADERO, "Nuclear Power Requirements in the Argentine Republic". World Energy Conference, Munich, Alemania Federal, Sept. 1980.
- 2.- "Utilization of Thorium in Power Reactors". Proceed. of I.A.E.A. Panel in Vienna.- I.A.E.A., T.R.S. N° 52 (1966)
- 3.- M. SARRACENO, "Utilización del torio en reactores de potencia". Informe Depto. de Física, C.N.E.A. (1976)
- 4.- G.A. PON, W.B. LEWIS, L.R. HAYWOOD, D.B. PRIMEAU, G.J. PHILLIPS and E. MERLO, "Prospective D₂O Moderated Power Reactors". Proceed. of 3rd. International Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneve. U.N. Vol. 5, p. 333 (1964).
Ver también:
W.B. LEWIS, "How much of the Rocks and Oceans for Power? Exploiting the Uranium-Thorium Fission Cycle. Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 1916 (1964)
- 5.- W.B. LEWIS, M.F. DURET, D.S. CRAIG, J.I. VEEDER and A.S. BAIN, "Large-scale Nuclear Energy from the Thorium Cycle". Proceed. of 4th. Internat. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneve. U.N. Vol. 2, p. 239 (1971)
- 6.- A.J. MOORADIAN, "Future Variants on the CANDU Theme". Energia Nucleare, 21 (4), 209 (1974) y simultan. AECL - 4775.
Ver también:
A.J. MOORADIAN, "Energy for Five Thousand Years". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 4845 (1974).
Ver también:
A.J. MOORADIAN, "CANDU - Economic Alternative to the Fast Breeder". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 4916 (1974).
- 7.- J.S. FOSTER and E. CRITOPH, "Advanced Fuel Cycles in Heavy-water Reactors". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 5735 (1976)
Ver también:
J.S. FOSTER, "The Future for CANDU". Canadian Nuclear Association 17th. Annual Internat. Conf. Montréal, June 1977.
- 8.- S. BANERJEE, E. CRITOPH, R.G. HART, "Thorium as a Nuclear Fuel for CANDU Reactors". Canadian Journ. of Chem. Eng. 53, 291 (1975).
Ver también:

- S.R. HATCHER, S. BANERJEE et al., *"Thorium Cycle in Heavy-water Moderated Pressure Tube (CANDU) Reactors"*. Trans. of the American Nuclear Society, 22, 334 (1975) simult. Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 5398 (1975)
- 9.- M.F. DURET, *"Introducing Advanced Nuclear Fuel Cycles in Canada"*. Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 6202 (1978)
Ver también:
M.F. DURET and H. HATTON, *"Some Thorium Fuel Cycles Strategies"*. Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 6414 (1979)
- 10.- N.C. DAVIDS. C.N.E.A., Gerencia de Exploración. Comunicación personal (1980)
- 11.- L.M. ETCHART. C.N.E.A., Gerencia de Producción de Materias Primas Nucleares. Comunicación personal (1980)
- 12.- J.F. VILLAR FABRE, A.M.O. SANTOMERO y H.N. LUCERO, *"Los minerales de torio en Argentina"*. C.N.E.A. Buenos Aires (inédito) (1958)
- 13.- V. ANGELELLI, *"El torio, sus minerales, yacimientos, producción y destino"*. C.N.E.A. Buenos Aires (inédito) (1961)
- 14.- A.M.O. SANTOMERO, *"Situación actual del torio en la Argentina"*. C.N.E.A., Gerencia de Exploración. Inf. Int. Div. Prospección (1978)
- 15.- A.L. COCO. C.N.E.A., Gerencia de Exploración. Comunicación personal (1980)
- 16.- *"Uranium Resources, Production and Demand"*. N.E.A./I.A.E.A. Report Dec. 1979.
- 17.- Inter-Informations, Commissariat à l'Energie Atomique. N°84, Nov. 1980.
- 18.- International Nuclear Fuel Cycle Evaluation. *"Fuel and Heavy Water Availability"*. Report of INFCE Working Group 1. I.A.E.A., Viena (1980)
- 19.- S.A. WEAKLEY, J.K. YOUNG, *"Economic and Environmental Analysis of Thorium Oxide Production"*. Trns. of the American Nuclear Society, 32, 353 (1979)
- 20.- J. VEEDER, *"Thorium Fuel Cycles in CANDU"*. Trans. of the American Nuclear Society, 29, 267 (1978) y simultáneamente Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 6254 (1978)

- 21.- M.S. MILGRAM, "Potential of Axial Fuel Management Strategies in Thorium - fuelled CANDU's ". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 6182 (1978)
- 22.- R.E. KAY, "Some Physics Scoping Studies on Fuel Bundles for Use in Enriched UO_2 and ThO_2 fuelled CANDU - PHW Reactors ". Canadian Nuclear Association Conf. June 1979.
- 23.- D.J. CAMERON, "A Review of the Potential for Actinide Redistribution in CANDU- Thorium Cycle Fuels". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 5962 (1978)
- 24.- International Nuclear Fuel Cycle Evaluation. "Advanced Fuel Cycle and Reactor Concepts". Report of INFCE Working Group 8. I.A.E.A., Viena (1980)
- 25.- "Conceptual Design of a Quasi - Homogeneous Pressurized Heavy Water Reactor to be Operated in the Closed Th - U_{233} Fuel Cycle". Fed. Rep. of Germany Report to INFCE. INFCE/DEP/WG.8/21 (1980)
- 26.- "Data Base for a CANDU - PHW Operating on the Thorium Cycle". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 6595 (1979). Canadian Report to INFCE. INFCE/WG8/CAN/DOC 4 (1980)
- 27.- M.A. FERADAY, "Remote Fabrication of $(^{233}U,Th)O_2$ Pellet-Type Fuels for CANDU Reactors". Trans. of the American Nuclear Society, 32, 233 (1979)
- 28.- C.M. HEEB and A.M. NOLAN, "Comparisons of Alternative LWR Fuel Cycles Containing Thorium". Trans. of the American Nuclear Society, 33, 403 (1979)
- 29.- J.B. SLATER, "An Overview of the Potential of the CANDU Reactor as a Thermal Breeder". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 5679 (1977)
- 30.- E. CRITOPH, S. BANERJEE, F.W. BARCLAY, D. HAMEL, M.S. MILGRAM and J.I. VEEDER, "Prospects for Self - Sufficient Equilibrium Thorium Cycles in CANDU Reactors". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 5501 (1976)
- 31.- K.W. DORMUTH and R.F. LIDSTONE, "A Study of the Running - in Period of a CANDU - PHW Thorium Converter". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 5391 (1977)

- 32.- S. BANERJEE and F.W. BARCLAY, "*Characteristics of Plutonium - topped Thorium Cycles in Heavy-water-moderated Pressure Tube Reactors*". NUCLEAR TECHNOLOGY, 43, 55 (1979)
- 33.- W.B. LEWIS, "*The Super - Converter or Valubreeder, a Near - Breeder Uranium - Thorium Nuclear Fuel Cycle*". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 3081 (1968)
- 34.- "*Data Base for a CANDU - PHW Operating on a Once - through Natural Uranium Cycle*". Atomic Energy of Canada Ltd., AECL - 6593 (1979). Canadian Report to INFCE. infce/WG8/CAN/DOC 2 (1980)
- 35.- J. FINK, G. GARCIA, "*Calculo de parámetros de celda, composiciones isotópicas y coeficientes de reactividad para la Central Nuclear en Embalse*". C.N.E.-F- 4/79 (1979)

A N E X O S

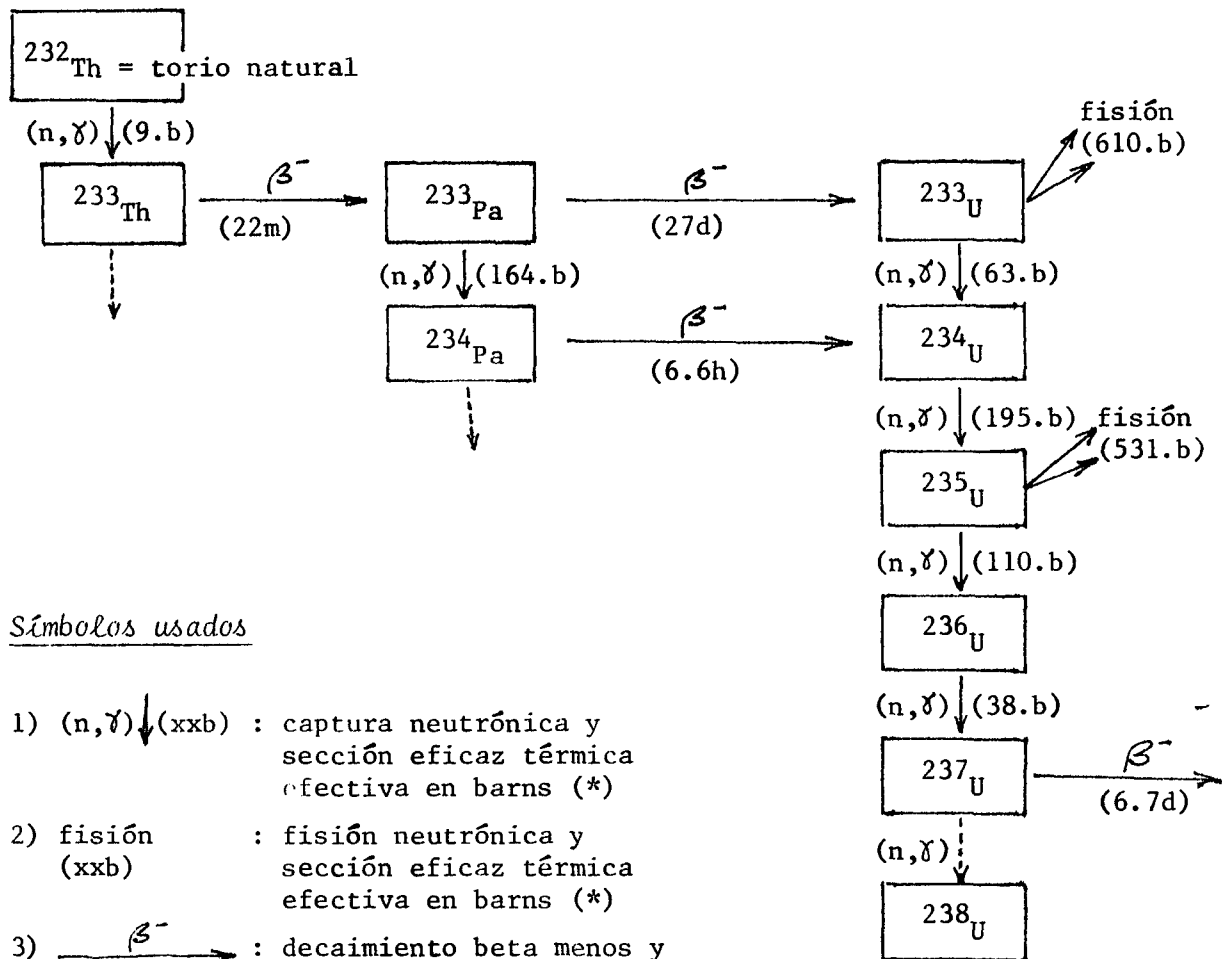
A N E X O N° 1

CICLO NUCLEAR DEL TORIO - 232

Torio

Protoactinio

Uranio



Símbolos usados

- 1) $(n, \gamma) \downarrow (xxb)$: captura neutrónica y sección eficaz térmica efectiva en barns (*)
- 2) fisión (xxb) : fisión neutrónica y sección eficaz térmica efectiva en barns (*)
- 3) $\xrightarrow{\beta^-} (xxd, h, m)$: decaimiento beta menos y período en días, horas o minutos.
- 4) $(n, \gamma) \downarrow$: capturas neutrónicas muy poco frecuentes en núcleos inestables beta menos.

(*) Valores típicos para celdas tipo CANDU-PHW con combustible a base de Th-232 / U-233.

A N E X O N° 2

FACTORES DE CONVERSION NEUTRONICO
Y GLOBAL DEL CICLO.

A2. 1.- Factor de Conversión Neutrónico

El factor de conversión neutrónico C de un combustible nuclear que contiene un nucleído físil i y un nucleído fértil e del cual se produce posteriormente (*) por decaimientos radioactivos el físil i , se define como la relación entre el N° de núcleos i producidos por seg. y el N° de núcleos i consumidos por seg.

$$C = \frac{N_e \cdot \int_0^{\infty} \sigma_c^e(E) \cdot \phi(E) \cdot dE}{N_i \cdot \int_0^{\infty} \sigma_a^i(E) \cdot \phi(E) \cdot dE} \quad (1)$$

La notación es la usual:

N = densidad numérica del nucleído e, i en átomos/cm³

σ = sección eficaz microscópica de los nucleídos e, i , para las reacciones de captura, c , o absorción, a , (captura + fisión), a la energía neutrónica E . (barns)

ϕ = flujo neutrónico por unidad de energía E
(neutrones/ cm² . seg . eV)

La relación (1) es válida cuando toda reacción de captura en e conduce sin pérdidas a la creación de un núcleo i . El valor de C , en cambio, se hace menor que el 2° miembro de (1) cuando alguno/s de los nucleídos intermedios de la cadena radioactiva de e a i es interferido por el flujo neutrónico y, de esta forma, las capturas en el mismo al cortar dicha cadena, disminuyen la producción de núcleos i . Es el caso en que se tienen: elevados flujos neutrónicos, elevada σ_c de algún nucleído j de la cadena y vida media relativamente larga de este nucleído j . (En el caso del ciclo del torio, esto sucede para el ²³³Pa en reactores de alto flujo; ver Anexo N° 1).

El valor de C depende en primer lugar de la composición detallada del material combustible así como de la configuración que lo ro-

(*) Luego de una captura neutrónica.

dea y que condiciona en buena parte la dependencia en la energía del flujo neutrónico. En un reactor el valor de C antes definido depende de la posición, sea porque los E.C. no son todos idénticos, sea porque aún idénticos poseen diferente quemado Q y por lo tanto diferente composición detallada o aún porque el flujo puede variar espacialmente. Para un reactor con E.C. idénticos se suele definir un valor promediado en el espacio de todo el reactor, $\langle C \rangle^{(*)}$, mientras en este caso otro parámetro de gran interés es C como función del quemado Q . Para un reactor con E.C. distintos, pero agrupados en varias zonas de E.C. idénticos, como es el caso de los reactores rápidos, se prefiere definir los valores promediados espacialmente en cada zona del reactor. (En el mismo ejemplo se trataría de: núcleo interno, núcleo externo, coberturas superior, inferior, lateral).

En el caso de los reactores térmicos de baja conversión, C suele alcanzar su valor máximo para combustible fresco ($Q = 0$); éste se denomina "factor de conversión inicial", C_0 . Luego, la acumulación de productos de fisión con su fuerte capacidad de capturar neutrones hace disminuir progresivamente el valor de C al aumentar Q , dado que los nuevos absorbentes presentes restarán neutrones que de otro modo podrían ser absorbidos por el fértil e . A quemados más elevados nuevos nucleidos físiles (caso del plutonio) pueden aparecer complicando la variación de C con Q . En el caso de ciclos de uranio a partir del ^{235}U se acostumbra tomar la relación entre todos los físiles supuestos equivalentes: Producción de ($^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$) / Destrucción de ^{235}U .

La tabla N° A2.1 da ejemplos de valores de C en casos de interés.

A2. 2.- Pérdidas en Reprocesamiento y Refabricación de E.C.

Las pérdidas de materia físil en el ciclo externo del combustible juegan un papel importante en el aprovechamiento global de materiales nucleares y en la economía del ciclo; ellas se darían especialmente en el reprocesamiento y en menor grado en la refabricación de los E.C.

Sean p_p y p_f respectivamente las pérdidas relativas en el reprocesamiento y en la refabricación, y p la suma de ambas can-

(*) Deben tomarse los promedios de las reacciones del numerador y del denominador de (1) separadamente.

TABLA N° A2.1

Ejemplos de factores de conversión neutrónicos.

Reactor	Quemado	C
- C.N. Embalse (CANDU-PHW/U-nat. 600 MWe)	0 equilibrio	0.82 0.77
- CANDU-PHW/Th-referencia con toping de U-235 (conceptual)	carga inic.U-235 equilibrio, (U-233 + U-235)	0.81 0.88
- CANDU-PHW/Th-autosuficiente (conceptual)	equilibrio,U-233	1.01
- SUPER-PHENIX I (central a reactor rápido, 1200 MWe, en construcción)	equilibrio, Pu.	1.18

tidades.

En una estrategia con ciclo de torio con adición de ^{235}U , toda la materia fisible se encontrará en la fase uranio de un mismo combustible reprocesado que luego pasará a la etapa de refabricación, de manera que las pérdidas relativas totales serán simplemente p. En caso de emplearse Pu como fisible adicional, las pérdidas relativas totales se deberán calcular a partir de un valor ponderado $\bar{p}_p$ de las pérdidas relativas en los reprocesamientos de combustibles a base de torio (fase uranio) y a base de uranio (fase plutonio).

A2. 3.- Presencia de ^{238}U

Cuando la adición de fisible ^{235}U se hace por medio de uranio altamente enriquecido en ^{235}U (gama 90 - 93 %), la cantidad de ^{238}U presente en el combustible es pequeña y, por consiguiente, el Pu generado en la irradiación es despreciable. En cambio cuando el enriquecimiento es apreciablemente menor, el Pu a generarse puede tener su importancia en el balance de materia fisible. Su eventual recuperación en el reprocesamiento de combustible a base de torio estará dictada por razones económicas teniendo en cuenta el incremento en la multiplicación global de fisible en el ciclo. Sin embargo, el uso de uranio con un contenido importante de ^{238}U penaliza fuertemente el quemado de extracción y el factor de conversión

neutrónico (Ver sección IV.6 del texto principal).

A2. 4.- Factor de Conversión Global del Ciclo

Las pérdidas relativas totales en el ciclo, p , poseen un efecto equivalente a una reducción del factor de conversión neutrónico. El resultado es un valor $\hat{C}$, que denominaremos Factor de Conversión Global del Ciclo, menor que el valor neutrónico C en una cantidad que depende de p . Para obtener la expresión completa conviene recordar que el factor de conversión da el número de núcleos físis formados luego del consumo de un núcleo físil inicial. Como veremos en el Anexo N° 3, el concepto de $\hat{C}$ tiene utilidad en el rango $\hat{C} \leq 1$ por definir en tal caso la multiplicación de físil (ciclo de combustible "convertidor").

Sea M_0 el inventario total de físil de un reactor (dentro y fuera del mismo) cuyos E.C. se irradian hasta un quemado de extracción relativo ($0 \leq q \leq 1$) promedio q . Si consideramos un ciclo de irradiación en el cual la totalidad de E.C. de M_0 es irradiada hasta el valor q , se habrá consumido una masa físil $M_0 \cdot q$, mientras simultáneamente se habrá generado una masa físil $M_0 \cdot q \cdot C$. La masa total de físil retirada del reactor luego de irradiarse será entonces $M_0 \cdot [1 - q \cdot (1 - C)]$, la cual al pasar por el ciclo externo del combustible (reprocesamiento + refabricación) se verá disminuida en un factor $(1 - p)$.

Para mantener un régimen de equilibrio en la operación del reactor y de la totalidad del ciclo, según el valor de C , se requerirá el ingreso de una masa físil adicional total A . Llamando $\alpha = q \cdot (1 - C)$, se tendría la siguiente secuencia:

Inventario inicial y de equilibrio:	M_0
Inventario a la salida del reactor:	$M_1 = M_0 \cdot (1 - \alpha)$
Inventario al final del ciclo externo:	$M_2 = M_0 \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - p)$
Adicional físil para mantener el equilibrio durante un ciclo de irradiación completo:	$A = M_0 - M_2$
Consumo de físil en el ciclo de irradiación:	$K = M_0 \cdot q$

Convendremos en definir el "factor de conversión global del ciclo" $\hat{C}$ como la relación entre la producción neta de físil^(*) en un ciclo completo y el consumo correspondiente:

$$\hat{C} = \frac{K - A}{K} \quad (2)$$

Este se expresa en función del factor de conversión neutrónico C , de las pérdidas de físil en el ciclo externo p y del quemado relativo del combustible q , como :

$$\hat{C} = C \cdot (1 - p) - p \cdot \left(\frac{1}{q} - 1 \right) \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que tanto p como q son números en el intervalo $(0 ; 1)$, vemos que las pérdidas p equivalen a una reducción efectiva del factor de conversión neutrónico. La diferencia entre C y $\hat{C}$ aumenta al aumentar las pérdidas p y al disminuir el quemado q .

Situaciones límites son las siguientes:

a) Ciclo externo ideal sin pérdidas

$$p = 0 \quad \hat{C} = C \quad (\text{cualquiera sea el quemado}) \quad (4)$$

b) Quemado de extracción límite o total (100 %)

$$q = 1 \quad \hat{C} = C \cdot (1 - p) \quad (5)$$

lo que corresponde a las pérdidas por reprocesamiento y refabricación una única vez de todo el nuevo físil generado, el cual se produce en un solo ciclo de irradiación mientras todo el físil inicial es consumido.

c) Reactor con regeneración unitaria

$$C = 1 \quad \hat{C} = 1 - \frac{p}{q} < 1 \quad (6)$$

d) Estrategia Autosuficiente ($\hat{C} = 1$)

Es fácil ver que en este caso C debe ser mayor que la unidad. Sea $B = C - 1 > 0$; las pérdidas máximas admisibles en el ciclo externo para esta estrategia están dadas por:

(*) La producción neta puede escribirse como la diferencia entre lo consumido, K , y lo adicionado para mantener el equilibrio, A .

$$p = \frac{B}{B + 1/q} \quad (7)$$

Si se tiene en cuenta, además, que normalmente será $B \ll 1$ y $0 < q \leq 1$ resulta :

$$p \approx B \cdot q, \text{ o bien } B \approx p/q \quad (8)$$

e) Caso límite de producción neta nula

Es interesante notar como caso límite que en todo reactor convertidor con un cierto C, si el quemado de extracción es suficientemente bajo y las pérdidas relativas p elevadas, se podría llegar a la paradoja de no producir en forma neta materia físil alguna. Tal ciclo de combustible en extremo ineficiente llegaría a tener así un factor $\hat{C} = 0$, y en el mismo, todo el nuevo físil producido en el reactor desaparecería debido a una pérdida total igual de físil en el ciclo externo.

NOTA : No debe confundirse el quemado relativo q (expresado como un número entre 0 y 1, o bien en forma porcentual) con el quemado Q utilizado en el texto principal. Mientras q está referido a la masa de materia físil inicial, Q está referido a la masa de elementos pesados (físiles y no-físiles) inicial.

MULTIPLICACION DEL COMBUSTIBLE Y

EFFECTO DE LAS PERDIDAS EN EL CICLO .

A3. 1.- Multiplicación ideal del combustible (pérdidas nulas)

Como es conocido, el inventario inicial de físil asociado a un reactor (dentro y fuera del mismo) M_o , cuyo combustible posee un factor de conversión neutrónico C , una vez irradiado y consumido en forma total habrá dado lugar al mismo tiempo a la formación de una masa físil $M_o \cdot C$ a partir del fértil presente, la cual al ser irradiada en ciclos sucesivos conducirá a una multiplicación del inventario físil inicial. Reciclando un gran número de veces el físil disponible en cada ciclo, se habrá logrado transformar en físil y quemar una masa total M_{tot} dada por :

$$M_{tot} = M_o + M_o \cdot C + M_o \cdot C^2 + M_o \cdot C^3 + \dots = M_o + M_{et} , \quad (1)$$

donde M_{et} es la masa de fértil transformada. Dos posibilidades se presentan según sea $C < 1$ o bien $C \geq 1$. En el primer caso, si se considera idealmente un número infinito de ciclos sucesivos, la serie (1) converge evidentemente al valor:

$$M_{tot} = M_o / (1 - C) \quad (1')$$

Por el contrario, si $C \geq 1$ será teóricamente posible transformar la totalidad de la masa de fértil existente, M_e , al cabo de un cierto número finito de ciclos sucesivos:

$$M_{et} = M_e , \text{ o sea } M_{tot} = M_o + M_e \quad (2)$$

y la expresión (1) constará de un número finito de términos.

A3. 2.- Aplicación al ciclo $^{238}\text{U} / ^{239}\text{Pu}$

En los reactores de potencia comerciales actuales a uranio enriquecido (PWR, BWR) el aprovechamiento del uranio es sumamente poco eficiente. El ^{238}U es prácticamente no utilizado en absoluto en las fisiones, mientras el ^{235}U , que solo representa el 0.7 % del uranio natural, se utiliza solamente en parte puesto que una fracción importante del mismo se

pierde en las colas de las plantas de enriquecimiento y otra no alcanza a quemarse en el reactor y sale de éste en los E.C. gastados. De esta forma resulta un aprovechamiento neto del orden del 0.4 % del U natural en estos reactores.

En los reactores a agua pesada (CANDU o PHWR-KWU) a combustible U natural, se utiliza cerca del 0.7 % de dicho uranio, al menos considerando conceptos de 1000 MWe; 0.5 % corresponde a ^{235}U con lo cual los E.C. gastados poseen un contenido del orden del 0.2 % ^{235}U en el uranio; el restante 0.2 % utilizado corresponde a ^{238}U transformado en plutonio y a su vez quemado. Otra parte del ^{238}U inicial (aprox. 0.3 - 0.4 %) se transforma también en Pu contenido en los E.C. gastados y que podría recuperarse a posteriori. Este aprovechamiento del ^{238}U , aunque muy modesto, se logra gracias al valor elevado del factor de conversión C de estos reactores ($C = 0.8$), a pesar del empleo a pase único junto con un bajo quemado de extracción.

Finalmente en los reactores rápidos se podría lograr idealmente (si no existieran pérdidas de materia en el ciclo externo) el aprovechamiento del 100 % del fértil ^{238}U (además del mismo aprovechamiento del físil ^{235}U). En efecto, estos reactores poseen un valor de C bastante mayor que la unidad, en consecuencia todo el ^{238}U teóricamente podría ser transformado en el físil ^{239}Pu y así utilizado en la fisión (Las capturas en el ^{239}Pu , al producir el fértil ^{240}Pu , no representan en sí mismas pérdida de materia del ciclo).

A3. 3.- Aplicación al ciclo $^{232}\text{Th} / ^{233}\text{U}$

Este ciclo propuesto mayormente para reactores térmicos, en particular los tipo CANDU-PHW, poseería valores de C en el entorno o algo inferiores a la unidad en los conceptos estudiados.

Dado que el elemento torio natural está formado solamente por ^{232}Th (no físil, aunque fértil), será necesario para su aprovechamiento disponer de inventarios físiles independientes obtenidos del U natural para poder iniciar la producción del físil ^{233}U a partir del ^{232}Th . Una estrategia con $C = 1$, y sin pérdidas en el ciclo externo, permitiría, entonces, el aprovechamiento del 100 % del torio al transformarlo en ^{233}U y así utilizarlo en la fisión.

Cuando C es menor que la unidad, y siempre en el caso ideal sin pérdidas, se podrá utilizar la fracción del total dada por la ecuación (1'). Como en los conceptos estudiados hasta el presente, C es normalmente menor pero muy cercano a la unidad, en esa ecuación se ve claramente que la masa total aprovechada, M_{tot} , es extremadamente sensible a mínimas variaciones de C . El pasaje de un valor $C_1 = 0.96$ a otro $C_2 = 0.98$, por ejemplo, duplica la masa total aprovechada. Pero en el presente caso, la masa total de torio aprovechada es función no solo de C sino también del inventario físil externo proveniente del uranio natural y puesto a irradiar junto al torio, M_o . De esta forma para $C < 1$ la estrategia de uso del torio es totalmente dependiente de la manera de emplear los recursos de uranio, en particular de la proporción de este último puesto a disposición de aquella estrategia, con lo cual debe más bien hablarse de una estrategia del ciclo torio - uranio.

A3. 4.- Efecto de las pérdidas de físil en el ciclo, en casos $\hat{C} < 1$

En el caso real en que se tienen pérdidas de materia físil en el ciclo externo del combustible y en que el factor de conversión global del ciclo $\hat{C}$ sea menor que la unidad, la multiplicación "máxima" de materia físil sigue la ecuación (1') reemplazando el factor neutrónico C , por el global del ciclo $\hat{C}$:

$$M_{tot} = \frac{M_o}{1 - \hat{C}} \quad (3)$$

Esto es así pues $\hat{C}$ equivale precisamente al factor efectivo de multiplicación de físil, tal como fue deducido en el Anexo N° 2. Esto es válido aún si C es igual o mayor que la unidad, pero con pérdidas y quemados tales que $\hat{C} < 1$.

A3. 5.- Pérdidas de materia fértil y multiplicación real con $\hat{C} < 1$

En la práctica el número de reciclados no será obviamente infinito sino un cierto número elevado determinado por limitaciones económicas y eventualmente técnicas, con lo cual M_{tot} en nuestro caso será inferior al segundo miembro de (3) y debería calcularse en base a un número finito de términos en la ecuación (1).

Más importante aún son las pérdidas de materia fértil que inevitablemente se producirán en el ciclo externo (reprocesamiento y

refabricación) en forma similar a las pérdidas de materia físil. Llamaremos p_e a las pérdidas relativas ($0 \leq p_e < 1$) de fértil a lo largo del ciclo externo.

El valor de la masa de fértil transformable, M_{et} , en este caso no puede expresarse en forma sencilla y su cómputo surgirá de un algoritmo dependiente de la estrategia específica considerada. Veremos aquí un caso simple.

Sea M_n el valor de la masa total de fértil transformable calculado con un número n de términos en la ecuación (1) usando $\hat{C}$ en lugar de C . Suponiendo por sencillez que toda la masa de fértil inicial a transformar atraviesa el ciclo externo junto con la masa de físil y suponiendo que $\hat{C} \cong 1$ de modo que se pueda despreciar la contribución del fértil adicional que eventualmente sería necesario para mantener el reactor operando en régimen de equilibrio, la secuencia del fértil sería la siguiente:

<u>t</u>	<u>Masa de fértil disponible para transformar.</u>	<u>Pérdidas en cada paso del ciclo externo.</u>
Inicial	M_n	
1 ^a . descarga	$M_n - M_o \cdot q \cdot C$	
Fin 1 ^{er} . cic. ext.	$(M_n - M_o \cdot q \cdot C) \cdot (1 - p_e)$	$(M_n - M_o \cdot q \cdot C) \cdot p_e$
2 ^a . descarga	$(M_n - M_o \cdot q \cdot C) \cdot (1 - p_e) - M_o \cdot q \cdot C$	
Fin 2° ciclo ext.	$\left[(M_n - M_o \cdot q \cdot C) \cdot (1 - p_e) - M_o \cdot q \cdot C \right] \cdot (1 - p_e)$	$\left[(M_n - M_o \cdot q \cdot C) \cdot (1 - p_e) - M_o \cdot q \cdot C \right] \cdot p_e$
etc, etc.		

El valor real de M_{et} será entonces la diferencia entre M_n y las pérdidas totales de fértil en los n ciclos externos.

Aquí se supuso una estrategia uniforme*) en régimen de equilibrio. De lo contrario, las expresiones tanto de los consumos como de las pérdidas de fértil serán distintas.

(*) Todo el combustible alcanza la misma irradiación y atraviesa en conjunto el ciclo externo, sufriendo idénticas pérdidas.

A3. 6.- Efecto de las pérdidas en el ciclo externo en casos $\hat{C} \geq 1$

En el caso en que $\hat{C} \geq 1$, la multiplicación de materia físil, o en otras palabras, el aprovechamiento de la materia fértil, solo depende de las pérdidas en el ciclo externo, tanto de materia físil como fértil. (El valor de $\hat{C}$ condicionará el tiempo de doblamiento y eventualmente, a través del quemado de extracción, el número de reciclados ejecutados en la práctica).

En este caso el valor límite de M_{et} es el 100 % del fértil presente. Es decir que, en lugar del parámetro M_n , tendremos directamente M_e , o sea la masa total de fértil asociada a un reactor y a su ciclo externo de combustible.

Nuevamente el cómputo de M_{et} en un caso real se hará a través de un algoritmo que dependerá de que se esté o no en equilibrio y especialmente de la estrategia elegida.

Como ilustración, consideremos el caso simple en que se tenga una estrategia con elevado quemado de extracción (caso reactores rápidos) en régimen de equilibrio, con un valor de $\hat{C}$ cercano a la unidad y con pérdidas relativas de físil y fértil en el ciclo externo idénticas entre sí, p. En tal caso, y a los fines del cómputo, la distinción entre físil y fértil pierde sentido. Siendo n el número total de veces que se reciclará el combustible para transformar en físil todo el fértil disponible y consumirlo, se tendrá la siguiente secuencia :

<u>t</u>	<u>Masa de físil+fértil presente a partir de M_e</u>	<u>Pérdidas en cada ciclo externo</u>
Inicial	M_e (masa fértil inicial)	
1 ^a . descarga	$\approx M_e$ (fértil+ nuevo físil)	

$$\begin{array}{lll}
 \text{Fin 1}^{\text{er}} \text{ cic. ext.} & \approx M_e \cdot (1-p) & \approx M_e \cdot p \\
 2^{\text{a}} \text{ descarga} & \approx M_e \cdot (1-p) & \\
 \text{Fin 2}^{\circ} \text{ ciclo ext.} & \approx M_e \cdot (1-p)^2 & \approx M_e \cdot (1-p) \cdot p \\
 \text{etc, etc.} & &
 \end{array}$$

En este caso sencillo la masa total de fértil aprovechada, M_{et} , estaría dada por :

$$M_{et} \approx M_e \cdot \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n (1-p)^{i-1} \cdot p \right\} \quad (4)$$

En lo anterior el valor de n se supuso dictado por el quemado de extracción, de manera de no dejar materia fértil sin transformar al final de los n reciclados. En la práctica, especialmente en las primeras épocas en que el fértil mineral es mucho más barato que el obtenido por reprocesamiento, n será un número establecido por criterios económicos, en cuyo caso en lugar de M_e en la ecuación (4) deberá utilizarse la masa de fértil M'_e que teóricamente se puede transformar luego de los n ciclos de quemado y reciclado fijados.

A N E X O N° 4

BALANCES DE COMBUSTIBLE EN UNA CENTRAL CANDU-PHW/U-NAT.

EXTRAPOLADA A 1000 MWe.

A4. 1.- Introducción

En la Ref. 34 se consigna una importante cantidad de datos de diseño y de operación de una central nuclear CANDU-PHW a U natural pa-se único standard de 638 MWe netos nominales, así como algunos datos de su extrapolación a 1000 MWe en las mismas condiciones. Con ellos se obten-drán aquí los inventarios interno y externo y el consumo de U natural en régimen de equilibrio, así como las masas de Pu- físil y de Pu- total ge-nerados por año calendario, con un factor de carga $L_f = 80 \%$ en todos los casos.

Los datos de nuestro interés en Ref. 34, en la comparación de ambos módulos son:

<u>Parámetro</u>	<u>Central 1</u>	<u>Central 2</u>
- <u>Pot. eléc. neta</u> , P_e (MWe)	638	1000
- Eficiencia neta (%)	29.2	idem.
- E.C.	Normal de 37 ba- rras (18.7 kg U)	idem.
- Longitud del núcleo (cm)	594.4	idem.
- N° total de <u>canales</u> , N_C	380	577
- <u>Quemado de extracción</u> , Q (MWd / ton U)	7000	7300

Por otro lado para el caso 638 MWe se tiene:

- <u>Inventario interno</u> de E.C., $\dot{I}_1 =$	4560 E.C.
- <u>Inventario externo</u> de E.C. frescos alma- cenados (0.5 años de operación al dado L_f), $\dot{I}_E =$	2431 E.C.

- Consumo anual calendario de E.C. (al L_f dado y con $Q_1 = 7000 \text{ MWd / ton.U}$), $\underline{CA}_1 = 4863 \text{ E.C.}$

A4. 2.- Inventarios y consumos de U natural

Los valores II_2 , IE_2 y CA_2 extrapolados a la central 2 (1000 MWe) cumplen las relaciones:

$$\dot{II}_2 = \dot{II}_1 \cdot \frac{NC_2}{NC_1}$$

$$\dot{IE}_2 = \dot{IE}_1 \cdot \frac{Pe_2 \cdot Q_1}{Pe_1 \cdot Q_2}$$

$$CA_2 = CA_1 \cdot \frac{Pe_2 \cdot Q_1}{Pe_1 \cdot Q_2}$$

Los mismos parámetros expresados como masas de U natural, Ii , Ie , Ca , se obtienen inmediatamente a través del contenido de aquél en cada E.C., 18.7 kg. Los resultados son los siguientes:

<u>Parámetro</u>	<u>Central 1</u>	<u>Central 2</u>
Pot. eléc. neta, Pe (MWe)	638	1000
II (E.C.)	4560	6924
IE (E.C.)	2431	3654
CA (E.C. / año cal.)	4863	7309
Ii (ton.U)	85.27	129.48
Ie (ton.U)	45.46	68.33
Ca (ton.U / año cal.)	90.94	136.68

Los resultados aquí obtenidos para la central extrapolada a 1000 MWe netos son un tanto diferentes de los dados en las Refs. 7 y 29 pero están basados en valores más conservativos, en particular Q , tomados de Ref. 34, la que además es más reciente.

A4. 3.- Producción de plutonio y requerimientos de U natural

En lo que concierne la producción de Pu, se interpoló el contenido de ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu y ^{242}Pu para combustible CANDU con va-

lores de Q de 7000 y 7300 MWd./ton U en la Ref. 35. Expresado en g /kg U inicial, resulta:

<u>Parámetro</u>	<u>7000 MWd/t U</u>	<u>7300 MWd/t U</u>
Pu- 239	2.314	2.333
Pu- 240	0.949	0.997
Pu- 241	0.205	0.218
Pu- 242	0.051	0.057
-----	-----	-----
Pu- físil	2.519	2.551
Pu- total	3.519	3.605

La producción anual de Pu en ambas centrales operando siempre a $L_f = 80 \%$, y la masa de U natural requerida para producir 1 tonelada de Pu- físil son las siguientes:

<u>Parámetro</u>	<u>Central 1</u>	<u>Central 2</u>
Pot. eléc. neta, Pe (MWe)	638.	1000.
Pu- físil anual producido (ton / año cal.)	0.229	0.349
Pu- total anual producido (ton / año cal.)	0.320	0.493
U-nat. requerido para pro- ducir 1 ton Pu- físil (ton)	397.	392.

A N E X O N° 5

REQUERIMIENTO DE URANIO NATURAL EN LA PRODUCCION

DE URANIO ENRIQUECIDO

Consideremos una planta de enriquecimiento isotópico caracterizada por recibir un material de entrada con tenor e_1 , producir un material enriquecido con tenor e_2 y un residuo (colas) con tenor e_3 , siendo M_1 , M_2 , M_3 las masas totales respectivas.

La conservación de la masa total se expresa por:

$$M_1 = M_2 + M_3 \quad (1)$$

y la conservación de la masa del isótopo objeto del enriquecimiento, por:

$$M_1 \cdot e_1 = M_2 \cdot e_2 + M_3 \cdot e_3 \quad (2)$$

En el caso particular de enriquecimiento de U en ^{235}U al 93 %, con colas al 0.2 % a partir de U natural se tiene:

$$\begin{aligned} e_1 &= 0.00711 \\ e_2 &= 0.93 \\ e_3 &= 0.002 \end{aligned}$$

La masa M_1 de U natural requerida para obtener 1 tonelada de U enriquecido al 93 % ($M_2 = 1 \text{ ton}$) es:

$$M_1 = M_2 \cdot \frac{e_2 - e_3}{e_1 - e_3} = 181.59 \text{ ton U natural}$$

La masa M'_1 de U natural requerida para obtener 1 tonelada de ^{235}U en la forma de U enriquecido al 93 % en ^{235}U es:

$$M_1 = M_2 \cdot \frac{1}{e_2} \cdot \frac{e_2 - e_3}{e_1 - e_3} = 195.26 \text{ ton U natural}$$