

“Cálculo de la potencia de decaimiento de los elementos combustibles almacenados en la piletta de una central nuclear tipo CANDU”

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumno: Del Valle, Andrea Laura

Director: Zamonsky, Gabriel

Mes y año: Marzo 2018

Índice

RESUMEN.....	3
CAPÍTULO 1	4
1. Introducción	4
CAPÍTULO 2	6
2. Método de Cálculo.....	6
2.1. Operación normal del reactor y sin almacenamiento en seco	7
2.2. Operación normal del reactor, sin almacenamiento en seco y con una situación de emergencia.....	8
2.3. Operación normal con campañas de ASECQ	9
CAPÍTULO 3	10
3. Resultados.....	10
3.1. Operación normal del reactor y sin almacenamiento en seco	10
3.2. Operación normal del reactor, sin almacenamiento en seco y con una situación de emergencia.....	11
3.3. Operación normal con campañas de ASECQ	13
CAPÍTULO 4	17
4. Conclusiones.....	17
REFERENCIAS	18
Apéndice I - Contribución de los radionucleídos a la potencia térmica total.....	19

RESUMEN

En este trabajo se realizó una evaluación de la potencia térmica decaimiento que se debe extraer de una pileta de almacenamiento de elementos combustibles irradiados de uranio natural para una Central Nuclear tipo CANDU, como la Central Nuclear de Embalse. Se estudiaron tres casos: (1) en condiciones de operación normal del reactor sin extracción de combustibles gastados de la pileta, (2) operación normal con necesidad de una descarga de emergencia de medio núcleo y (3) en operación normal del reactor con campañas de ASECQ (Almacenamiento en Seco de Elementos Combustibles Quemados), donde los combustibles irradiados que hayan estado decayendo en pileta 6 años o más, son trasladados a silos de almacenamiento en seco.

En el caso (1) la potencia total acumulada al llenarse la pileta es de 1,58 MW; para el caso (2) este valor sube a 3,83 MW.

Considerando el caso de operación normal con campañas de ASECQ (caso 3), la potencia térmica que se acumula en la pileta tiende a 1,50 MW, extendiéndose la vida útil de la pileta.

En un elemento combustible gastado, irradiado hasta el quemado de extracción, se observó que en los primeros días, los productos de fisión que más aportan al calor son $La140$ ($\approx 28\%$) e $I132$ ($\approx 13\%$), mientras que dentro de los actínidos los que más aportan son $U239$ ($\approx 51\%$) primero y $Np239$ ($\approx 99\%$) después. Para el final del período de análisis (≈ 6300 días), los nucleídos que dominan en el aporte son: $Y90$ ($\approx 38\%$) y $Ba137m$ ($\approx 40\%$) para los productos de fisión, y $Am241$ ($\approx 50\%$) y $Pu240$ ($\approx 26\%$) para los actínidos.

CAPÍTULO 1

1. Introducción

En este trabajo se realizó una evaluación de la potencia térmica de decaimiento que se debe extraer de una pileta de almacenamiento de elementos combustibles irradiados de uranio natural para una Central Nuclear tipo CANDU, como la Central Nuclear de Embalse. Se analizó la evolución de dicha potencia en el tiempo para tres casos: en condiciones de operación normal del reactor sin extracción de combustibles gastados de la pileta; ante la necesidad de una descarga de emergencia de medio núcleo suponiendo el peor caso, en el que la misma se produce cuando la pileta se está por llenar, y en operación normal del reactor con campañas de ASECQ (Almacenamiento en Seco de Elementos Combustibles Quemados), donde los combustibles irradiados que hayan estado decayendo en pileta 6 años o más, son trasladados a silos de almacenamiento en seco.

Luego de ser utilizados en el núcleo del reactor, los elementos combustibles irradiados hasta el quemado de extracción son trasladados a pileta para su almacenamiento. Es necesario remover el calor generado por los combustibles debido al decaimiento radiactivo de los materiales presentes, para lo cual es preciso estimar su valor.

Para el cálculo de la potencia térmica de decaimiento en las piletas se determinó, en primer lugar, la potencia generada en función del tiempo para un elemento combustible utilizando el programa ORIGEN-S [1], tanto en operación normal como en situación de emergencia. Luego se especificaron las estrategias de salida del combustible del núcleo (o lo que es lo mismo, llegada a pileta) para ambas situaciones, donde en el caso de operación normal depende de las estrategias de recambio de combustible, mientras que en el caso de emergencia la tasa de descarga está limitada por la velocidad máxima de operación de la máquina de recambio.

Finalmente se calculó la variación temporal de la potencia térmica acumulada total en las piletas para los tres casos considerados, teniendo en cuenta los diferentes tiempos de permanencia de los elementos combustibles en las mismas. Para manipular los datos y agilizar los cálculos, se confeccionaron programas auxiliares.

Los elementos combustibles (EC) considerados son los que se utilizan en una central nuclear tipo CANDU. Consisten en manojos de 37 barras ubicadas en anillos concéntricos (1-6-12-18) de uranio natural, cada una de las cuales está conformada por pastillas de 0,6 cm de radio y 1,3 cm de altura. Cada elemento combustible cuenta con 19,0 kg de masa total de uranio. Hay 12 elementos combustibles por canal (380 canales en total), las vainas son de zircaloy y poseen 48 cm de longitud activa.

La pileta donde se depositan los elementos combustibles gastados posee bandejas de almacenamiento, cada una con capacidad para 24 manojos como máximo, y son apilables en capas, pudiendo apilarse hasta 19 bandejas. Esta pileta está diseñada para aproximadamente 10 años de funcionamiento del reactor a plena potencia, teniendo una capacidad máxima de 45000 EC.

En los silos, los elementos combustibles son almacenados en canastos metálicos compuestos por una grilla y una tapa de canasto de acero al carbono. El silo es de hormigón armado de 2,80 m de diámetro, 5,92 m de alto y sus paredes, de 90 cm de espesor, están cubiertas por el lado interno por una envolvente de acero al carbono de 9,0 mm de espesor. Cada silo se encuentra cerrado superiormente por un tapón de acero y hormigón.

CAPÍTULO 2

2. Método de Cálculo

Se realizaron simulaciones de irradiación y decaimiento para los elementos combustibles utilizando el programa ORIGEN-S, que realiza un cálculo detallado de las cadenas de producción y decaimiento de un gran número de radionucleídos.

En la entrada del programa se debe especificar la potencia de irradiación, el tiempo de irradiación hasta llegar al quemado de extracción y la masa de los isótopos de uranio del elemento combustible. Se utilizó en todos los casos de ORIGEN-S la biblioteca de secciones eficaces dependientes del quemado para la caracterización de combustible de reactores CANDU (CANDULIB-AECL).

Se desarrollaron dos programas auxiliares, uno para procesar los datos de las salidas de ORIGEN-S y otro para calcular la potencia térmica acumulada en las piletas para los distintos casos. Este último requiere como datos de entrada: la potencia térmica de decaimiento en función tiempo de un EC (que se obtiene a partir de la salida de ORIGEN-S), el tiempo entre recambios, la cantidad de recambios por ciclo de operación del reactor y la cantidad de elementos combustibles que se extraen por cada recambio.

La potencia térmica acumulada en la piletas en función del tiempo se calcula de la siguiente forma:

A medida que los combustibles ingresan a piletas, con la frecuencia establecida para cada período de operación o parada, se calcula la potencia térmica generada en ese momento por todos los elementos combustible que ya están almacenados. En ese momento, cada EC tiene un tiempo de decaimiento dado por el instante de ingreso a la piletas. La potencia se calcula por interpolación lineal en la tabla que contiene los datos de cómo varía la potencia de decaimiento para un elemento combustible en función del tiempo. Debido a que esta variación es exponencial, la interpolación lineal siempre produce un valor algo mayor, lo que resulta en un cálculo conservativo de la potencia.

En las siguientes secciones se presentan los distintos casos analizados.

2.1. Operación normal del reactor y sin almacenamiento en seco

A los efectos del presente cálculo de potencia de decaimiento, no se considera necesario introducir en el modelo el detalle del período de transición del núcleo hasta su estado de equilibrio, sino suponer que los elementos combustibles que llegan a piletas tuvieron una irradiación hasta el quemado de equilibrio. Dicha aproximación resulta conservativa y suficiente para este trabajo teórico ya que, en realidad, hasta llegar al núcleo de equilibrio no se sacan elementos combustibles con los quemados considerados y a la frecuencia considerada, por lo que hay una sobreestimación del calor generado que, sin embargo, a medida que avanza el tiempo de decaimiento, no genera un cambio significativo en los resultados finales.

Para simular el ingreso de elementos combustibles a las piletas en operación normal se determinó, mediante el programa ORIGEN-S, la potencia térmica generada por un elemento combustible irradiado hasta el quemado medio de extracción, que es de 7500 MWd/tU. Para la irradiación se consideró una potencia constante por elemento combustible de 0,45 MW, correspondiente a una potencia total del núcleo de 1987 MW.

A fin de determinar la carga térmica en la piletas, es necesario calcular la cantidad de elementos combustibles que ingresan por unidad de tiempo, lo cual surge de las siguientes ecuaciones.

$$F_{pp} = \frac{P_t}{M_{EC} Q_{extr}} \quad (1)$$

donde:

F_{pp} = frecuencia de extracción en cantidad de EC por día de plena potencia

P_t = potencia generada en el reactor (MW)

M_{EC} = masa de uranio en un EC (toneladas de U por EC)

Q_{extr} = quemado de extracción (MWd/tU)

$$F = F_{pp} FC \quad (2)$$

donde:

F = frecuencia de extracción en cantidad de EC por día calendario

FC = factor de carga

Se considera que en cada elemento combustible hay una masa de uranio de 19,0 kg. La potencia térmica total generada en el reactor de 1987 MW, lo que hace una potencia media por elemento combustible de 0,45 MW. Asimismo, se consideró un factor de carga de 0,85.

Utilizando los valores anteriores en las ecuaciones (1) y (2) resulta que se extraen en operación normal 16 EC cada 1,34 días, aproximadamente.

Cabe destacar que se utilizó como valor de potencia de decaimiento al momento de ingreso a la pileta el correspondiente a un decaimiento de 30 minutos, teniendo en cuenta que ése es el tiempo mínimo que los combustibles están en tránsito entre el núcleo y la pileta.

2.2. Operación normal del reactor, sin almacenamiento en seco y con una situación de emergencia

En este caso se supone que el reactor está operando normalmente y justo cuando falta medio núcleo (2280 EC) para completar la pileta, ocurre una situación de emergencia que requiere una descarga inmediata [2].

Para la descarga de emergencia de medio núcleo, la cantidad de elementos combustibles que se extraen por unidad de tiempo está dada por la velocidad máxima de operación de la máquina de recambio y por la capacidad de refrigeración de la pileta. Para este trabajo, la tasa descarga que se tomó es de 8 canales (96 elementos combustibles) diarios. Esta hipótesis es la que se utiliza habitualmente en los análisis de seguridad de la Central Nuclear de Embalse.

2.3. Operación normal con campañas de ASECQ

En este caso se supone que el reactor opera normalmente, y que cuando la pileta tiene acumulados elementos combustibles que estuvieron decayendo en pileta al menos 6 años, se los almacena en silos secos (campañas de ASECQ).

Se determinó la variación de la potencia térmica acumulada en pileta al introducir elementos combustibles extraídos del reactor, que fueron irradiados durante operación normal de la central, intercalado con campañas de ASECQ. Se analizan dos casos, uno donde las campañas se realizan 1 vez al año y otro donde se realizan cada 2 años.

En el primer caso se consideró que los EC van ingresando normalmente a la pileta y a los 7 años de operación se extraen los EC que tienen más de 6 años de decaimiento (correspondientes al primer año de operación del reactor). Este proceso se repite anualmente (cada 1 año de operación se extraen los EC con más de 6 años de decaimiento).

En el segundo caso se consideró la extracción a los 8 años de operación de los EC almacenados en los primeros dos años, repitiendo este proceso cada 2 años.

CAPÍTULO 3

3. Resultados

3.1. Operación normal del reactor y sin almacenamiento en seco

En la figura 3.1.1 se muestra la potencia térmica de decaimiento en función del tiempo posterior a la irradiación para un elemento combustible extraído del reactor, calculado con el programa ORIGEN-S, hasta el quemado de extracción en el núcleo de equilibrio de 7500 MWd/tU. Se muestra la contribución de los actínidos y los productos de fisión a la potencia total.

Durante la operación normal del reactor, al retirar un elemento combustible que alcanzó el quemado de extracción, éste genera aproximadamente 26,91 KW. A la media hora, momento en el que el combustible llega a la pileta, este valor se reduce por el decaimiento a 7,42 KW.

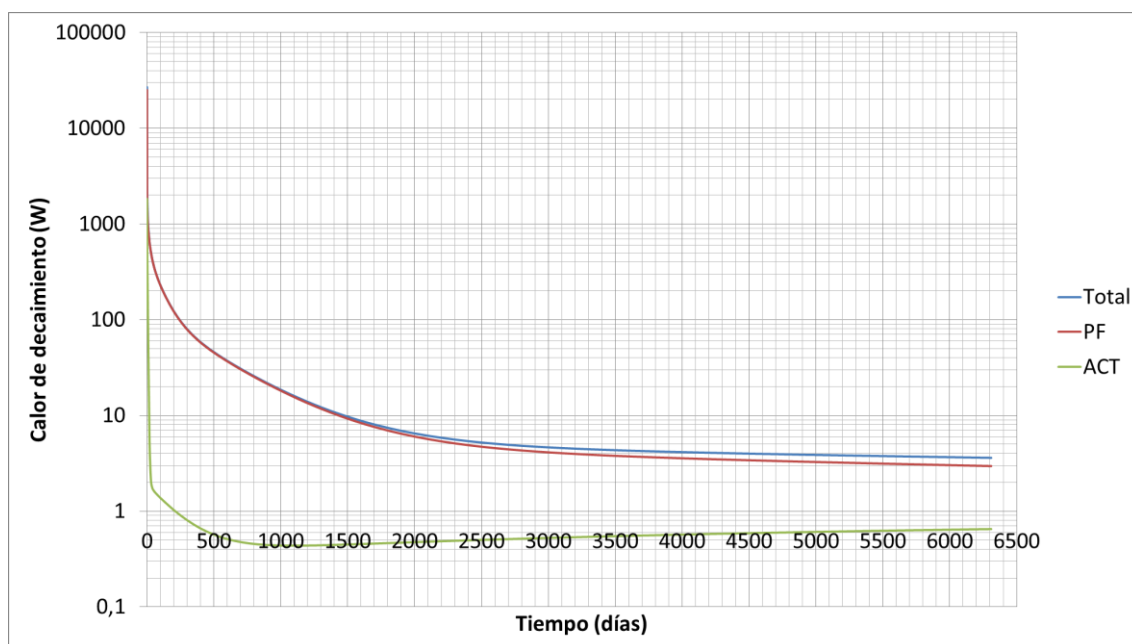


Figura 3.1.1. Potencia térmica de decaimiento en función del tiempo para un elemento combustible extraído del reactor al alcanzar el quemado de extracción de 7500 MWd/tU.

En el apéndice I se presenta un análisis de la contribución de los principales radionucleidos a la potencia generada por el elemento combustible a lo largo del tiempo de decaimiento, partiendo desde la extracción del reactor.

La figura 3.1.2 contiene los gráficos de la potencia acumulada en la pileta a medida que se van introduciendo los elementos combustibles irradiados. Al llenarse la pileta, se obtiene un valor máximo de 1,58 MW.

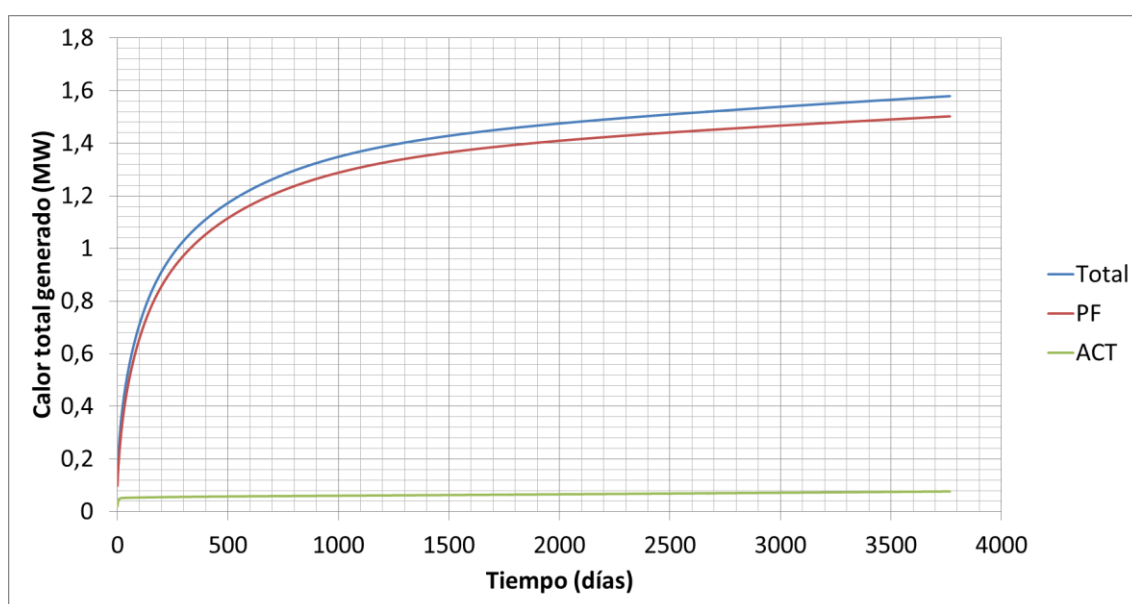


Figura 3.1.2. Acumulación de la potencia térmica de decaimiento en la pileta en función del tiempo.

Se observa que la contribución de los productos de fisión a la potencia total resulta mucho más significativa frente a la de los actínidos.

3.2. Operación normal del reactor, sin almacenamiento en seco y con una situación de emergencia

La potencia térmica acumulada en la pileta suponiendo una descarga de emergencia de medio núcleo (2280 elementos combustibles) en el tramo final del llenado de la misma se puede ver en la figura 3.2.1.

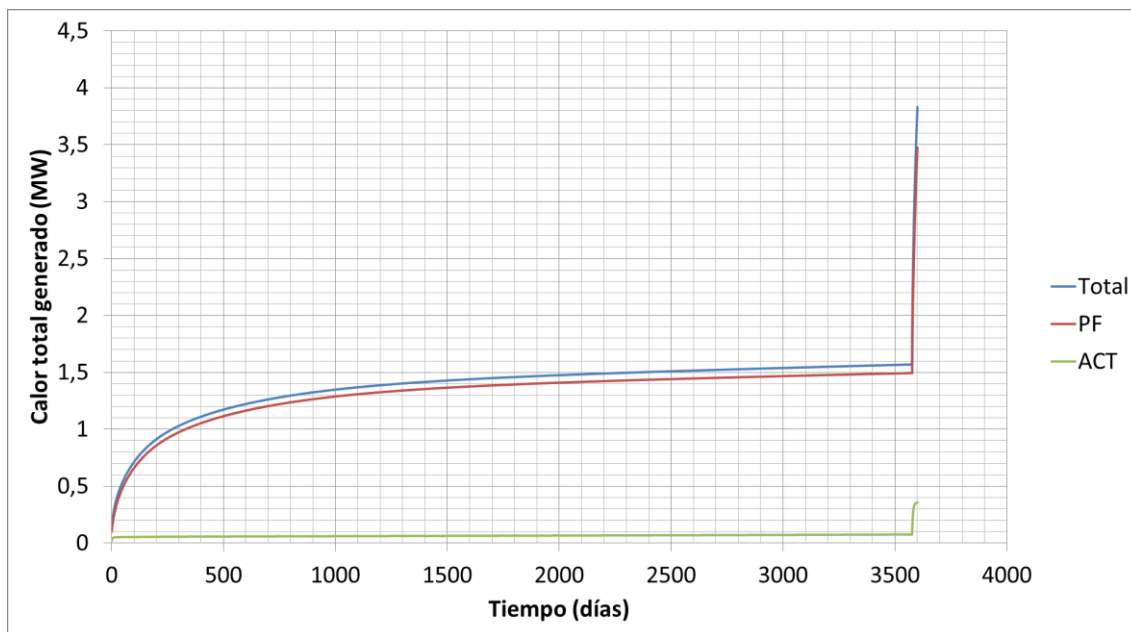


Figura 3.2.1. Acumulación de la potencia de decaimiento en función del tiempo. Se observa el acumulamiento para el caso de operación normal de la planta y, finalmente, en caso de emergencia.

Debido a que la potencia acumulada crece en el tiempo, el peor momento para que ocurra una situación que requiera una descarga de emergencia es cuando la pileta está cerca de llenarse, es decir, cuando faltan 2280 EC para completarse. En esa situación, se obtienen 3,83 MW para la potencia térmica de decaimiento máxima (al final de la descarga de emergencia). Este valor se obtiene sumando la potencia acumulada en la pileta por los elementos combustibles ya almacenados, que continúan decayendo, con los que van llegando de la descarga.

La mayor pendiente en la situación de emergencia se debe a que los EC entran a la pileta con una mayor frecuencia que en operación normal. En consiguiente, los elementos combustibles que ya se encuentran en pileta decaen menos tiempo antes de que ingresen los nuevos EC.

3.3. Operación normal con campañas de ASECQ

En la figura 3.3.1 se muestra la variación temporal de la potencia térmica generada por un grupo de elementos combustibles que son almacenados en pileta durante 1 año y que luego se los deja decaer 6 años, y en la figura 3.3.2 se muestra lo mismo para los elementos combustibles que se acumulan durante 2 años, también decayendo luego 6 años en pileta.

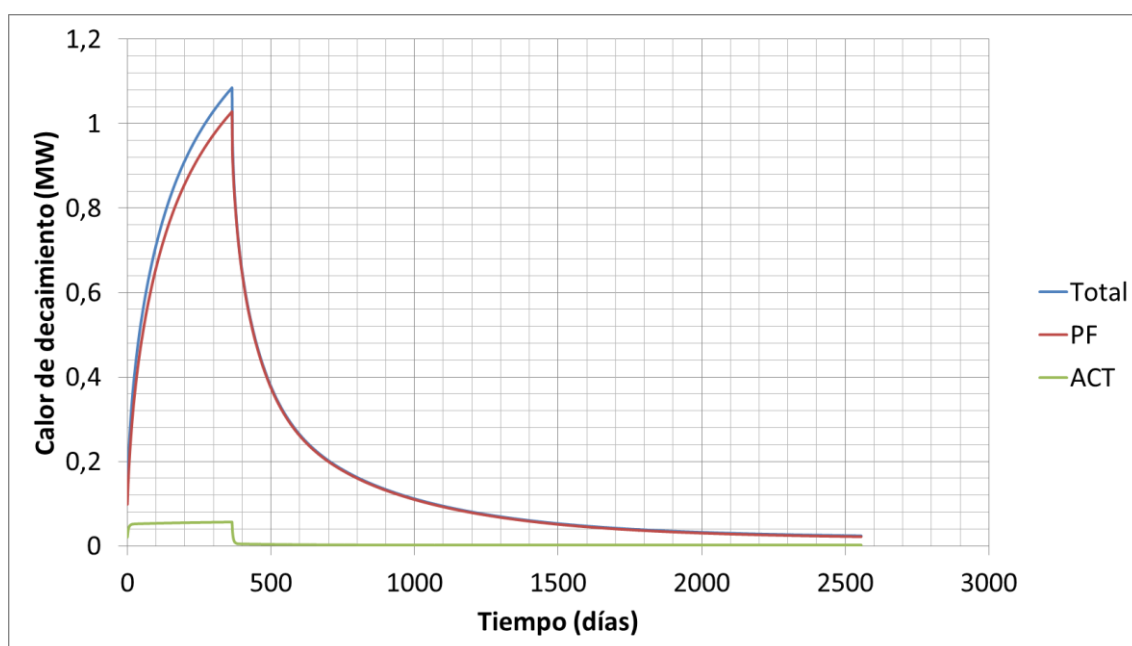


Figura 3.3.1. Potencia térmica de decaimiento generada por un grupo de elementos combustibles que estuvieron decayendo 7 años en pileta (1 año de acumulamiento y 6 años de decaimiento).

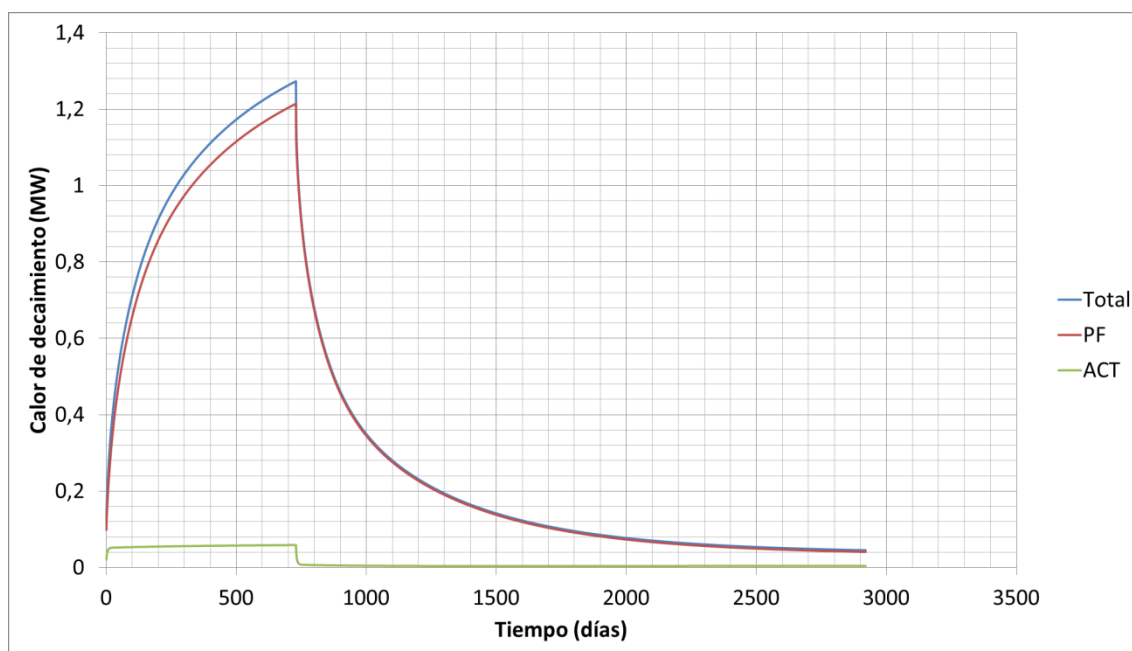


Figura 3.3.2. Potencia térmica de decaimiento generado por un grupo de elementos combustibles que estuvieron decauyendo 8 años en pileta (2 año de acumulamiento y 6 años de decaimiento).

El valor de potencia total obtenida para cada caso al cabo de los 7 y 8 años es de 23,9 MW y 45,2 MW, respectivamente.

Este valor es el que se resta a la potencia térmica que se acumula en pileta durante cada campaña de ASECQ, donde se extraen elementos combustibles para trasladarlos a silos secos. Estas campañas se consideraron cada 1 o 2 años, según el caso. En las figuras 3.3.3 y 3.3.4 se muestra la evolución temporal de la potencia térmica de decaimiento en pileta intercalado con campañas de ASECQ para ambos casos considerados.

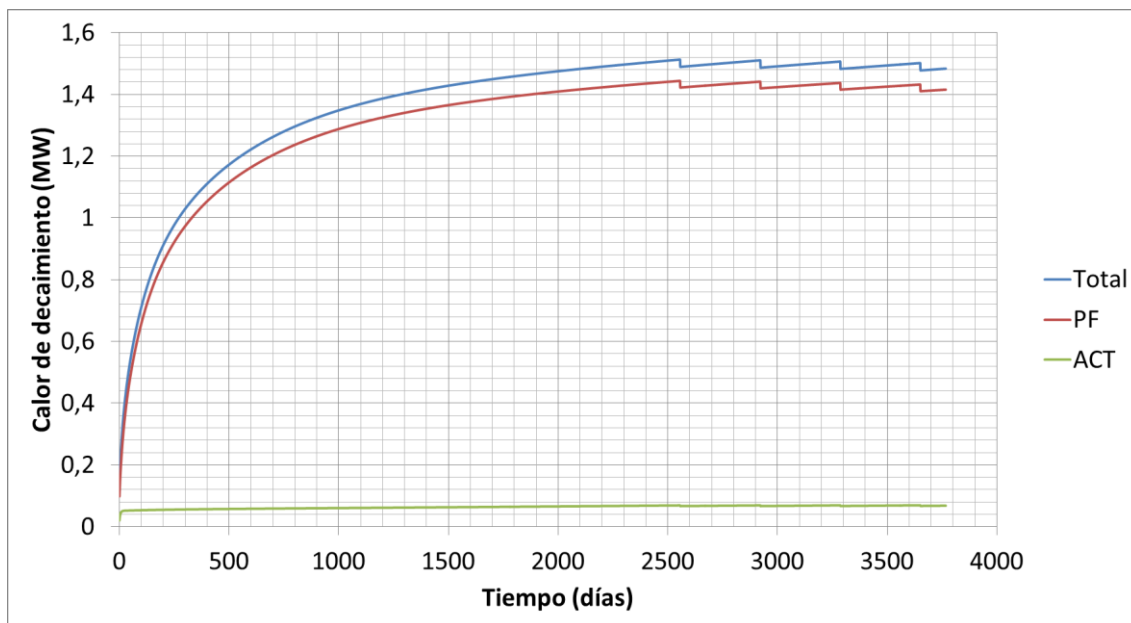


Figura 3.3.3. Acumulación de la potencia térmica de decaimiento en piletas, en función del tiempo, para 7 años de decaimiento en piletas y campañas de ASECQ realizadas cada 1 año.

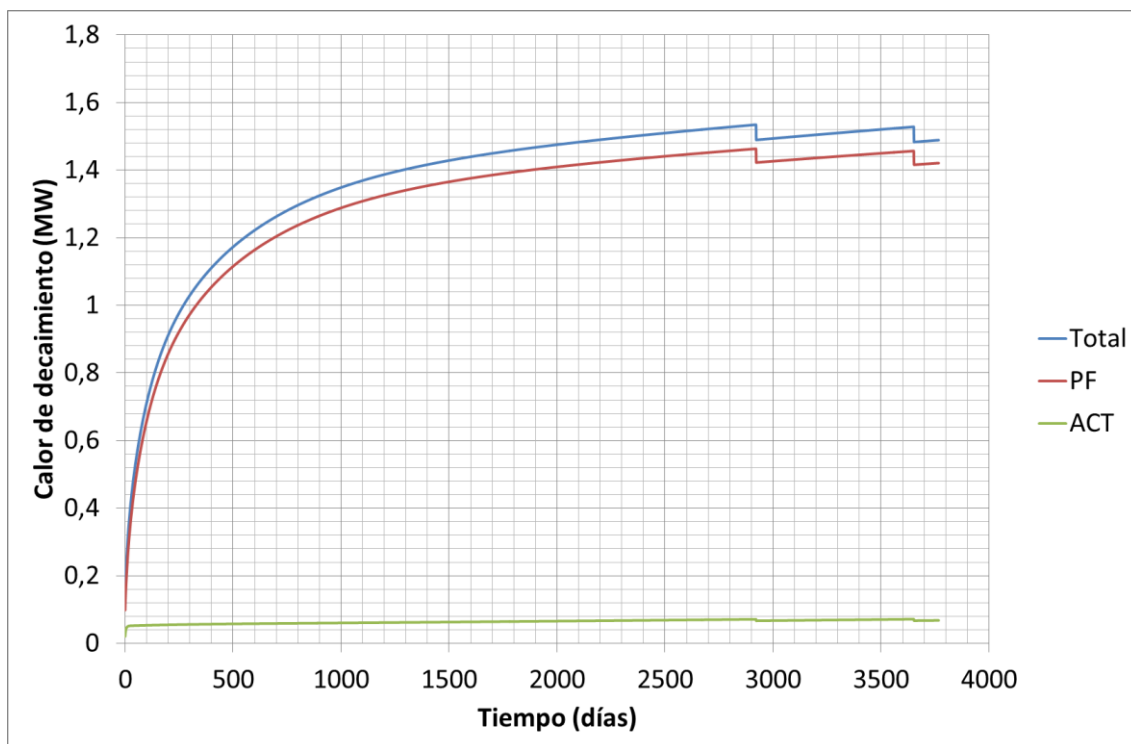


Figura 3.3.4. Acumulación de la potencia térmica de decaimiento en piletas, en función del tiempo, para 8 años de decaimiento en piletas y campañas de ASECQ realizadas cada 2 años.

Se observa que, para ambos casos, la potencia térmica acumulada tiende a un valor que se mantiene aproximadamente estable en el tiempo, $\approx 1,50$ MW, independientemente de la periodicidad de las campañas. Esto implica que la pileta puede seguir utilizándose más allá del tiempo en que se llenaría completamente sin ASECQ, con lo cual se extiende su vida útil.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones

Se presentan estimaciones de la potencia térmica de decaimiento que debe extraerse de una piletta de almacenamiento de elementos combustibles irradiados de uranio natural, para una central nuclear tipo CANDU, como la Central Nuclear de Embalse, tanto en condiciones de operación normal del reactor como ante la eventualidad de una descarga de emergencia de medio núcleo en la peor situación posible, que corresponde al momento donde la piletta tiene espacio sólo para los elementos combustibles extraídos.

En operación normal sin campañas de ASECQ, se obtuvo un valor de 1,58 MW para la potencia térmica acumulada al momento de llenarse la piletta. En el caso de una situación de emergencia al final del período, esta potencia alcanza un valor de 3,83 MW.

Las campañas de ASECQ ayudan a extender la vida útil de las piletas, debido a que la potencia térmica acumulada tiende a un valor que se mantiene aproximadamente estable con el tiempo, siendo en este caso 1,50 MW. No se observaron grandes discrepancias en los resultados obtenidos al considerar campañas cada 1 y 2 años.

REFERENCIAS

[1] ORIGEN-S: SCALE System module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product buildup and decay, and associated radiation source terms; I.C. Gauld, O.W. Hermann, R.M. Westfall; May 2004.

[2] CNE – Informe de Seguridad

Apéndice I - Contribución de los radionucleídos a la potencia térmica total

En la figuras 3.4.1 a 3.4.4 se presenta el porcentaje de aporte de los principales nucleídos, actínidos y productos de fisión separadamente, a la potencia térmica total de decaimiento generada.

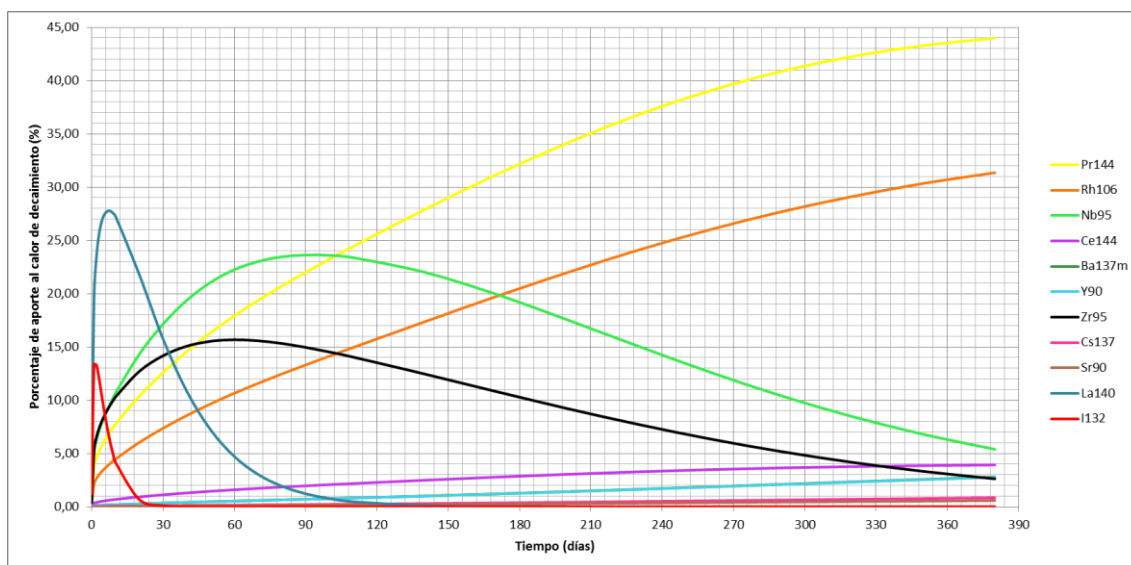


Figura 3.4.2. Porcentaje de aporte a la potencia térmica de decaimiento total generado por los productos de fisión, en función del tiempo, para los nucleídos que más aportan.

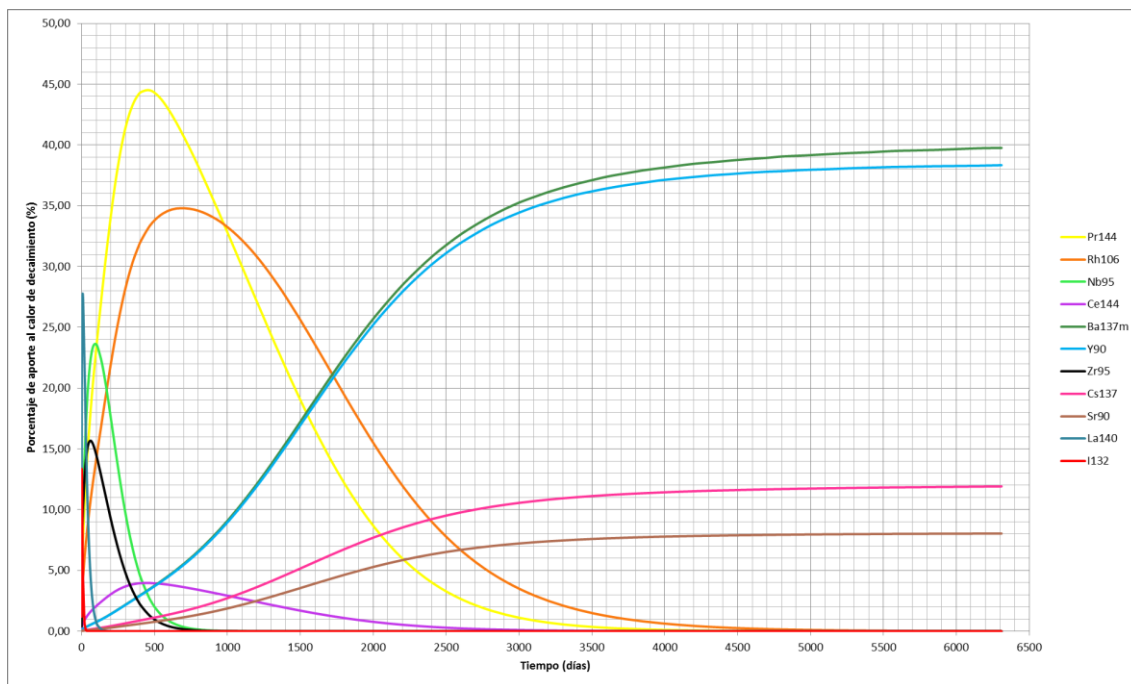


Figura 3.4.3. Porcentaje de aporte a la potencia de decaimiento total generada por los productos de fisión, en función del tiempo, para los nucleídos que más aportan.

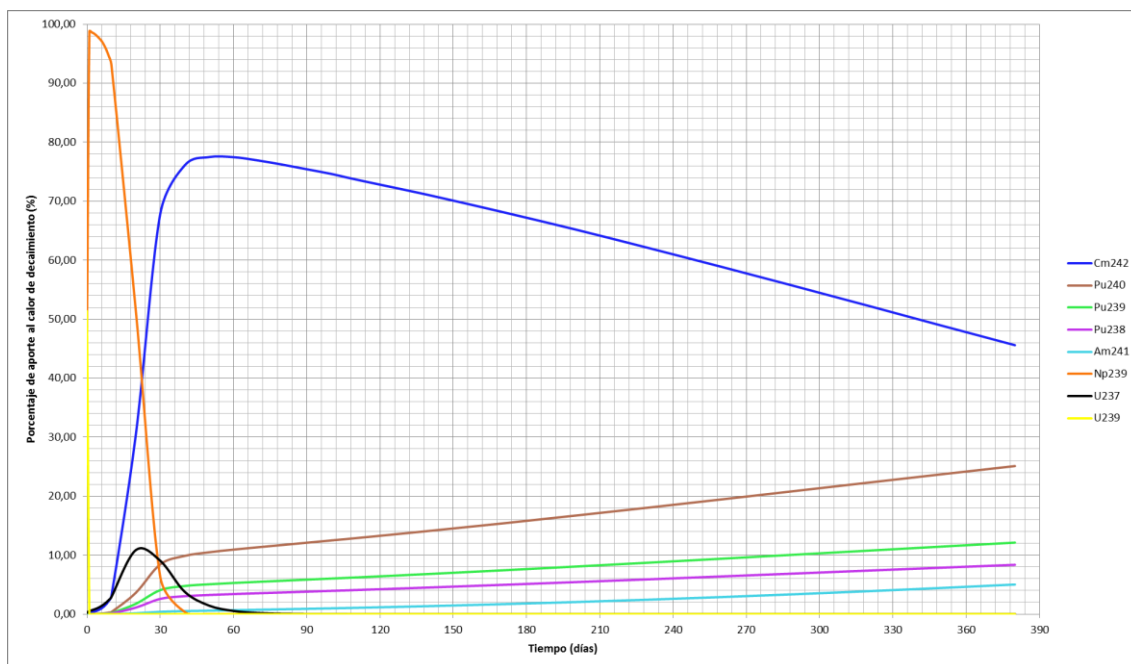


Figura 4.4.3. Porcentaje de aporte a la potencia de decaimiento total generada por los actínidos, en función del tiempo, para los nucleídos que más aportan.

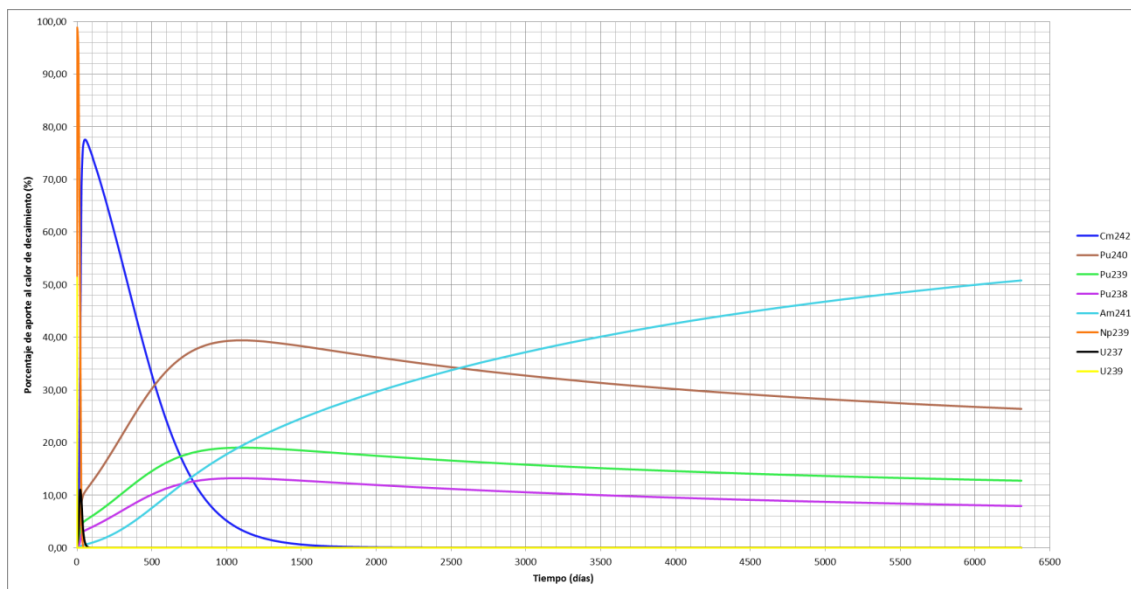


Figura 3.4.5. Porcentaje de aporte a la potencia de decaimiento total generado por los actínidos, en función del tiempo, para los nucleídos que más aportan.

Analizando las figuras anteriores se puede observar que para el caso de los productos de fisión, durante el comienzo del primer año, *La140* ($\approx 28\%$) e *I132* ($\approx 13\%$) son los nucleídos que mayor porcentaje de aporte realizan a la potencia de decaimiento, mientras que hacia el final del año son *Pr144* ($\approx 44\%$) y *Rh106* ($\approx 31\%$) los que más aportan. Sin embargo, cerca de los 4500 días (12 años aproximadamente), el aporte de estos últimos cae drásticamente llegando a cero y, en su lugar, *Y90* ($\approx 38\%$) y *Ba137m* ($\approx 40\%$) son los nucleídos que pasan a ser los de mayor porcentaje de aporte.

Para el caso de los actínidos, el nucleído que más aporta a la potencia de decaimiento generado en el momento en que se extrae el elemento combustible del reactor, es *U239* ($\approx 51\%$). A partir del primer día de decaimiento, su aporte se vuelve despreciable y el nucleído que domina es *Np239* ($\approx 99\%$). Hacia el final del año, *Cm242* (alcanzando un máximo de $\approx 78\%$ en 50 días y luego disminuyendo) y *Pu240* (aumentando) son los que más aportan al calor generado. Alrededor de los 1700 días (4 años y medio, aproximadamente), el aporte de *Cm242* llega a cero, mientras que el aporte del *Pu240* alcanza un máximo alrededor de los 1000 días ($\approx 40\%$), momento a partir del cual disminuye lentamente. Cercano a los 2600 días, este nucleído deja de ser el de mayor

aporte, pasando a ser Am^{241} . Hacia el final del análisis, 6300 días aproximadamente, estos dos nucleídos son los que dominan, aportando $\approx 50\%$ Am^{241} y $\approx 26\%$ Pu^{240} .