

DISEÑO DE UN CONTENEDOR PARA TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIAL RADIATIVO Y FÍSIL.

Ivaldi, L., Sagarna, P¹.

Comisión Nacional de Energía Atómica

RESUMEN

En el año 2012 la CNEA toma la decisión de dismantlar el depósito temporal de filtros procedentes de la Planta de Producción de Radioisótopos por Fisión, que contienen uranio irradiado enriquecido al 90 % y 20%; ubicados en el sector de residuos radiactivos del CAE. Por esta razón se debe realizar el traslado de dichos filtros a otro depósito.

La solución propuesta a esta problemática es diseñar un contenedor de filtros para su posterior traslado y almacenamiento en forma segura.

Este trabajo contempla el modelado del sistema, su validación realizando mediciones experimentales y la simulación usando el método Montecarlo en el transporte de partículas para el cálculo de Kef y Tasa de dosis gamma.

Se adoptaron criterios de diseño que garanticen el control de nivel de radiación externa, en operación, carga – descarga – transporte - almacenamiento transitorio; y la prevención de accidente de criticidad.

Por último se busco optimizar los valores que resultaron de los cálculos, proponiendo diferentes materiales que integran el contenedor.

1. INTRODUCCIÓN

El ^{99m}Tc (Tecnecio-99 metaestable), producto del decaimiento del ⁹⁹Mo, es el radionucleido de más amplio uso en los estudios de diagnóstico en Medicina Nuclear. Mientras que el ¹³¹I se utiliza en diagnóstico y tratamiento de cáncer de tiroides, de hipertiroidismo y como marcador en estudios de diagnóstico de tumores específicos del tejido nervioso. La obtención de Molibdeno-99 e Iodo-131 a partir de la fisión nuclear, requiere de la realización de un proceso separativo partiendo de uranio enriquecido en el isótopo 235 con enriquecimiento menor al 20 %.

El proceso comienza con la irradiación de blancos, miniplacas planas de Uranio-Aluminio, en el RA-3 (Reactor Argentino N°3) del Centro Atómico Ezeiza. El uranio irradiado queda precipitado en los filtros en la primera etapa del proceso para la obtención de Molibdeno-99 e Iodo-131. En la Celda de Transferencia que se utiliza para la transferencia de residuos de la disolución de los blancos, se dejan decaer los filtros del proceso. Después de 400-700 días de decaimiento de los filtros, estos se transportaban en cartuchos (portafiltros) para luego ser almacenados en el sector de Residuos Radiactivos del C.A.E.

El sector de residuos radiactivos del PNGRR (Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos) tiene U-235 procedente de la PPRF (Planta de Producción de Radioisótopos por

¹ pdsagarna@yahoo.es

Fisión) los cuales son uranio enriquecido al 90% y el resto al 20%. El uranio enriquecido al 90% se encuentra distribuido en un total de 66 filtros.

En el año 2012 la CNEA toma la decisión de dismantelar el depósito temporal de filtros y de combustibles gastados del RA-3. En consecuencia la Planta de Producción de Radioisótopos por Fisión, responsable del material nuclear debe realizar el traslado de dichos filtros a otro depósito.

2. OBJETIVOS

2.1. Generales

- Diseñar un contenedor para filtros que contienen material fisil (uranio enriquecido al 90%) y productos de fisión, tal que cumplan con las normas regulatorias vigentes.
- Garantizar la seguridad y proteger a las personas, bienes y medio ambiente de los efectos de las radiaciones en el almacenamiento transitorio del contenedor que contiene material radiactivo y fisil.

2.2. Específicos

- Modelar el sistema y validarlo con valores medidos experimentalmente.
- Simular el transporte de partículas mediante el Método Montecarlo utilizando código MCNP para estimar K_{ef} y Tasa de Dosis Gamma.

3. DISEÑO DEL SISTEMA CONTENEDOR

3.1. Caracterización del sistema

El *sistema contenedor* es un conjunto de elementos unidos por relaciones de interacción o interdependencia. Los elementos que forman parte del sistema vienen condicionados por el objetivo del estudio que se pretende realizar.

Así mismo las componentes del sistema incorporan:

- *Atributo*: propiedad de un elemento del sistema.
- *Actividad*: todo proceso que provoque un cambio en el estado del sistema.

El *estado* del sistema en un instante de tiempo determinado se puede definir como la descripción de todos los elementos, atributos y actividades en dicho instante. Este conjunto constituye las *variables de estado* del sistema.

Estos supuestos, que normalmente se expresan mediante relaciones matemáticas o relaciones lógicas, constituyen un *modelo* del sistema. Este modelo se utiliza para comprender y prever el comportamiento del sistema real.

Si las relaciones matemáticas o lógicas que comprende el modelo son sencillas, entonces será posible utilizar un procedimiento analítico para obtener una solución o respuesta exacta sobre

las características de interés del sistema analizado. No obstante, y como se entiende en nuestro caso las relaciones son complejas y ocurre que no se puede evaluar analíticamente el problema. Entonces, será necesario acudir a la *simulación* del sistema, evaluando *numéricamente* el modelo y analizando los datos obtenidos para *estimar* las características de dicho sistema.

Evidentemente, las características del sistema real que se desea estudiar van a condicionar el tipo de simulación que se va a desarrollar. Por lo tanto, conviene hacer una clasificación de los sistemas de acuerdo con los aspectos que van a condicionar su análisis posterior. Así, es útil realizar una clasificación del sistema atendiendo a tres aspectos fundamentales:

A. Sistemas estáticos y sistemas dinámicos: un sistema se considera estático cuando sus variables de estado no cambian a lo largo del tiempo, es decir, cuando el tiempo no juega ningún papel en sus propiedades. Por el contrario, en un sistema dinámico los valores que toman todas o algunas de sus variables de acción evolucionan a lo largo del tiempo.

B. Sistemas deterministas y sistemas estocásticos: si un sistema no tiene ningún componente de carácter estocástico (es decir, aleatorio) se considera determinista. En este caso, el comportamiento del sistema está determinado una vez que se hayan definido las condiciones iniciales y las relaciones que existen entre sus componentes. Por el contrario, un sistema no determinista o estocástico tiene algún elemento que se comporta de forma aleatoria, de forma que no está predeterminado comportamiento en función de las condiciones iniciales y de las relaciones entre sus componentes. En este caso, el sistema sólo se podrá estudiar en términos probabilistas, consiguiendo, en el mejor de los casos, conocer sus respuestas posibles con sus probabilidades asociadas.

C. Sistemas continuos y sistemas discretos. en un sistema continuo las variables de estado cambian de forma continua a lo largo del tiempo, mientras que en uno discreto cambian instantáneamente de valor en ciertos instantes de tiempo. En un sistema de una cierta complejidad puede ocurrir que existan simultáneamente variables de estado continuas y discretas. En este caso, dependiendo de la predominancia de una y otras y del objetivo del estudio que se pretende realizar, se considerará el sistema como perteneciente a uno de los dos tipos.

3.1.1 Modelo

Para estudiar un sistema, la forma más inmediata sería experimentar sobre él. Sin embargo, esto puede ser desaconsejable, e incluso imposible EN NUESTRO CASO, por diversos motivos:

1. Puede ocurrir que el sistema no exista y lo que se pretenda sea su diseño (este es nuestro caso).
2. Puede ser imposible experimentar con el sistema real porque no se dispone de ningún control sobre dicho sistema (este es nuestro caso).
3. Puede ser económicamente inviable la experimentación sobre el sistema real (este es nuestro caso).
4. La experimentación sobre el sistema real puede conllevar unos plazos de tiempo muy dilatados.

En cualquiera de los casos anteriores se hace necesaria la construcción de un modelo del sistema que refleje con la fidelidad adecuada las características destacadas del sistema a analizar y la experimentación sobre dicho modelo.

Si se realiza correctamente la construcción del modelo y el diseño de los experimentos, los resultados obtenidos permitirán inferir cuál sería el comportamiento del sistema a analizar en determinadas condiciones.

La figura siguiente muestra un esquema que muestra las diferentes formas de simulaciones que se pueden utilizar para analizar un sistema.

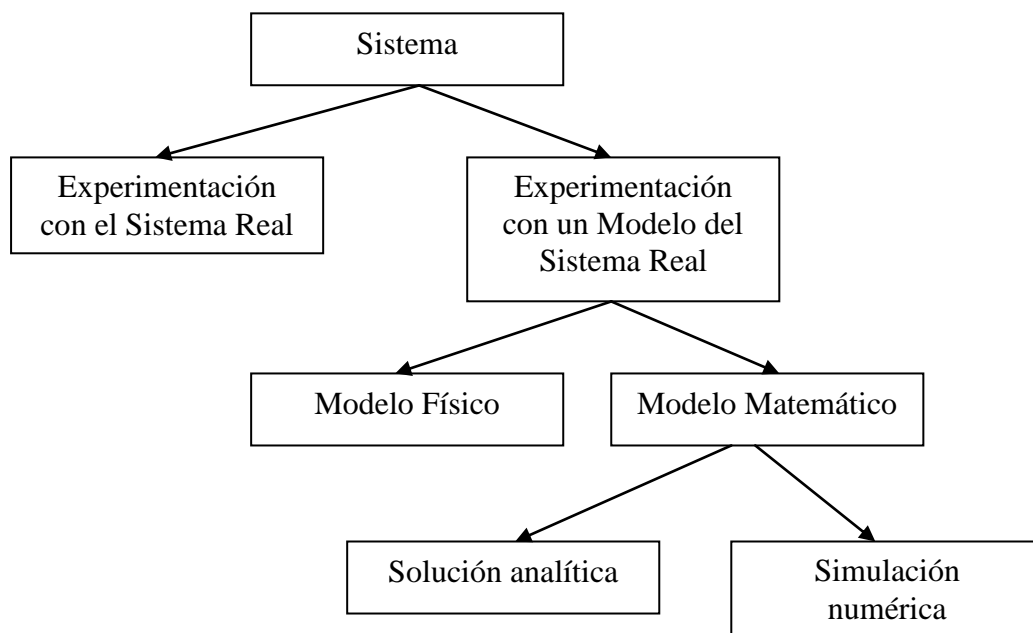


Figura 1: Diferentes formas de simulaciones

Los modelos físicos están formados por una estructura material que tiene unas características, en cuanto al objeto del estudio, similares a las del sistema real.

Un modelo matemático representa el sistema por medio de relaciones lógicas y cuantitativas entre sus variables de estado. Tanto el valor de las variables como sus relaciones se pueden modificar para estudiar cómo reacciona el modelo y, por lo tanto, cómo reaccionaría el sistema real ante dichos cambios.

Aunque en casos puntuales se han desarrollado modelos físicos, para el estudio de los sistemas críticos podemos plantear mediante ecuaciones integro-diferenciales un modelo matemático.

Una vez que se ha construido un modelo matemático que representa el sistema a estudiar, se debe analizar cómo utilizar este modelo para resolver las preguntas planteadas sobre el sistema. Si el modelo matemático es suficientemente sencillo se podrá resolver analíticamente, obteniendo una solución exacta a dichas preguntas. Si el modelo es

excesivamente complejo o inabordable, COMO ES NUESTRO CASO, habrá que recurrir a su simulación, que consiste en proporcionar una serie de valores a determinadas variables de estado y calcular cuál es el valor resultante para el resto de las variables. De este modo, se obtiene una representación o muestra de las posibles respuestas del modelo (y, por lo tanto, del sistema que representa) ante distintas condiciones de partida.

3.1.2 Necesidad de la simulación

Ya se ha indicado anteriormente que se recurre a la simulación cuando el modelo matemático que representa el sistema a estudiar es excesivamente complejo o resulta inabordable por no estar desarrollados métodos analíticos para su resolución. La fuente de complejidad puede tener básicamente dos causas:

1. En los sistemas continuos es frecuente que unas variables de estado representen la tasa o velocidad de cambio de otras variables de estado. La formulación matemática de estos modelos lleva a la aparición de ecuaciones diferenciales que indican las relaciones anteriormente mencionadas. Si el sistema tiene una cierta complejidad, puede ocurrir que las ecuaciones diferenciales sean no lineales y, por lo tanto, de difícil o imposible resolución analítica.
2. En los sistemas discretos, COMO ES NUESTRO CASO, aparecen fenómenos aleatorios que sólo se pueden representar en términos probabilistas. En este caso, la formulación matemática del modelo contiene relaciones en las que aparecen funciones de distribución o de densidad de probabilidad, que dificultan o impiden su resolución analítica.

Características de nuestro sistema: **DINÁMICO – ESTOCÁSTICO – DISCRETO.**

3.2. Descripción de los componentes integrantes del sistema contenedor.

El sistema es un contenedor, integrado por los siguientes elementos:

Tabla 1: Elementos del sistema contenedor

Elemento	Atributo	Actividad
Tambor 1 (exterior).	400L – acero – 2 mm	Geometría fija
Material envolvente	Blindante – plomo 3 cm- hormigón 3.6 cm	Geometría fija
Tambor 2 (interno)	200L– acero – 2mm	Geometría fija
Porta-filtros	Acero – 3 mm de espesor	Geometría fija
Filtro	Acero – 5 mm de espesor	Geometría fija
Material radiactivo	Material físil al 90% y P.F ²	Masa=cte y P.F=decay

² P.F: Productos de Fisión

3.2.1 Filtro

Las dimensiones de los filtros de uranio al 90% son: de 63 mm diámetro externo, diámetro interno de 58 mm, con una tapa de 85 mm diámetro, la altura total es de 70 mm (15 mm tapa+ 55 mm cuerpo filtro) material acero inoxidable AISI 316L. Las dimensiones se muestran en la siguiente figura:

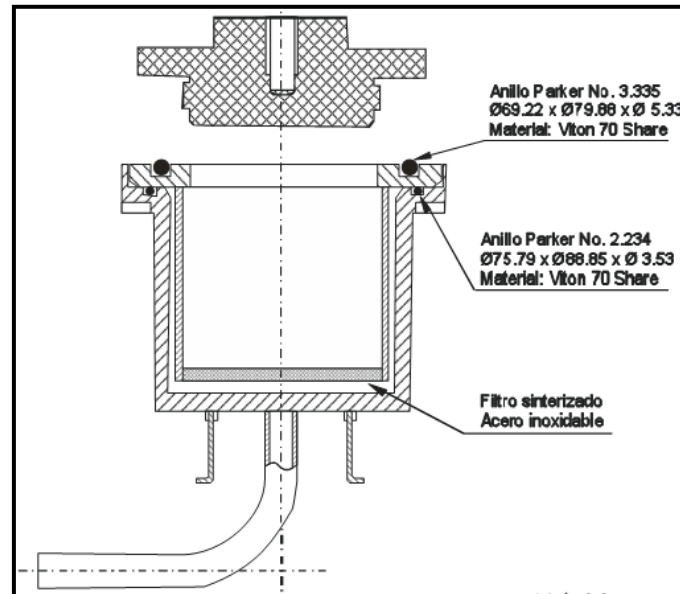


Figura 2: Filtro

3.2.2 Porta-filtros

Es donde van alojados los filtros, el material es de acero inoxidable AISI 304L. Las dimensiones de los portafiltros con uranio235 irradiado enriquecido al 90% se muestran en la siguiente figura:

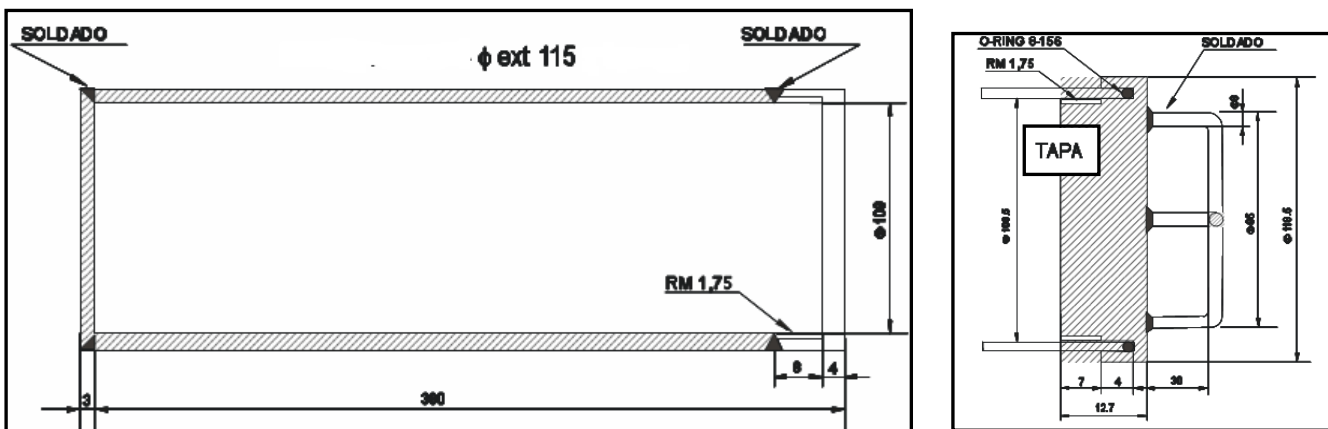


Figura 3: Portafiltro

En este punto se debe aclarar que los filtros se encuentran gestionados cronológicamente dentro de los portafiltros y esta consideración corresponde a una condición inicial de diseño.

3.2.3 Tambor de 200L y 400L

El material del tambor de 200 L es de acero inoxidable y del tambor de 400L es de acero. Las dimensiones se muestran en la siguiente figura:

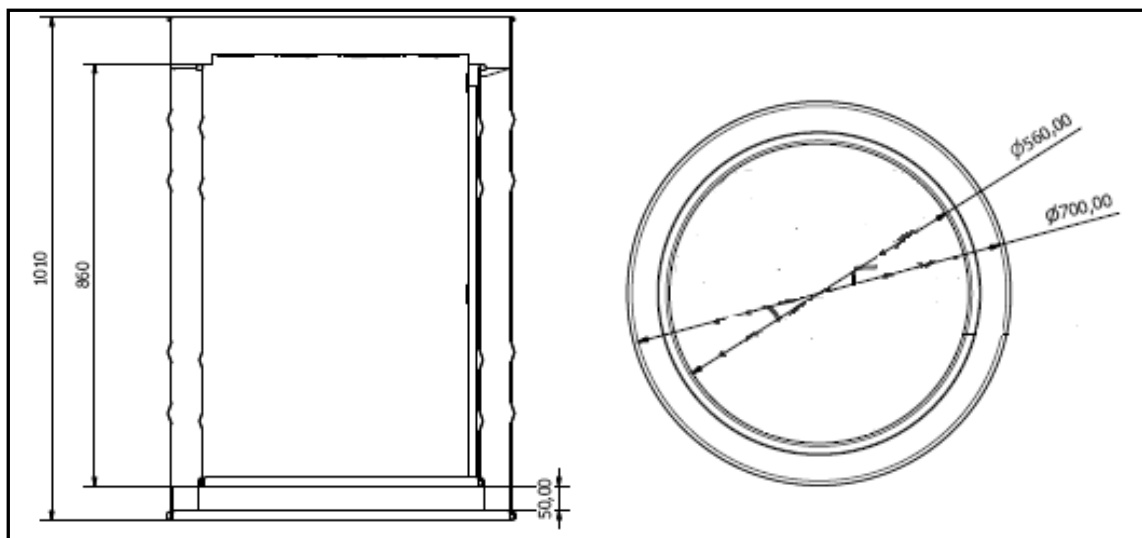


Figura 4: Tambor de 200L y 400 L

3.2.4 Distribución de masa REAL

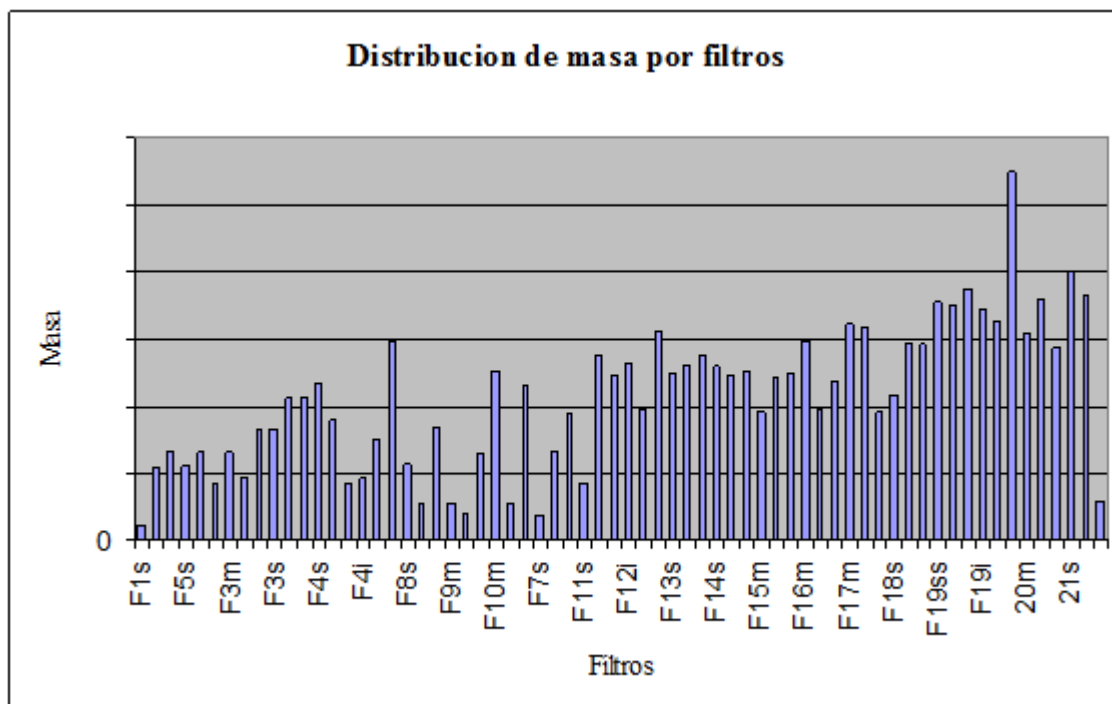


Figura 5: Distribución de masa por filtros

3.2.5 Descripción de la masa en los filtros.

Cada filtro contiene una masa distinta de material fisil y por lo tanto de los demás componentes de la masa total que se considera. En consecuencia se establece una relación porcentual para su caracterización:

$$\text{Masa} = 11.33\% (\text{UO}_2 (90\%)) + 74.21\% (\text{AlOH}_3) + 14.44\% \text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

3.2.6 Caracterización de los PRODUCTOS DE FISIÓN (P.F)

Tabla 2: Productos de Fisión³

P.F	0,9 gr U235		Tiempo de vida medio
	9 hs (Ci)	Tiempo de vida medio	Unidades
Rb-88	11,4	17,78	M
Sr 89	8,23	50,53	D
Sr 90	0,05	28,74	A
Sr 91	81	9,63	H

³ Extraído del código ORIGIN, bajo las condiciones de un flujo neutrónico de $1 \cdot 10^{14}$ y 108 horas de irradiación en el reactor R.A.3.

Y 90	0,02	64	H
Y 91m	52,4	49,7	M
Y 91	8,53	49,71	M
Y 92	60,2	3,54	H
Y 93	88,6	10,18	H
Zr 95	8,59	64,02	D
Nb 95m	0,06	86	H
Nb 95	0,47	35	D
Zr 97	108	16,744	H
Nb 97m	104	60	S
Nb 97	116	72,1	M
Mo 99	105	65,94	H
Ru 103	6,69	39,26	D
Rh 103 m	6,7	56	M
Ru 105	5,87	4,44	H
Rh 105 m	5,89	45	S
Rh 105	15,3	35,36	H
Ru 106	0,1	373,59	D
Rh 106	0,1	29,8	S
Pd 109	0,5	13,7012	H
Ag 109m	0,5	39,6	S
Sb 125	0,00098	2,75856	A
Sb 127	1,96	3,85	D
Te 127m	0,0088	127	D
Te 127	1,51	9,35	H
Sb 129	7,66	4,4	H
Te 129 m	0,42	33,6	D
Te 129	8,89	69	M
Te 131m	9	30	H
Te 131	1,64	30	H
Te 132	68,7	3,204	D
Cs 134	0,0001	2,0648	A
Cs 136	0,043	13,16	D
Cs 137	0,05	30	A
Ba 139	2,12	83,06	M
Ba 140	39,5	12,752	D
La 140	26,4	1,6781	D
La 141	36,3	3,92	H
Ce 141	17,2	32,5	D
La 142	3,02	91,1	M
Ce 143	117	33,1	H
Pr 143	24,4	13,564	D
Ce 144	1,82	284,9	D
Pr 144	1,82	17,28	M
Pr 145	37,4	5,984	H
Nd 147	16,6	10,98	D
Pm 147	0,036	2,6234	A
Pm 149	21,5	2,68	H
Pm 151	8,94	28,4	H
Sm 151	0,0009	90	A

Sm 153	3,34	46,5	H
Eu 155	0,0037	4,7611	A
U 237	0,26	6,7	D
Np 239	1,46	2,35	D
I 131	25,7	8,0207	D
I 132	70,8	1,387	H
I 133	131	20,8	H
I 134	0,67	52,5	M
I 135	63,8	6,57	H
Kr-83m	3	2,84	H
Kr-85m	8	4,4	H
Kr 85	0,008	10,756	A
Kr-87	0,5	76,3	M
Kr -88	10	2,84	H
Xe-133m	2,9	2,19	D
Xe-133	70,8	5,243	D
Xe-135m	19,9	15,29	M
Xe-135	55,5	9,14	H
Xe-131m	0,03	11,8	D

3.2.7 Masa total en el tambor y cantidad de filtros.

Tabla 3: Cantidad de filtros y masa

Tambor	
Cantidad de filtros	66
Masa total de U235 (gr)	Menor a 1500

3.3. Criterios generales

Mediante el diseño del sistema contenedor se debe garantizar la seguridad y la protección de las personas, los bienes y el medio ambiente de los efectos de las radiaciones en el transporte y almacenamiento del material fisil y radiactivo. Esta protección se logra aplicando los siguientes requisitos generales⁴:

- 1 – Contención del material radiactivo.
- 2 – Control de los niveles de radiación externa.
- 3 – Prevención de la criticidad.
- 4 – Prevención de los daños ocasionados por el calor.

⁴ Norma AR 10.16.1: Transporte de Materiales Radiactivos.- SECCION 1. Párrafo 104.

3.3.1 Contención del material radiactivo.

3.3.1.1 Estrategia de defensa en profundidad.

El principio de Defensa en Profundidad es la base de la tecnología de la seguridad de todas las aplicaciones nucleares. Su característica básica es el concepto de niveles múltiples de protección. Se definen dos principios que son corolarios de la defensa en profundidad: el de la *prevención de accidentes* y el de la *mitigación de accidentes*.

3.3.1.2 Defensa en Profundidad

Para compensar posibles fallas humanas y mecánicas se aplica el concepto de defensa en profundidad, consiste en varios niveles de protección sucesivos que impiden el escape de sustancias radiactivas al ambiente. El concepto incluye la protección de las barreras mediante la prevención de daños al contenedor. Incluye además medidas para proteger al público y al medio ambiente contra daños en caso de que estas barreras no sean efectivas.

El concepto de defensa en profundidad bien aplicado ofrece una garantía de que ninguna falla única, ya sea humana o mecánica, genere daños en el público y de que incluso las poco probables fallas combinadas, de ocurrir generarán daños escasos o nulos.

Se aplica en forma de una serie de barreras que nunca deberían estar amenazadas y que sólo cuando se quebrantan pueden ocurrir daños a la población o al medio ambiente. Estas barreras son físicas y permiten el confinamiento de las sustancias radiactivas en ubicaciones sucesivas.

Los filtros contienen el material fisil y los productos de fisión. Estos se agrupan en un arreglo de a cuatro (4) y se los encapsula en un porta filtro de acero inoxidable AISI 316 L. A su vez los portafiltros están insertos en un tambor de 200L que esta dentro de otro tambor de 400L.

3.3.2 Sistema de confinamiento

El sistema de confinamiento esta integrado por subsistema de confinamiento, siguiendo los lineamientos del criterio de defensa en profundidad.

Las barreras que debe atravesar el material radiactivo y fisil para estar en contacto con el medio ambiente son:

- 1 – Filtro.
- 2 – Porta filtro.
- 3 – Material de relleno.
- 4 – Tambor de 200L
- 5 – Material envolvente (blindaje).
- 6 – Tambor de 400L.

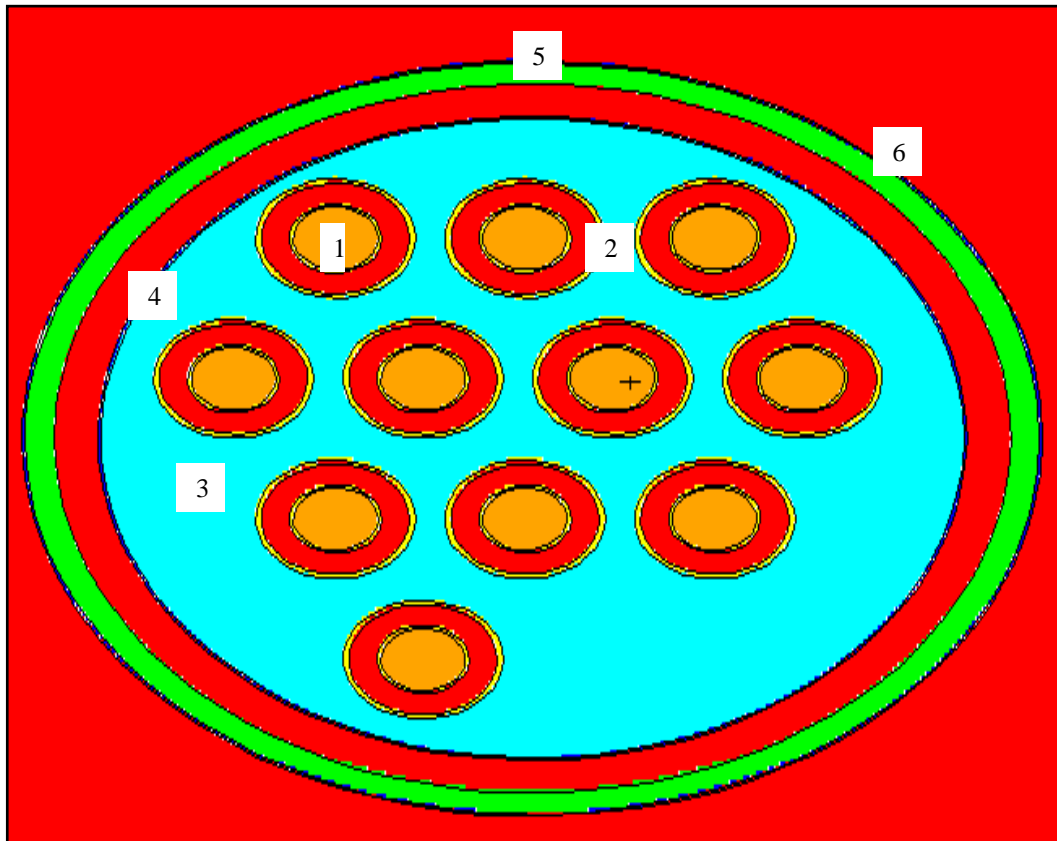


Figura 6: Sistema de Confinamiento

El diseño prevé que en situaciones accidentales previstas, la tasa de fuga a la atmósfera confinada (subsistemas) se reduzca al valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse y que los daños que puedan producirse en el sistema de confinamiento no impidan que se pueda llevar al contenedor de filtros a posición radiológica segura.

3.3.3 Integridad

El diseño NO prevé realizar ensayos, pero como contrapartida usar documentación que describe y garantiza la integridad de los subsistemas que forman parte del sistema de confinamiento. Estas consideraciones deben garantizar la integridad del contenedor en condiciones normales y en situación de accidentales.

También el diseño prevé una adecuada selección de los materiales estructurales, en especial los utilizados en la cercanía de la fuente de material radiactivo (productos de fisión), ya que la radiación gamma y la corrosión modifican las propiedades mecánicas durante la vida útil del contenedor.

3.3.4 Control de los niveles de radiación externa. Protección radiológica.

En las fases de diseño; construcción y puesta en servicio se sigue un sistema de prácticas de protección radiológica congruente con las recomendaciones de la Autoridad Regulatoria

Nuclear (ARN); Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

3.3.4.1 Límites

El límite de dosis se aplica a la suma de la dosis debida a la exposición externa en el período considerado más la dosis debida a la incorporación de algún radionucleído, si hubiere, en el mismo período. Para este caso como el material radiactivo de los filtros esta confinado en condiciones normales, no es posible la vía de incorporación de radionucleidos, ni tampoco la concentración de radionucleidos en el aire y concentración superficial de radionucleidos.

El límite de dosis efectiva para el personal ocupacionalmente expuesto es 20 milisievert en un año. Este valor debe ser considerado como el promedio en 5 años consecutivos (100 milisievert en 5 años) no pudiendo excederse 50 milisievert en un único año.

El límite de dosis equivalente para el trabajador es 150 mSv en un año para el cristalino y 500 mSv en un año para la piel.

La manera de verificar el cumplimiento de los límites, es la siguiente:

$$\frac{Hp(0,07)}{L_{D,T}} \leq 1 \quad (2)$$

$$\frac{Hp(10)}{20mSv} + \sum_J \frac{I_J}{I_{L,J}} \leq 1 \quad (3)$$

Hp(0,07): dosis equivalente personal a una profundidad de la piel de 0,07 milímetros integrada en un año (ver Guía Regulatoria GR 1 / AR 10.1.1.).

Hp(10): dosis equivalente personal a una profundidad de 10 milímetros desde la superficie de la piel, integrada en un año (ver Guía Regulatoria GR 1 / AR 10.1.1.).

LD,T: límite de dosis equivalente en piel o cristalino.

I_j: incorporación del radionucleido j en un año.

I_{L,j}: límite anual de incorporación para el radionucleido j, resultante de dividir 20 milisievert por el factor dosimétrico de dosis efectiva comprometida, para trabajadores, por unidad de incorporación de dicho radionucleido (Guía Regulatoria GR 1 / AR 10.1.1.).

Los límites anuales de incorporación, y los correspondientes derivados, se definen según los radionucleidos presentes en una práctica particular, sobre la base de la norma AR 10.1.1. para trabajadores profesionalmente expuestos. El ALI para cada radionucleído puede ser obtenido dividiendo el límite anual de dosis efectiva (0,02 Sv) por el coeficiente de dosis e(50):

$$ALI = \frac{0.02}{e(50)} Bq \quad (4)$$

El diseño de los contenedores de los filtros permite que las dosis recibidas por el personal ocupacionalmente expuesto estén por debajo de los límites autorizados.

3.3.4.2 Condiciones para la exposición ocupacional

El diseño debe permitir el adecuado mantenimiento y las reparaciones si fuese necesario sin que los trabajadores estén expuestos a tasas de dosis equivalente ambiental superior al fijado por el límite de dosis.

3.3.5 Prevención de la criticidad.

La variable de estado que caracteriza al sistema “contenedor” es:

$K_{ef} = f(\text{masa; enriquecimiento; densidad; reflexión; moderación; geometría;})$

En principio todos los métodos de control se basan en la limitación del valor que toma la variable estado (factor de multiplicación K_{ef}), derivando de allí los valores límites subcríticos de los parámetros.

Para asegurar que, si se mantienen las condiciones especificadas, el sistema será seguro si se definen los límites subcríticos incorporando márgenes de seguridad a los resultados experimentales y/o calculados, se deben aplicar tolerancias que tengan en cuenta las incertezas en los datos y en los cálculos.

Debe asegurarse que el sistema se mantenga subcrítico tanto en condiciones normales de operación como en situaciones anormales creíbles y escenarios accidentales.

3.3.5.1 Método general de control para prevención de accidentes de criticidad

Se podrá optar por control *geométrico*, *operacional* (administrativo) o una *combinación de ambos*.

En nuestro caso se implementa el control geométrico, el cual se basa en restricciones impuestas a las dimensiones de las unidades en el diseño del sistema “contenedor”.

Por otro lado, el control operacional impone limitaciones que involucran reglas administrativas estrictas. Por último el control mixto establece limitaciones en las dimensiones de ciertas unidades pero supeditado a la existencia de ciertos controles administrativos.

También podemos establecer otra clasificación:

1 - *Controles de ingeniería:*

a. **Pasivo:** construido de tal forma que no necesita la acción humana, ni de ningún sistema eléctrico, mecánico, hidráulico ni neumático para mantener la subcriticidad en condiciones normales, siendo este nuestro caso de diseño.

b. **Activo:** sistema eléctrico, mecánico, hidráulico o neumático. Actúa por medio de algún detector que mide las variables de proceso y provee una respuesta automática.

2 - Controles Administrativos

Cualquier operación que depende de la intervención de un operador y que requiere que exista un procedimiento para su ejecución.

3.3.5.2 Situaciones accidentales consideradas en la evaluación de seguridad

Consideramos los efectos de condiciones anormales sobre la reactividad del sistema cuando se efectúa la evaluación de seguridad para la prevención de accidentes de criticidad. Se incluirán factores tales como:

1. Pérdida o introducción de materiales moderadores dentro o entre las unidades; por ejemplo: inundación.
2. Introducción de materiales reflectores cerca de las unidades de material físil.
3. Doble carga o exceso de carga donde no se previó tal ocurrencia.

3.3.6 Prevención de los daños ocasionados por el calor.

La defensa en profundidad contribuye a preservar las tres funciones básicas de la seguridad: *control de la potencia, refrigeración y confinamiento de las sustancias radiactivas*. El cálculo de la potencia térmica arroja un resultado que por el orden de magnitud no amerita la implementación de un sistema de refrigeración para los filtros.

3.4. Modelo conceptual

Como se definió y se caracterizó el sistema en la sección 3.1-, podemos avanzar el estudio continuando con el *modelo conceptual* para su posterior simulación; definiendo los criterios de trabajo. Estas tareas son especialmente importantes por las siguientes razones:

- En primer lugar, para que el nivel de detalle del modelo sea el adecuado. No conviene que el detalle sea tan pobre que no se pongan de manifiesto los fenómenos relevantes del sistema, pero tampoco es interesante que el nivel de detalle sea mayor del necesario. En el primer caso, aunque el desarrollo pueda ser no muy costoso, los resultados serán poco fiables y el modelo inútil. En el segundo, el nivel de detalle puede no aportar información adicional interesante, implicará casi con toda seguridad un tiempo total de desarrollo mayor y, finalmente, se traducirá en un modelo informático más lento.
- En segundo lugar, la definición clara de los objetivos y la definición precisa del problema facilita la generación de alternativas potencialmente más interesantes y evita el estudio de alternativas menos atractivas.

- Finalmente, permite establecer las variables de salida adecuadas, para evaluar de forma correcta la eficacia y la eficiencia del sistema en diferentes circunstancias, además de facilitar que su estudio en términos estadísticos sea el adecuado.

En la elaboración del modelo conceptual (y para su posterior inclusión en el modelo informático), deben quedar claramente definidos los parámetros de diseño y las variables tanto de entrada como de salida del sistema.

Variables de entrada: las variables de entrada son aquellas que corresponden a fenómenos del sistema real sobre las que no se tiene ningún control.

Parámetros de diseño: los parámetros de diseño representan aquellas características del sistema sobre las que se tiene control y que determinan la configuración del sistema.

Variables de salida: finalmente, a partir de las variables de entrada y de los parámetros de diseño del modelo y de las relaciones que se establecen entre diferentes elementos del modelo, se obtienen valores para las variables de salida, que son aquellas que, generalmente, permiten caracterizar el sistema para una determinada configuración y que están estrechamente ligadas a los objetivos del estudio.

3.4.1 Construcción del modelo. Verificación, validación y credibilidad

Existen tres características que un modelo de simulación debe ofrecer para servir a su propósito; debe ser válido, veraz y creíble.

Un modelo es tanto más *válido* cuanto mejor representa el sistema objeto de estudio con respecto a los objetivos del estudio. Por un lado, se valida el modelo conceptual, previamente al desarrollo del modelo informático. Por otro lado, una vez elaborado este, se debe comprobar que, efectivamente, el modelo informático representa de forma adecuada el sistema.

Para que un modelo sea *válido*, debe establecerse un nivel de detalle adecuado, conviene explicitar el modelo conceptual, se debe recoger información relevante y precisa, puede ser interesante recopilar información de los gestores, se deben analizar las hipótesis tanto implícitas como explícitas.

Además de lo anterior, si se dispone de datos históricos correspondientes tanto a las variables de entrada como a las de salida, se puede ejecutar el modelo con los datos de las variables de entrada y comprobar si los valores de las variables de salida son parecidos a los valores que se obtuvieron en realidad.

La *verificación* de un modelo consiste en la realización de actividades orientadas a garantizar la correcta programación del modelo de simulación. La verificación está íntimamente ligada con el entorno de simulación elegido, para la cual existen herramientas muy útiles como se describirá más adelante en la sección 8.1.2-.

Para realizar una correcta *verificación* elijo tomar un enfoque modular para estudiar el comportamiento de cada módulo por separado. Igualmente, la tarea de verificación es más sencilla si aumenta de forma progresiva la complejidad del modelo, verificando previamente

cada modelo antes de introducir más elementos de complejidad. También es interesante ejecutar el modelo bajo hipótesis simplificadas.

La credibilidad del modelo radica en la confianza que los gestores depositan en él para tomar decisiones relativas al sistema. Por supuesto, la validez y la veracidad de un modelo contribuyen favorablemente a su credibilidad, pero no la garantizan. Un estudio de simulación en el que no ha existido colaboración por parte de los gestores, es muy probable que reciba poca atención.

3.4.2 Criterios desde el punto de vista de la CRITICIDAD

Que una configuración de material físil sea crítica significa que la energía media de fisión se mantiene constante. En estas condiciones sólo uno de los neutrones emergentes del proceso de fisión provoca una nueva fisión; el resto de los neutrones se pierden tanto por captura como por escape del sistema.

El sistema queda caracterizado de la siguiente manera:

Variable de entrada: fisiones espontáneas (No hay fuente externa).
Parámetro de diseño y control: geometría
Parámetros del proceso: masa; material; enriquecimiento; moderación;
Variable de salida: $K_{ef} = f(X_1; X_2; X_3; \dots \dots \dots X_8)$

La producción de neutrones se origina en las fisiones y en el mecanismo de reacción en cadena; la pérdida se debe a la fuga de neutrones del medio y a la absorción, esencialmente debida a la captura por núcleos no físil.

La condición de criticidad es un balance muy delicado caracterizado por un nivel de potencia y de población neutrónica estable. En ausencia de una fuente externa, el concepto de criticidad o el estado crítico de un material físil se identifica con la expresión.

$$dN/dt = 0 \tag{5}$$

que implica:

$$\text{tasa de producción} = \text{tasa de pérdida}$$

o bien:

$$\text{tasa de producción} = \text{tasa de absorción} + \text{tasa de escape}$$

$$k_{ef} = N'/N \tag{6}$$

Donde N' son los neutrones de una generación como resultado de N neutrones de la generación anterior.

Si k_{ef} es mayor que 1, la producción es mayor que la pérdida y el sistema es supercrítico.

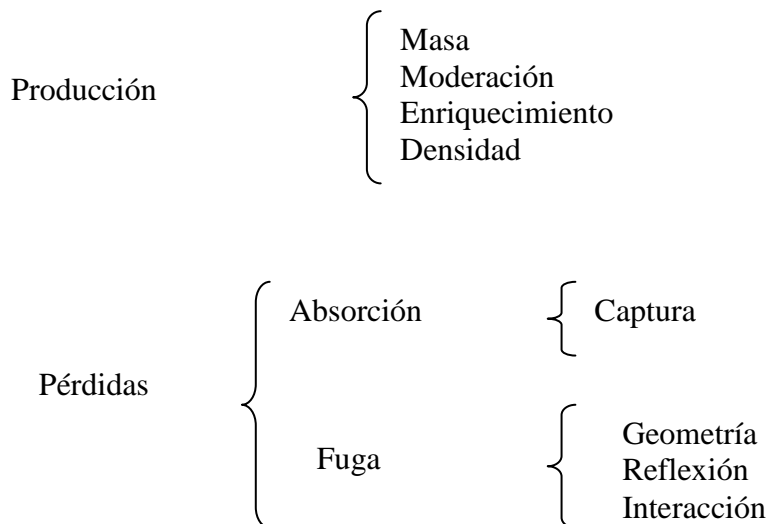
Si k_{ef} es menor que 1, la producción es menor que la pérdida y el sistema es subcrítico.

Entre estos dos estados esta el estado crítico donde k_{ef} es igual a uno y donde la producción iguala a la pérdida.

El estudio de sistemas de materiales fisionables depende fundamentalmente de la interacción de los neutrones con la materia. Es necesario determinar la producción y la absorción del medio, y de la interacción con el medio exterior que incluye la forma geométrica y la presencia de materiales reflectores que definen la fuga o escape de los neutrones.

3.4.2.1 Parámetros que influyen en la criticidad

Los parámetros que influyen en el estado de un sistema son:



Masa (X1): la producción de neutrones crece con el número de núcleos fisiles es decir con la masa de material fisil presente. La masa total de U235 en el sistema “*contenedor*” es de 1412,4gr.

Moderación (X2): los neutrones nacidos de reacciones espontáneas tienen una energía alta, pero la mayoría de los núcleos fisiles tiene una sección eficaz de fisión mayor para una energía de neutrones incidentes débil. En otros términos, la probabilidad de que un neutrón provoque una fisión luego de una colisión con un núcleo fisil es mayor para neutrones incidentes con energía térmica.

El fenómeno de moderación compite con la absorción por los núcleos moderadores por lo tanto hay un equilibrio tal que hay una relación entre núcleos moderadores y fisiles que define una relación de moderación óptima que hace máxima la producción de neutrones.

Nuestro sistema “*contenedor*” no está integrado por materiales que se caractericen por su *Poder Moderador*; pero si se considera en la prevención de accidentes de criticidad el cálculo de K_{ef} del sistema en condiciones de inundación.

Enriquecimiento (X3): un aumento en el enriquecimiento aumenta la cantidad de núcleos físi­les disponibles para fisión. En general este efecto compensa la mayor absorción que se produce en los núcleos no físi­les.

El material fisil de nuestro sistema es U235 y esta enriquecido al 90%.

Envenenamiento (X4): se pueden definir como venenos a átomos de materiales que tiene una sección eficaz de absorción grande. La presencia de venenos neutrónicos aumenta la captura de neutrones en el medio. Por otro lado, casi todos los átomos presentes en el medio actúan en cierta medida como venenos.

Densidad (X5): a mayor densidad es mayor el número de átomos físi­les por unidad de volumen y por lo tanto es mayor la probabilidad de interacción de los neutrones con un núcleo físi­l y de esa forma establecer una reacción en cadena. La densidad del material considerado es $\rho = 10.97 \text{ gr/cm}^3$

Geometría (X6): la forma del sistema determina la relación superficie - volumen del mismo y cuanto mayor es esta relación mayor la pérdida de neutrones.

Nuestro sistema se configura en patrones cilíndricos individuales distribuidos uniformemente en el espacio de un cilindro unidad.

Reflexión (X7): si parte de los neutrones que escapan del sistema son devueltos por el reflector y éstos vuelven más termalizados por un lado aumentan la población neutrónica del sistema por su presencia y por otro aumentan la probabilidad de provocar fisiones debido a su termalización.

El sistema se encuentra aislado, pero a efectos de considerar prevención de accidentes de criticidad, el cálculo de K_{ef} del sistema y alrededor mismo se realiza en condición de inundación.

Interacción (X8): la presencia de materiales físi­les en los alrededores del sistema en estudio puede aumentar la población neutrónica, en parte por la reflexión de alguno de los neutrones salientes y en parte por la multiplicación de otros.

En nuestro caso el sistema se encuentra aislado, tal que no se consideran posibles interacciones con otros materiales fisiles cercanos a sistema contenedor.

3.4.2.2 Caracterización de los parámetros definidos anteriormente en el estado del sistema “contenedor”

1. Parámetros determinados por el proceso: masa menor a 1500g ; material U235; enriquecimiento 90%; densidad.
2. Parámetros fijados de modo de considerar la peor situación posible: moderación (inundación); reflexión (inundación).
3. Parámetros considerados de control estableciendo sus límites a fin de mantener el sistema sub-crítico: geometría.

Se denominan parámetros críticos a aquellos que determinan que el sistema esté en estado crítico, o sea que la producción esté equilibrada con la pérdida.

Modelo I:

Este modelo será nuestro punto de referencia para ajustar el modelo del contenedor final.

Tabla 4: Características del modelo I

Modelo I				
Material	Masa (g)	Enriquecimiento (%)	Geometría	Distribución
U235	Menor a 1500g	90	esférica unitaria	homogénea - uniforme

Detalles del cálculo y código, ver Anexo II.

Modelo II:

En este modelo se modifica la geométrica de masa respecto al “Modelo I”, buscando de esta forma disminuir el valor del Kef del sistema e ir validando el modelo planteado.

Tabla 5: Características del modelo II

Modelo II				
Material	Masa	Enriquecimiento (%)	Geometría	Distribución
U235	Menor a 1500g	90	cilíndrica unitaria	homogénea - uniforme

Detalles del cálculo y código, ver Anexo II.

Modelo III:

Como se describió en la sección 4.2.2., la masa de Uranio en cada filtro varia dependiendo del proceso. Este modelo define un filtro *Patrón*, el cual considera el filtro de mayor masa y genera una distribución heterogénea uniforme del mismo en la geometría cilíndrica del contenedor. Esto permite verificar dicha configuración con una sobre estimación de masa de UO₂ en la estimación del valor de Kef .

Cantidad de filtros = 66 unidades.

Masa del filtro mas cargado = Z^5 .

⁵ Se omite la cantidad por cuestiones de salvaguardias.

Tabla 6: Características del modelo III

Modelo III							
Modelo conceptual							Modelo de cálculo
Material	Enriquecimiento (%)	Masa total	Masa del filtro patrón	Cantidad de filtros	Geometría	Distribución	Patrón
UO2	90	Menor a 4000g	Z	66	cilindros unitarios (filtro)	heterogénea uniforme	1

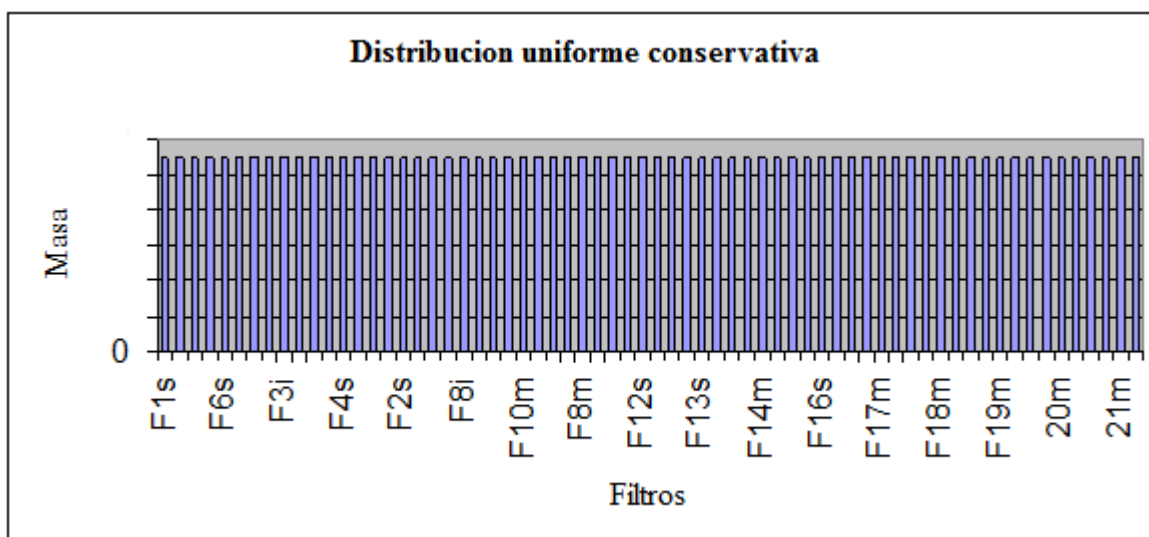


Figura 7: Distribución de masa en los filtros del modelo III

Detalles del cálculo y código, ver Anexo II.

Modelo IV:

Este modelo define un filtro *Patrón*, el cual considera un filtro que contiene una masa promedio con una distribución heterogénea uniforme del mismo en la geometría del contenedor. Esto permite verificar dicha configuración con una cantidad de masa real de UO2 en la estimación del valor de K_{ef} .

Cantidad de filtros = 66 unidades.

Masa del filtro *Patrón* = masa total/ 66

Tabla 7: Características del modelo IV

Modelo IV							
Modelo conceptual							Modelo de cálculo
Material	Enriquecimiento (%)	Masa total	Masa del filtro patrón	Cantidad de filtros	Geometría	Distribución	Patrón
UO2	90	Menor a 1500 g	masa total/ 66	66	cilindros unitarios (filtro)	heterogénea uniforme	1

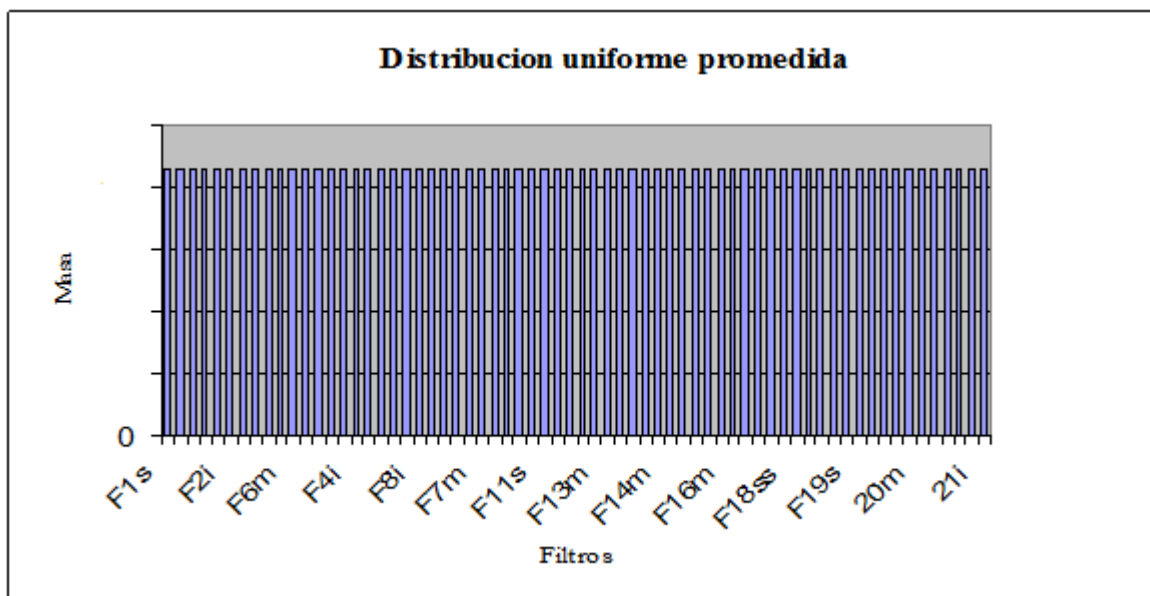


Figura 8: Distribución de masa en los filtros del modelo IV

Detalles del cálculo y código, ver Anexo II.

Modelo V:

Este modelo considera la masa real de U235 al 90% separada en nivel inferior y superior del contenedor.

Tabla 8: Características del modelo V

Modelo V		
Modelo de calculo	Modelo conceptual	
Patrón	Este modelo considera la masa total dividida en dos niveles.	
	Masa total U235 al 90%	Menor a 1500g
	Distribución	heterogénea uniforme x niveles
1	Nivel I (Parte superior del contenedor)	
	Cantidad de filtros	31
	Masa total de U235 al 90%	Menor a 600g
	Masa del filtro patrón	Masa total nivel I /31
2	Nivel II (Parte inferior del contenedor)	
	Cantidad de filtros	35
	Masa total de U235 al 90%	Menor a 900g
	Masa del filtro patrón	Masa total nivel II /35

Detalles del cálculo y código, ver Anexo II.

Modelo VI:

Este modelo define tres (3) filtros *Patrones*, disgregados en rangos de masa; con una distribución heterogénea NO uniforme del los mismos en la geometría del contenedor.

Tabla 9: Características del modelo VI

Modelo VI					
Modelo conceptual					Modelo de calculo
Cantidad de filtro x porta filtro	Porta filtro	Masa total x porta filtro ⁶		Masa del filtro patrón (gr)	Patrón
4	1	A	A+B+C	(A+B+C) /12	1
4	2	B			
4	3	C			
4	4	D	SUMA(D:S)	SUMA(D:S) /49	2
3	5	E			
3	6	F			
3	7	G			
3	8	H			
3	9	I			
3	10	J			
3	11	K			
3	12	L			
3	13	M			
3	14	N			
3	15	O			
3	F9	P			

^{6 6} Se omite la cantidad por cuestiones de salvaguardias.

3	F8	Q			
3	F4	R			
3	F1	S			
2	F2	T	T+U	(T+U) /5	3
3	F7	U			
Masa total considera por el modelo IV		menor a 1500g			

Tabla 10: Distribución de masa del modelo VI

	Rango de masa			Totales
	10 - 20g	20 - 100g	100 - 160g	
masa x filtro	(A+B+C) /12	SUMA(D:S) /49	(T+U) /5	
cantidad de filtros	5	49	12	66
cantidad de portafiltro	2	16	3	21
Masa total considerada x el modelo				menor a 1500g

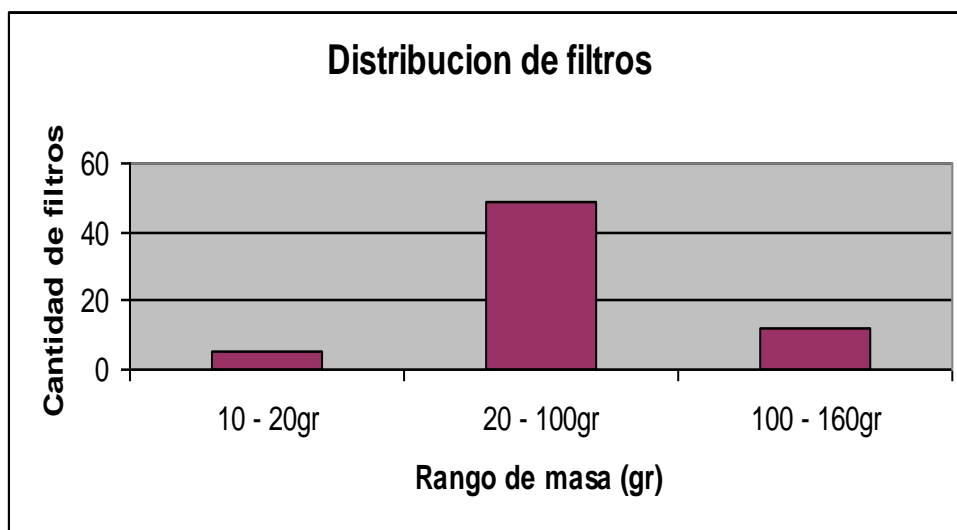


Figura 9: Rango de masa en los filtros del modelo VI

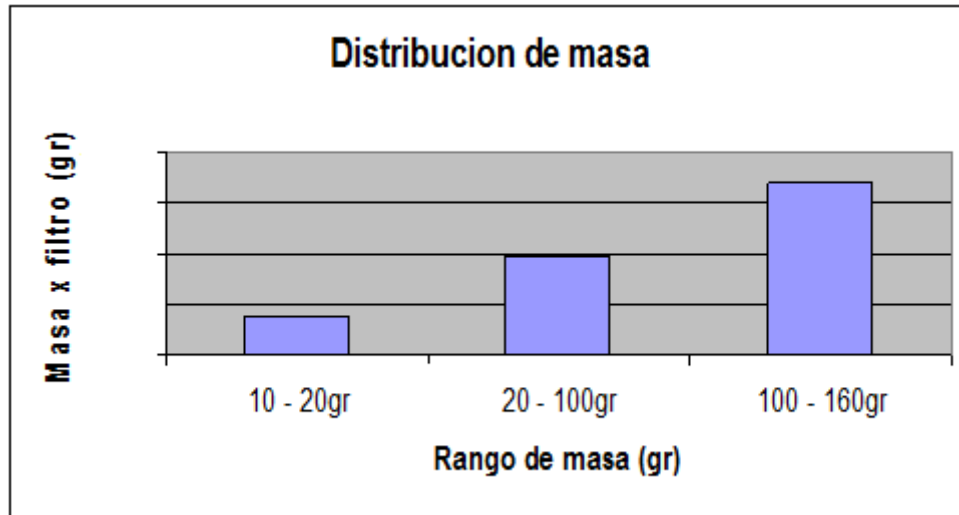


Figura 10: Distribución de masa en los filtros del modelo VI

Este modelo permite verificar dicha configuración con una cantidad de masa real de UO2 en la estimación del valor de K_{ef} .

Detalles del calculo y código, ver Anexo II.

3.4.2.3 Resultados

Tabla 11: Resultados del cálculo de criticidad de los modelos

Modelo	K _{ef}	
	Condición normal	Condición Accidental
1	0.76649	1.02462
2	0.71340	1.01656
3	0.21967	0.35941
4	0.15091	0.26479
5	0.08807	0.26261
6	0.06334	0.22391

3.4.3 Criterio desde el punto de vista de la TASA DE DOSIS GAMMA.

El sistema queda caracterizado de la siguiente manera:

Variable de entrada: desintegraciones espontáneas.

Parámetro de diseño y control: blindaje; distancia,

Variable de salida: Tasa de dosis

3.4.3.1 Análisis de decaimiento de los productos de fisión.

Este análisis considera la masa descrita en la sección 4.2.3. Teniendo en cuenta el decaimiento generado desde el año 2004 hasta la actualidad, los P.F que se consideraron para el calculo de tasa de dosis se describe en la siguiente tabla.

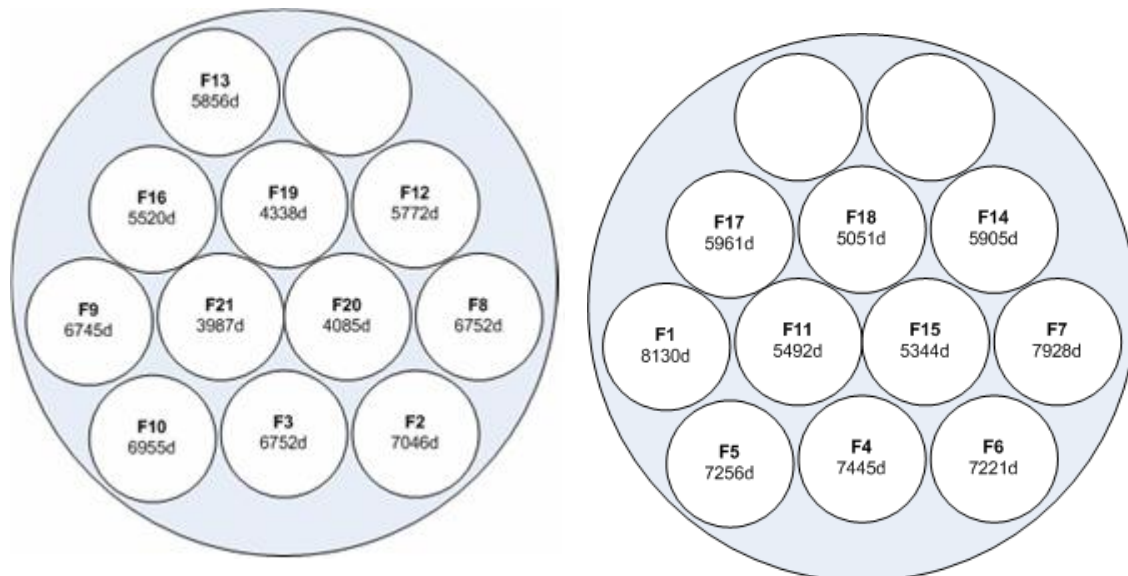
Tabla 12: Productos de Fisión

P.F	Act (Ci)	Energías
Ru 106	0,00101647	Anexo I
Ce-144	0,00152897	Anexo I
Sb 125	0,00150712	Anexo I
Eu 155	0,01664075	Anexo I
Cs 137	0,03549438	Anexo I
Ru 103	1,6005E-31	Anexo I
Ce 141	5,1058E-38	Anexo I

3.4.3.2 Distribución espacial de los filtros

Los portafiltros más activos se ubican en el interior del contenedor. De esta manera los portafiltros vecinos colocados en el exterior de los mismos ofician de blindaje de los anteriores.

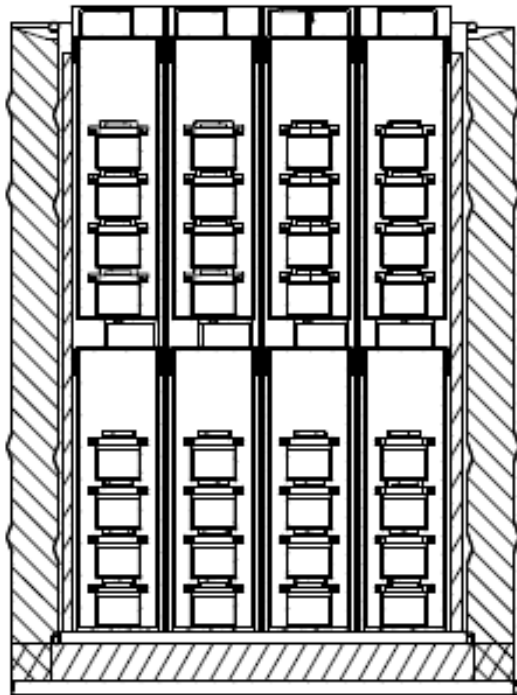
Al mismo tiempo se considera el concepto de la disminución de la Tasa de Dosis con el cuadrado de la distancia.



Filtros correspondientes a la mitad superior del contenedor.

Filtros correspondientes a la mitad inferior del contenedor.

Figura 11: Distribución espacial de los filtros



Filtros correspondientes a la mitad superior del contenedor.

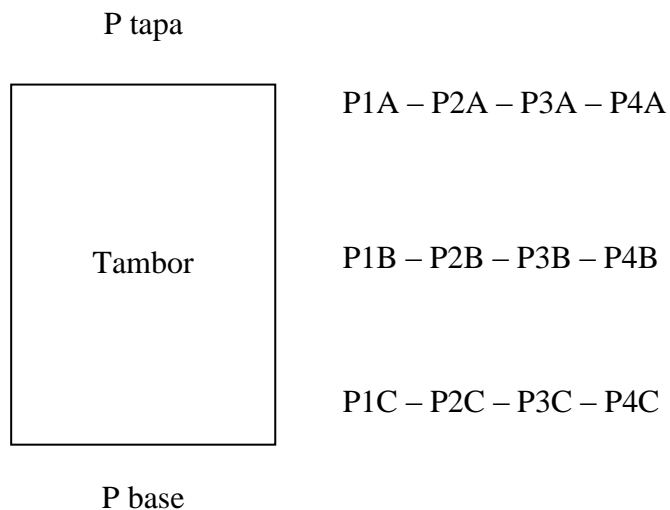
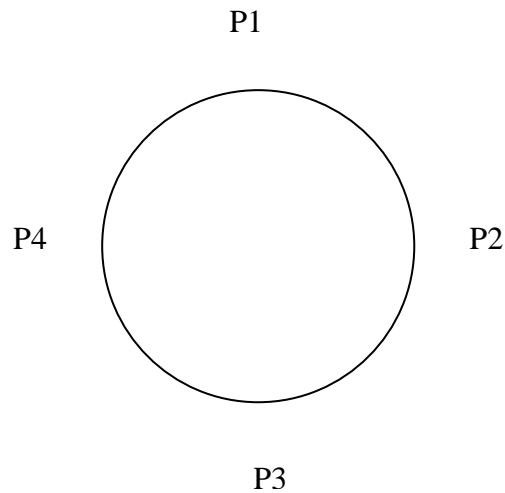
Filtros correspondientes a la mitad inferior del contenedor.

Figura 12: Distribución espacial de los filtros en el sistema contenedor

3.4.3.3 Resultados

Tabla 13: Resultados de cálculo de tasa de dosis

Puntos críticos en contacto	Tasa de dosis (mSv/h)	Error
P1A	6.3061E-04	0.0591
P2A	4.8654E-03	0.0927
P3A	3.9774E-03	0.0864
P4A	2.2619E-04	0.0317
P1B	5.7713E-03	0.0210
P2B	4.0223E-03	0.0212
P3B	5.5219E-04	0.0722
P4B	4.6640E-03	0.0106
P1C	3.6080E-03	0.0772
P2C	3.3533E-04	0.0260
P3C	5.0046E-03	0.0121
P4C	4.0790E-03	0.0780
P_tapa	5.6393E-06	0.0260
P_base	2.9221E-02	0.0137



3.5. Simulación numérica.

3.5.1 Entornos de simulación

Se puede decir que la simulación es un experimento teórico en el que se reproduce el comportamiento de un sistema complejo. Es una forma de “realizar” un experimento en el cual la realidad es sustituida por un modelo matemático. Puede considerarse como un híbrido entre experimentación pura y teórica. La simulación se utiliza para evitar el riesgo de experimentos que pudieran dar lugar a situaciones fuera de control que resulten en accidentes e incluso la muerte de personas.

Particularmente, por ejemplo, se pueden simular condiciones extremas de un reactor nuclear, sin hacerlo en una instalación real; o como es nuestro caso simular un contenedor para trasladar y almacenar material fisil y productos de fisión, sin llevarlo a cabo hasta que se obtengan las dosis adecuadas y estado de criticidad en los sitios convenientes en el simulador.

3.5.2 Método Monte Carlo.

Es una forma genérica de nombrar procedimientos matemáticos o métodos numéricos cuya característica común es la utilización de números generados aleatoriamente y el muestreo de distribuciones de probabilidad. Se hace uso de variables aleatorias definidas en un espacio dimensional finito y se calcula su valor esperado.

Esta herramienta matemática es una buena opción para problemas de índole estocástica, o que pueden plantearse en términos estocásticos.

Se tienen datos históricos de que aun antes del siglo XVIII se utilizó la técnica llamada Monte Carlo. El nombre fue acuñado en el siglo pasado y fue inspirado por el casino del mismo nombre, siendo introducido por Von Neumann y sus colaboradores cuando realizaron un estudio de la difusión de neutrones en su trabajo para el desarrollo de la bomba atómica, en Los Alamos, EUA.

Las operaciones básicas de la simulación Monte Carlo consisten en generar números aleatorios (o pseudos-aleatorios con algoritmos matemáticos), muestrear una variable de alguna distribución de probabilidad y encontrar parámetros estadísticos de utilidad al problema que se está resolviendo.

La principal limitación del método Monte Carlo es la obtención de suficiente precisión en los resultados. Entre más precisión se requiere, más eventos o muestreos deben hacerse y eso, en problemas complejos, lleva a utilizar mucho tiempo de cómputo. Existen opciones para reducir esos tiempos de computadora, como por ejemplo los métodos de reducción de varianza, la utilización de modelos simplificados o la subdivisión del problema en partes menos complejas.

El uso del método Monte Carlo se extiende a muy diversas áreas. Por citar algunas, entre sus aplicaciones está la solución de problemas de mecánica estadística, la evaluación de integrales, la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales, el modelado del crecimiento de bosques, estudios de contaminación, estudios del comportamiento de las acciones en la bolsa de valores, el crecimiento del PIB, el modelado de interacciones de las moléculas de ADN entre sí, y el modelado de la interacción de la radiación con la materia, siendo este último el que trataremos en este trabajo.

3.5.2.1 Simulación Monte Carlo del transporte de radiación.

La técnica Monte Carlo consiste en seguir a cada una de las partículas de un conjunto numeroso de las mismas, desde una fuente, a través de su vida hasta su desaparición en alguna de las categorías terminales como es la absorción o el escape del sistema.

La historia o trayectoria de una partícula es vista como una secuencia aleatoria de desplazamientos libres que terminan con un evento de interacción donde la partícula cambia su dirección de movimiento, pierde energía y puede generar partículas secundarias. Todo ello se realiza aplicando las leyes de la física, atendiendo las funciones de probabilidad determinadas por las secciones eficaces adecuadas y dependiendo del medio, la energía de la partícula y la disposición geométrica del sistema.

La siguiente figura representa la historia al azar de un neutrón incidente en una placa de un material que puede fisionarse.

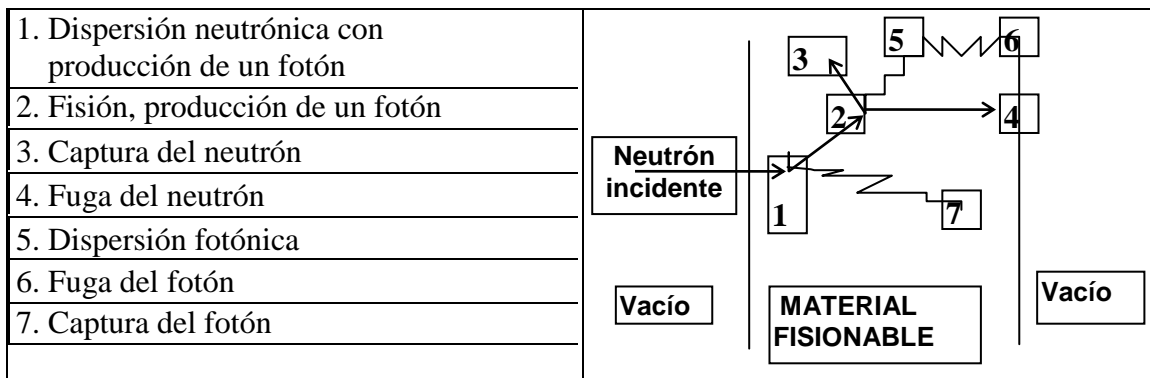


Figura 13: Historia al azar de un neutrón incidente en una placa de un material que puede fisionarse.

Se toman al azar números entre 0 y 1 para determinar qué interacción (si es posible) y dónde tiene lugar la misma, basándose en las reglas físicas y las probabilidades que gobiernan a los procesos y a los materiales involucrados.

Una colisión neutrónica ocurre **en el evento 1**. El neutrón es dispersado en la dirección mostrada (seleccionada al azar desde la distribución física de probabilidades de dispersión). Un fotón es producido y temporalmente guardado, para un análisis posterior.

En el evento 2, ocurre una fisión, resultando en la terminación del neutrón incidente y dando lugar al nacimiento de dos neutrones salientes y de un fotón. Un neutrón y el fotón son guardados para un análisis posterior.

El primer neutrón de fisión es capturado **en el evento 3** y termina su historia.

El neutrón guardado es ahora recuperado y, por un muestreo al azar, sale de la placa **en el evento 4**.

El fotón producido en la fisión tiene una colisión **en el evento 5** y sale de la placa **en el evento 6**.

El fotón restante, generado en el evento 1 es seguido ahora con una captura **en el evento 7**.

La historia está ahora completa

• Cuando más y más de tales historias son seguidas, las distribuciones neutrónicas y fotónicas se van conociendo mejor. Las cantidades de interés son computadas, junto con estimaciones de la incertidumbre estadística de los resultados.

Se han desarrollado códigos de simulación Monte Carlo del transporte de radiación que contienen modelos de interacción para definir las funciones de distribución de probabilidad para las distintas variables aleatorias que intervienen en cada proceso o suceso, y que

permiten obtener valores promedio de observables de interés como pueden ser la posición de las partículas después de cada interacción, el momento y pérdidas de energía de las partículas primarias o las secundarias generadas en algunas interacciones.

3.5.2.2 Códigos de simulación del transporte de radiación.

En forma breve se puede decir que el objetivo de estos códigos es simular el camino seguido por partículas que atraviesan medios materiales, atendiendo las leyes de la física y las probabilidades, a partir de ciertas condiciones iniciales de energía y tipo de partícula. El medio en el que se lleve a cabo la simulación puede ser en estado sólido (generalmente amorfo), líquido o gaseoso y el modelo geométrico del sistema se define utilizando la geometría analítica.

Se puede decir que lo que se hace con los códigos es resolver la ecuación de transporte de las partículas de una forma puramente estadística, lo cual representa ventaja sobre los métodos analíticos complejos que resuelven la ecuación de forma aproximada y para problemas sencillos.

Los códigos MC de transporte tienen modelos de interacción para las partículas que se van a simular, es decir, conjuntos de secciones diferenciales transversales para los mecanismos de interacción relevantes. Definen funciones de distribución de probabilidad para el camino libre entre interacciones, el tipo de interacción que tienen lugar y la pérdida de energía y deflexión angular de las partículas.

Entre los códigos o programas de simulación Monte Carlo para el transporte de partículas en medios materiales de actualidad están: EGS4, EGSnrc, PENELOPE, NOREC, MCNP y GEANT4. Algunos, como el MCNP y el GEANT, tienen el respaldo de miles de científicos y programadores que han trabajado en ellos de forma paralela y sucesiva desde su primera versión.

GEANT fue elaborado en el CERN para aplicaciones de altas energías y actualmente se puede utilizar para simular haces de un gran número de tipos de partículas (muones, piones, neutrinos, etc.), desde energías de unos cuantos cientos de eV hasta cientos de TeV para algunas partículas.

NOREC es específico para aplicaciones de microdosimetría, pero su manejo no es sencillo y está limitado a simular en agua sólo dos tipos de partículas: fotones y electrones.

PENELOPE se pueden simular cascadas de fotones, electrones y positrones en casi cualquier medio material sólido (amorfo), líquido o gaseoso, en geometrías que pueden definirse con superficies cuadradas, es decir, determinadas por una ecuación de segundo grado. Este código originalmente fue desarrollado para simular electrones, lo cual se puede hacer evento por evento, si son de baja energía, y con un respaldo teórico excelente.

MCNP fue desarrollado en Los Alamos, Estados Unidos, para simular sólo neutrones; sin embargo, actualmente puede utilizarse para simular del orden de 36 tipos de partículas en intervalos de energías desde unos keV hasta el orden de cientos de MeV en materiales muy diversos.

Cada código tiene sus particularidades y es mejor para aplicaciones distintas, por lo que se debe analizar cuál es el más adecuado al tipo de problema, escogiendo el más sencillo de acuerdo a nuestras habilidades y a la capacidad de cómputo con que se cuente, y que contenga las secciones eficaces o teorías físicas de respaldo más modernas para el tipo de partícula a simular.

3.5.3 Código MCNP.

Aunque no existe una receta para usar los programas MC en la simulación del paso de la radiación en medios materiales, para MCNP se procede de manera general como sigue. Una vez seleccionado el sistema a simular, se hace un modelo geométrico y se genera un archivo de entrada, en el lenguaje o formato del código; se definen los materiales que rellenan los volúmenes definidos y se generan los archivos o tarjetas de entrada de dichos materiales de acuerdo al formato requerido. Básicamente para cada material se introducen los elementos químicos que lo forman, el porcentaje en peso atómico de cada elemento y su densidad. Se establecen las condiciones iniciales de las fuentes como son la energía, posición, tipo de partícula y número de partículas, y se declaran las energías de corte o absorción. Finalmente, se estipula el grado de detalle con que debe efectuarse la simulación.

3.5.3.1 Descripción y herramientas empleadas.

Se genera un archivo de datos de entrada (**INP**) que es leído por MCNP. Este archivo contiene información sobre el problema particular que se está tratando:

1. Especificación de la geometría.
2. Descripción de los materiales.
3. Ubicación y características de la fuente de partículas cuyo transporte será simulado.
4. Tipo de respuestas (tallys) deseado.
5. Técnicas de reducción de variancia que se usarán para que el problema se ejecute más eficientemente.

1. Especificación de la geometría.

La geometría de MCNP trata una configuración tri-dimensional de materiales definidos por el usuario en **celdas** geométricas rodeadas por **superficie**

Las celdas se definen por **intersecciones**, **uniones**, y **complementos** de las regiones limitadas por las superficies.

Las superficies se definen dando los coeficientes de las ecuaciones analíticas correspondientes a cada superficie.

El programa efectúa un chequeo interno bastante detallado para encontrar posibles errores en los datos de entrada. Además, tiene la capacidad de graficar la geometría, lo cual es una importante ayuda para el usuario en la definición y el chequeo de la geometría de un problema particular.

MCNP utiliza, para el tratamiento de las **celdas geométricas**, un sistema de coordenadas Cartesianas.

Datos de celdas

Formato: **j m d geom params**

o: **j LIKE n BUT lista**

Explicación de los parámetros:

j = número de celda

m = 0 si la celda está vacía
= número del material si la celda no está vacía.
Esto indica que la celda contiene el material **m**,
que se especifica en el dato **Mm**.

d = ausente si la celda está vacía
= densidad del material de la celda.
Un valor positivo es interpretado como la densidad atómica,
en unidades de $10E24$ átomos/cm³.
Un valor negativo es interpretado como la densidad de masa,
en unidades de g/cm³.

geom = especificación de la geometría de la celda.
Este dato contiene números de superficies con signo, y operadores
Booleanos que especifican cómo se deben combinar las regiones
limitadas por las superficies.

params = especificación opcional de parámetros de la celda con entradas en la
forma **clave=valor**

n = nombre de otra celda

lista = conjunto de especificaciones en la forma **clave=valor** que definen los
atributos que difieren en la celda **j** respecto a la celda **n**.

clave = valor En las dos formas de entrar datos de celdas, puede especificarse una serie de
parámetros con su correspondiente clave, que a su vez están relacionados con datos
generales, pero que es conveniente incluirlos en las líneas de celdas en esta sección. De todas
las claves disponibles de este tipo, se han utilizado en este problema las siguientes: **IMP**, **U**,
FILL y **TRCL**.

IMP:n = xi -> Tipo de dato: de reducción de variancia.

n es **N** para neutrones, **P** para fotones y **E** para electrones;
xi es un número correspondiente a la importancia de la celda **i**;
Normalmente se pone **xi=1** para todas las celdas que contienen
materiales, y **xi=0** para el universo exterior siempre. Mas detalles

de este dato se incluyen en la Sesión 5B.

U=u Tipo de dato: **geometría**.
u es un número arbitrario elegido por el usuario.
Puede definirse un universo como integrado por una o más celdas, poniendo U=u con el mismo número u en todas las celdas que integran el universo u. Esta especificación está asociada con la clave FILL.

FILL=u Tipo de dato: geometría.
u es el número correspondiente a un universo definido en otra/s celdas con U=u.
Esta clave indica que la celda donde se incluye FILL=u es llenada con todas las celdas conteniendo la clave U=u.
Las celdas del universo u pueden ser finitas o infinitas, pero deben llenar todo el espacio interior de la celda donde se incluye FILL=u.

TRCL=n -> Tipo de dato: geometría.
n es el número correspondiente a un dato TRn (incluido en los datos generales-Sesión 4B), que especifica una transformación de coordenadas. También es posible dar directamente los parámetros de la transformación de coordenadas entre paréntesis (ver ejemplo). Esta facilidad permite definir solo una vez a las superficies que limitan a varias celdas idénticas entre sí en tamaño y forma pero que se encuentran en diferentes lugares geométricos. Mas detalles de este dato se incluyen en la Sesión 4B, en la descripción de la clave TRn.

En la especificación de la geometría, un número de superficie con signo posiciona a la región en el lado de la superficie donde los puntos tienen el sentido indicado. El signo + para el sentido positivo es opcional. Las regiones se combinan con los siguientes operadores:

1. intersección: implícito-sin símbolo (espacio en blanco);
2. unión: : (dos puntos)
3. complemento: # (numeral)

Pueden usarse paréntesis para controlar el orden de las operaciones. El orden por defecto de las operaciones es, primero: complemento, segundo: intersección, último: unión.

Un número inmediatamente después de un operador complemento, sin paréntesis, es interpretado como un número de celda, y es una abreviatura para la especificación de la geometría de esa celda.

2. Descripción de los materiales.

Solo se requiere si las celdas contienen materiales.

Forma: Mm ZAI1 FRAC1 ZAI2 FRAC2 ...

m: es el número del material (el mismo que se incluye en los datos de celda).
ZAI1 es un identificador en la forma ZZZAAA.nnX o ZZZAAA del elemento o

isótopo componente del material.
FRAC_i fracción atómica (o fracción en peso si es negativo) del componente i

ZZZ= número atómico,
AAA= masa atómica,
nn = identificador de la biblioteca de secciones eficaces,
X = clase de datos

3. Ubicación y características de la fuente de partículas cuyo transporte será simulado.

Para definir la fuente: MCNP nos permite especificar una amplia variedad de condiciones de fuentes. Se utiliza el concepto de distribuciones de probabilidades independientes para especificar variables de fuentes de energía, tiempo, posición y dirección, y para otros parámetros tales como las celdas o superficies iniciales.

También puede darse información sobre la extensión geométrica de la fuente. Además, algunas variables de fuentes pueden ser dependientes de otras variables, como por ejemplo, la energía en función del ángulo.

Como nuestro problema consta de dos configuraciones de cálculo se utilizaron las siguientes palabras claves para definir la fuente:

1. Para el cálculo de K_{ef}:
KCODE : define el problema de criticidad

Forma: KCODE NSRCK RKK{1} IKZ{5} KCT{0} MSRK{>4499} KNRM{0}

Explicación de los parámetros:

1. NSRCK = Número de neutrones por ciclo
(1 ciclo= 1 generación neutrónica).
Generalmente se toma en el rango (300-3000).
2. RKK = Un valor inicial aproximado del K_{ef}.
3. IKZ = Número de ciclos antes de comenzar la acumulación de los tallys y de promediar el K_{ef}. Normalmente se toman alrededor de 5 ciclos.
4. KCT = Número total de ciclos a ser calculados. Es conveniente empezar con unos pocos ciclos (por ejemplo 10), y luego continuar hasta que se llegue a valores confiables.
5. MSRK = Número de puntos-fuente (en general se adopta el valor por defecto).
6. KNRM = método de normalización de los tallys
0 : por pesos (valor por defecto comúnmente adoptado),
> 0 : número para normalizar los tallys.

KSRC: coordenadas geométricas donde se localizan los punto de la fuente neutrónica.

Forma: X1 Y1 Z1 X2 Y2 Z2 ... Xi Yi Zi = puntos de la fuente neutrónica (cm) en el material fisible para el primer ciclo.

2. Para el cálculo de TASA DE DOSIS:

SDEF: define en forma general la fuente de radiación.

Especificación de la fuente:

1. – SDEF: especificación general de fuente fija.
2. – Sli: información para la distribución i.
3. – Spi: probabilidad para la distribución i.
4. – Sci: comentario para la distribución i.

1. Especificación de fuente fija

Forma: SDEF variable de fuente = especificación...

Variables de fuentes (valores por defecto):

CEL= celda donde están las partículas-fuente iniciales.

ERG= energía de la fuente (MeV) {14 MEV}

VEC=x y z: vector de referencia para DIR (1 0 0: x ; 0 1 0: y ; 0 0 1: z)

NRM= 1 o -1 para emisión relativa a la normal a la superficie en fuente superficial {+1}

POS=x y z: punto de referencia para el muestreo de la posición {0,0,0}

RAD=r₁ r₂ ó Di: distancia radial de la posición desde POS o AXS {0}; aplicable a celdas.

EXT= distancia desde POS a lo largo de AXS (celda);

WGT= peso de la partícula fuente inicial {1}. Determina la actividad total de la fuente, expresada en partículas totales emitidas.

PAR= tipo de partícula de fuente: 1 para neutrón, 2 para fotón, o 3 para electrón {1 para MODE N..., 2 para MODE P..., y 3 para MODE E}

A los nombres de las variables siguen valores explícitos, números de distribuciones (1 a 999) prefijados con D, u otro nombre de variable prefijado con F seguido de un número de distribución prefijado con D (ej., ERG FPOS D8).

Si se incluye sólo SDEF sin otra especificación, esto significa una fuente puntual isotrópica de 14 MeV ubicada en 0,0,0 con peso=1.

2. Información de distribuciones de fuentes

Sli: información para la distribución i.

Forma: Sli opción{H} I1 I2 ... Ik

i = número de distribución (1 a 999)

opción= H o blanco para valores Ii de un histograma

= L para valores discretos de la variable

= A para puntos en los cuales se define una densidad de probabilidad

= S para números de distribución

Ii = valores de la variable o números de distribuciones

3. SPi: probabilidad para la distribución i.

Forma: SPi opción{D} P1 P2 ... Pk

o: f A B

- i = número de distribución (1 a 999)
 - opción = D probabilidades para una distribución H o L en Sli
 - = C probabilidades acumulativas para una distribución H o L en Sli
 - = V la probabilidad es proporcional al volumen de la celda
(para distribuciones volumétricas en celdas)
 - = omitido : igual que D para H o L
 - Pi = valores de las probabilidades

 - f = -2 espectro de fisión Maxwelliano (ERG). Usa A{1.2895}
 - = -3 espectro de fisión de Watt (ERG). Usa A{0.965} y B{2.29}
 - = -4 espectro de fisión Gaussiano (ERG). Usa A{-0.01} y B{-1.}
 - = -5 espectro de evaporación (ERG). Usa A{1.2895}
 - = -21 $p(x)=x**A$ (DIR,RAD,o EXT) ; A{DIR,1;RAD,1 o 2;EXT,0}
 - = -31 $p(x)=\exp(Ax)$ (DIR o EXT) ; A{0}
- A,B = parámetros para la función

4. SCi: comentario para la distribución i.

Forma: SCi comentario {no comentario}

4. Tipo de respuestas (tallys) deseado.

El usuario puede requerir a MCNP, por medio de instrucciones en los datos de entrada, que realice varios conteos (“tallys”) relacionados con la corriente y el flujo de las partículas. Todos los tallys estándar son normalizados por partícula. Las corrientes y los flujos pueden ser contados como una función de la dirección a través de cualquier conjunto de superficies, o de porciones o suma de superficies del problema. Los flujos también pueden ser tomados en celdas, o porciones o suma de celdas.

Además, los flujos en detectores especificados (puntuales o anulares) son tallys estándar. Tallys de calentamiento y de fisión dan información de la deposición de energía en celdas especificadas. Un producto del flujo por cualquiera de las aproximadamente 100 reacciones estándar disponibles y otras no-estándar puede ser calculado. Todos los tallys son funciones de la energía según las especificaciones del usuario.

Con los resultados de cada tally, se imprime su error relativo, correspondiente a una desviación estándar de su valor medio.

Las instrucciones de tallys se usan para especificar qué tipo de información quiere el usuario del cálculo Monte Carlo. Esa información es requerida usando una combinación de las siguientes instrucciones, aquí citamos solo las utilizadas en nuestro calculo. Para obtener resultados de tallys, se requiere sólo la instrucción Fn; las otras instrucciones son opcionales:

1. Fn:p crea tally n en celda, superficie o punto para la partícula p.
2. FCn = comentario para el tally n.

3. FMn = multiplicador general de tally n.
4. DF_n = función de conversión a dosis.

n: es un número de tally elegido por el usuario, de 1 a 3 dígitos.

1. Fn:p crea tally n en celda, superficie o punto para la partícula p

Forma : Fn :p C1 C2 C3 ... Ck T
 o: Fn :p C1 (C2 C3 ... Ci) ... Ck T

n = número de tally, de 1 a 3 dígitos (no debe terminar en 0, 3, o 9)

- =..1 tally de corriente integrada sobre una superficie
- =..2 tally de flujo promediado en una superficie
- =..4 tally de flujo promediado en celda/s
- =..5 tally de flujo en un punto (X Y Z + o - R0{0} ND)
- =..5X,5Y, o 5Z tally de flujo en un anillo (A R +o- R0{0} ND)
- =..6 tally de deposición de energía promediado en una celda
- =..7 tally de deposición de energía promediado en una celda

p = N, P, o E para n=1,2,3 o 4;

N o P para n=5;

N,P para n=6;

N para n=7;

Ci = número de celda o superficie donde se desea el tally

(C2 C3 ... Ci) crea una unión de Cs: suma (no-normalizado) o promedio (normalizado)

T = crea un tally sobre todas las celdas o superficies

X Y Z = coordenadas de la ubicación del detector

R0 = radio de la esfera para eliminar una singularidad

>0 es el radio, en cm

=0 se usa en vacío

<0 es un radio de -R0 caminos libres medios (no en vacío)

A = la letra X,Y, o Z para definir un detector anular alrededor de un eje principal

R = radio del anillo, en cm

Máximo número de tallys (Fn:p) en un problema: 100

Máximo número de tallys de detector (F..5): 20

2. FCn comentario para el tally n

n = número de tally (no puede ser 0 o blanco)

3. FMn multiplicador general de tally n

Forma: FMn (GRUPO 1) (GRUPO 2) ... T

n = número de tally

GRUPO i = ((MULTIPLICADOR 1)(MULTIPLICADOR 2)...(ATENUADOR))

T = total sobre todos los grupos (opcional)

ATENUADOR = C -1 m1 PX1 m2 PX2 ...

MULTIPLICADOR = C m (lista de reacciones 1)(lista de reacciones 2)...

C >0 es una constante multiplicativa para todos los tallys

<0 para tally de tipo 4 (significa multiplicar por -C por la densidad atómica de la celda donde se toma el tally)
 -1 indica que el grupo es atenuador en lugar de multiplicador
 mi = número del material identificado en una línea Mm
 PXi = densidad por espesor del material atenuador
 lista de reacciones i = sumas(:) y productos de números de reacciones.
 Los números de reacciones corresponden a los fijados en el formato endf, además de:

Neutrones:

- 2 sección eficaz de absorción (barns)
- 4 calentamiento medio (MeV/colisión)
- 5 sección eficaz de producción fotónica (barns)
- 6 sección eficaz total de fisión (barns)
- 7 nu de fisión (número de neutrones por fisión)
- 8 Q de fisión (MeV/fisión).

Fotones:

- 1 sección eficaz de dispersión incoherente (barns)
- 2 sección eficaz de dispersión coherente (barns)
- 3 sección eficaz de efecto fotoeléctrico (barns)
- 4 sección eficaz de producción de pares (barns)
- 5 sección eficaz total (barns)
- 6 calentamiento fotónico (MeV/colisión)

4. DFn función de conversión a dosis (usado con DEn)

Forma: DFn B{LOG} F1 F2 ... Fk
 (k debe ser el mismo k en DEn)

n = número de tally o 0 para aplicar a todos los tallys sin DFn .

B = blanco {o "LOG" } o "LIN" : método de interpolación para la tabla de función de dosis.

Fi = valores de la función de dosis.

Factores de conversión Flujo-a-Dosis para fotones

(modo de interpolación: log-log)

Energía (MeV)	DF (E) (rem/hr) / (p/cm2.s)
1.0E-02	3.96E-06
3.0E-02	5.82E-07
5.0E-02	2.90E-07
7.0E-02	2.58E-07
1.0E-01	2.83E-07
1.5E-01	3.79E-07
2.0E-01	5.01E-07
2.5E-01	6.31E-07
3.0E-01	7.59E-07
3.5E-01	8.78E-07
4.0E-01	9.85E-07
4.5E-01	1.08E-06

5.0E-01	1.17E-06
5.5E-01	1.27E-06
6.0E-01	1.36E-06
6.5E-01	1.44E-06
7.0E-01	1.52E-06
8.0E-01	1.68E-06
1.0	1.98E-06
1.4	2.51E-06
1.8	2.99E-06
2.2	3.42E-06
2.6	3.82E-06
2.8	4.01E-06
3.25	4.41E-06
3.75	4.83E-06
4.25	5.23E-06
4.75	5.60E-06
5.0	5.80E-06
5.25	6.01E-06
5.75	6.37E-06
6.25	6.74E-06
6.75	7.11E-06
7.5	7.66E-06
9.0	8.77E-06
1.1E+01	1.03E-05
1.3E+01	1.18E-05
1.5E+01	1.33E-05

3.5.4 Técnicas de reducción de variancia que se usarán para que el problema se ejecute más eficientemente.

La variancia es el cuadrado de la desviación estándar S_x . El error relativo estimado se puede expresar como $R = C/T^{1/2}$, donde C es una constante positiva. Entonces, hay dos maneras de reducir R: aumentando T y disminuyendo C. Si por ejemplo, un cálculo tarda 2 horas para obtener un $R=0.10$, se necesitarán 200 horas para obtener $R=0.01$. Por esa razón MCNP incluye algunas técnicas de reducción de variancia especiales para disminuir C (C depende de la elección de los tallys y de la forma en que se realizan los muestreos).

El modelo Monte Carlo más simple, para problemas de transporte de partículas, usa las probabilidades naturales de ocurrencia de los eventos (colisión, fisión, captura, etc.). Este es el llamado modelo Monte Carlo analógico porque es directamente análogo a la ocurrencia natural del transporte.

Aunque el modelo analógico es el más simple, hay otros modelos probabilísticos para el transporte de partículas que estiman el mismo valor medio, pero que son más útiles debido a que, aunque el valor medio permanece inalterado, la variancia de la estimación puede reducirse más rápidamente que en el caso analógico.

Un modelo Monte Carlo no-analógico trata de seguir a las partículas “interesantes” más frecuentemente que a las “no-interesantes”. Una partícula “interesante” es aquella que contribuye en una proporción importante a la cantidad que está siendo estimada. Hay varias técnicas no-analógicas, y todas tienen como finalidad aumentar la contribución de cada partícula a la cantidad que está siendo estimada.

En este trabajo solo se describirán las técnicas utilizadas en los cálculos planteados, ya que MCNP proporciona un conjunto de las mismas que se ajustan a cada problema particular. Se enumeran a continuación:

1. Importancias.
2. Corte por peso/ruleta rusa.
3. Corte por energía.
4. Captura implícita vs. captura analógica.
5. Transformación exponencial.
6. Colisiones forzadas.
7. División por energía/ruleta rusa.
8. Direccionamiento de la fuente.
9. Detectores puntuales.
10. Ventanas de peso.

3.5.4.1 Descripción de las técnicas usadas

1. **Importancias:** las partículas transportadas desde una región de mayor importancia a otra región de menor importancia (respecto al material que contiene y a su ubicación relativa a los puntos donde se quiere la cantidad a estimar) sufren el juego de “ruleta rusa”: algunas de esas partículas serán eliminadas, pero las que sobreviven tendrán un peso aumentado en forma proporcional. En esta forma, partículas menos importantes son seguidas menos frecuentemente, sin distorsionar la solución del problema. Por otro lado, si una partícula es transportada a una región de mayor importancia, ésta puede ser dividida en dos o más partículas, cada una con un peso menor. O sea que las partículas más importantes son seguidas más frecuentemente, y el peso total medio se conserva.

Se implementa por medio de la clave:

IMP: Importancia de cada celda en el problema. Requerida, si no se usan ventanas de peso.

Forma: IMP: p X1 X2 ... XI
(I=número de celdas en el problema)

p=N para neutrones, P para fotones, E para electrones, N,P o P,E o N,P,E

Xi=importancia de la celda i para la partícula de tipo p

=0 para terminar la partícula de tipo p cuando entra a la celda i

La importancia de una celda se usa para terminar la historia de partículas si su importancia es cero, para dividir a la partícula en regiones geométricas más importantes que otras.

9. **Detectores puntuales:** cuando necesitamos obtener una cantidad relacionada con el flujo en un punto del espacio, la probabilidad de transportar a una partícula precisamente a ese punto es muy baja. Entonces, se direccionan pseudo-partículas a ese punto. Cada vez que se genera la historia de una partícula desde la fuente, y cuando una partícula sufre una colisión,

el usuario puede requerir que sea contada una pseudo-partícula en un punto especificado del espacio.

10. Ventanas de peso: la técnica de ventanas de peso (vp) es una opción alternativa para implementar importancias y división por energía, especificando funciones de importancias en espacio y energía. Las ventajas de las vp son:

1. se usa una función en espacio y energía simultáneamente.
2. se controlan los pesos de las partículas.
3. son mas compatibles con otras técnicas de reducción de variancia, tales como la transformada exponencial.
4. pueden ser aplicadas en cruces de superficies, en colisiones , o en ambos.
5. puede controlarse la división y la ruleta rusa.
6. pueden ser desactivadas en regiones seleccionadas de espacio y energía.
7. pueden ser generadas automáticamente con el generador de vp.

La desventaja es que las vp no son tan directas de implementar como las importancias.

Las ventanas de peso son requeridas si no se usa la clave IMP.

Las claves para implementar vp son: WWE, WWN y WWP (algunas son opcionales). Los parámetros de esas claves pueden ser generados con una clave especial (WWG) la primera vez que se ejecuta el problema, para ser usadas en ejecuciones posteriores.

WWE Energías de ventanas de peso. Usada con WWN. Opcional.

Forma: WWE:n E1 E2 ... Ei ... Ej ($j \leq 99$)

n = N para neutrones, P para fotones, E para electrones

Ei = límite superior de energía de la ventana i-ésima

Ei-1= límite inferior de energía de la ventana i-ésima

E0 = 0, por definición

Valores por defecto: si la línea correspondiente a esta clave es omitida en INP, se establece un intervalo energético simple, correspondiente a los límites energéticos del problema.

Su uso es opcional y tiene sentido solamente si va acompañado de la línea con la clave WWN, ya que su función es definir los intervalos en energía para los cuales se especifican los parámetros de la clave WWN.

WWN: ventanas de peso. Requerida si no se usa IMP.

Forma: WWN:n wi1 wi2 ... wij ... wiJ
(J=número de celdas en el problema)

n = N para neutrones, P para fotones, E para electrones

wij = peso límite inferior en la celda j y en el intervalo energético

$E_{i-1} < E < E_i$, definido en WWE (si no se especifica WWE, $i=1$).

Esta clave especifica los pesos límites inferiores de las vp dependientes del espacio y la energía. WWN debe ser usada con WWP y, si las vp son dependientes de la energía, con WWE. La clave IMP:p no debe ser usada si se especifica WWN:p, donde p es el mismo tipo de partícula.

El significado de los w_{ij} es:

Si w_{ij}<0, toda partícula que entra a la celda j es eliminada.

Si w_{ij}>0, las partículas que entran o colisionan en la celda j son divididas o sufren el juego de ruleta rusa según las opciones en WWP (ver mas adelante).

Si w_{ij}=0, el juego vp es desactivado en la celda j para el intervalo energético i, y se activa el juego de corte por peso. Las partículas que entran a las celdas con w_{ij}=0 serán eliminadas según el juego de corte por peso.

WWP Control de ventanas de peso. Usada con WWN. Opcional.

Forma:

WWP:p WUPN{5} WSURVN{0.6*WUPN} MXSPLN{5} MWHERE{0} SWITCHN{0}
p=N para neutrones, P para fotones, E para electrones

Los parámetros de esta clave controlan el uso de los ww_{ij} especificados en WWN. Generalmente se aceptan los valores por defecto.

3.5.4.2 Generación de ventanas de peso

El generador de vp estima las importancias de las regiones de espacio-energía especificadas por el usuario. Los parámetros ww_{ij} son luego calculados como inversamente proporcionales a las importancias. El generador debería ser usado en problemas que no tienen una dependencia angular muy importante y con la geometría adecuadamente especificada para propósitos de muestreo. El generador informa si la especificación de la geometría es adecuada para propósitos de muestreo.

Hay dos claves para generación de los parámetros para vp a ser usadas en ejecuciones posteriores del mismo problema: WWG y WWGE.

WWG Generador de ventanas de peso. Opcional.

Form: WWG It Ic Wg xr yr zr J

It = número de tally (n de la línea con Fn). n es el tally particular para el cual se optimará el generador de vp

Ic = celda de referencia, generalmente una celda conteniendo la fuente

Wg = valor de ww para la celda Ic. Si Wg=0, será la mitad del peso medio de la fuente (recomendado)

xr yr zr = coordenadas del punto hacia el cual se mueven las partículas preferencialmente (por ejemplo, la ubicación de un detector puntual)

J = indicador de impresión de detalles de la generación. J=0/1=si/no.

Esta clave con sus parámetros generan la función importancia óptima para el tally it incluidas en las líneas con las claves WWP y WWNi, que son impresas en OUTP. Esas líneas deben

ser incluidas en la sección de datos generales del archivo INP del mismo problema, para ejecuciones posteriores.

WWGE Intervalos de energía para generación de ventanas de peso.

Forma: WWGE:n E1 E2 ... Ei ... EJ (J=15)

- n = N para neutrones, P para fotones, E para electrones
- Ei = límite superior de energía de la ventana i-ésima a ser generada
- Ei-1= límite inferior de energía de la ventana i-ésima
- E0 = 0, por definición

Valores por defecto: Si la línea correspondiente a esta clave es omitida en INP, se establece un intervalo energético simple, correspondiente a los límites energéticos del problema. Si está presente esta clave sin parámetros, se generan diez intervalos energéticos con $E_i=10E(i-8)$ MeV y $J=10$.

3.5.5 Concepto de precisión en MCNP

Aquí escribiré los elementos principales del concepto **precisión** en MCNP usados en el programa.

Todos los tallys en MCNP están normalizados por partícula-fuente, y se imprimen en la salida de resultados junto a un número **R**, que es el error relativo estimado, definido como la desviación estándar estimada de la media, S_x dividida por el valor medio estimado x

$$R = S_x/x. \quad (7)$$

x es el valor medio de los resultados x_i para todas las N historias calculadas en el problema.

$$x = (1/N)\sum_{i=1,N}x_i. \quad (8)$$

La desviación estimada estándar S_x de la población de x , basada en los valores de x_i que fueron calculados, está dada por

$$S_x^2 \sim x^2 - \bar{x}^2; \quad \bar{x}^2 = (1/N) \sum_{i=1,N}x_i^2 \quad (9)$$

En MCNP, las cantidades requeridas para esta estimación de error - el tally y su momento segundo - son calculadas después de completarse cada historia. R será proporcional a $1/(N)^{1/2}$, donde N es el número de historias. Entonces, para disminuir R a la mitad, se debe aumentar el número total de historias cuatro veces.

El error relativo debe ser usado para estimar la confiabilidad del resultado respecto a su aproximación al valor real. Es muy importante tener presente que esta confiabilidad está relacionada solamente con la precisión del cálculo Monte Carlo en sí mismo, y no con la exactitud del resultado comparado con el valor físico verdadero. Para estimar la exactitud, se

requiere un análisis detallado de la incertidumbre en los datos físicos, como también del modelado, de las técnicas de muestreo, y de las aproximaciones usadas en el cálculo.

Una guía para interpretar la calidad del intervalo de confianza para varios valores de R se lista a continuación:

<u>Rango de R</u>	<u>Calidad del Tally</u>
0.5 a 1	Sin significado
0.2 a 0.5	No confiable
0.1 a 0.2	Cuestionable
< 0.10	Generalmente aceptable
<0.05	Aceptable para detectores puntuales

Estas interpretaciones de R asumen que todas las partes del espacio de las fases del problema fueron correctamente muestreadas por los procesos Monte Carlo.

Puede ocurrir que algunos caminos no sean suficientemente muestreados, haciendo que los intervalos de confianza sean incorrectos. Para tratar de informar al usuario sobre este comportamiento, MCNP calcula una cantidad llamada figura de mérito (FOM- figure of merit) para cada grupo de un tally, en función del número de historias, e imprime los resultados al final de la salida.

El FOM se define como:

$$\mathbf{FOM=1/(R^2T)} \qquad (10)$$

donde T es el tiempo de computadora, en minutos. Cuanto más eficiente es un cálculo Monte Carlo, mayor será el FOM, ya que se requerirá menor tiempo de computadora para llegar a un valor dado de R.

El FOM debería ser aproximadamente constante a medida que N aumenta, debido a que R^2 es proporcional a $1/N$ y T es proporcional a N. Siempre se deben examinar los resultados de fluctuación de tallys para asegurarse que el tally muestre un buen comportamiento (un valor aproximadamente constante de su FOM). Una aguda disminución del FOM indica que algún camino de las partículas en el muestreo, afecta significativamente al resultado del tally y a su error relativo estimado.

4 CONCLUSIONES

Las simulaciones del transporte de partículas mediante el Método Montecarlo utilizando el código MCNP para estimar el factor de multiplicación neutrónica, arrojaron como resultado valores de $K_{ef} < 1$ (sistema subcríticos) en todos los modelos para las condiciones normales de operación. En condición accidental, solo resulto ser $K_{ef} > 1$ (sistema supercrítico) en los modelos de referencia I y II, los cuales se utilizan para validar los modelos mas cercanos a la situación problemática planteada.

La estimación de la Tasa de Dosis Gamma en contacto con el contenedor sobre todo su volumen arroja valores inferiores a 1 mSv/h.

Los resultados de los cálculos de criticidad y tasa de dosis contemplados en el diseño del contenedor de filtros garantizan la Seguridad Nuclear y la Protección Radiológica de las personas, bienes y medio ambiente cumpliendo con las normas regulatorias vigentes.

5 REFERENCIAS

1. “Los Alamos National Laboratory” <http://mcnpx.lanl.gov/>
2. Roger Brewer X-1 TA Los Alamos National Laboratory, “Criticality Calculations with MCNP5: A Primer” MCNO5 Manual **VOL I** , MCNO5 Manual **VOL II** ,MCNO5 Manual **VOL III**, (2009)
3. IAEA , “Diseño de los sistemas de manipulación y almacenamiento del combustible de las centrales nucleares”, Guía de Seguridad N° NS-G-1.4 (2008).
4. Álvaro García Sánchez - Miguel Ortega Mier “Simulación de Sistemas Discretos” (2006)
5. Waldman, R.M. y Canavese ,“Prevención de Accidentes de Criticidad en Instalaciones Relevantes Argentinas”, S.I. Memoria Técnica de la ARN (1998).
6. International Commission on Radiation Units and Measurements/I C R U report 44 , “ International Commission on Radiation Units and Measurements” (1989)
7. Francisco Leszczynski, Centro Atómico Bariloche Comisión Nacional de Energía Atómica.,”TECNICAS DE ESTRUCTURAS REPETIDAS EN MCNP”. Guía Práctica.
8. Francisco Leszczynski Centro Atómico Bariloche Comisión Nacional de Energía Atómica.,”TECNICAS DE REDUCCION DE VARIANZA EN MCNP” Guía Práctica.
9. A.R.N, Norma Básica de Seguridad Radiológica 10.1.1 ,revisión 3 (2003)
10. A.R.N, Norma de Transporte de material Radiactivo 10.16.1 revisión 2 (2002)
11. Samuel Glasstone.,”Ingeniería de Reactores Nucleares” Editorial Reverté, Barcelona, España (1990)

6 ANEXOS

ANEXO I

Ce144

Energias (Mev)	Intensidad Rel.	K	Act	Intensidad Absoluta
0.133515	100	0.1109	5.66E+07	6.27E+06
0.08012	12.3	0.1109	5.66E+07	7.72E+05
0.04098	2.32	0.1109	5.66E+07	1.46E+05
0.033568	1.8	0.1109	5.66E+07	1.13E+05
0.053395	0.9	0.1109	5.66E+07	5.65E+04
0.099961	0.36	0.1109	5.66E+07	2.26E+04
0.05903	0.0088	0.1109	5.66E+07	5.52E+02
				7.38E+06

Energias (Mev)	Intensidad		Act	Intensidad Absoluta
	Rel.	K		
0.427874	100	0.298	55763369.4	16617484.07
0.600597	59.62	0.298	55763369.4	9907344.004
0.63595	37.9	0.298	55763369.4	6298026.463
0.463365	35.45	0.298	55763369.4	5890898.104
0.606713	16.83	0.298	55763369.4	2796722.569
0.176314	23.11	0.298	55763369.4	3840300.569
0.671441	6.049	0.298	55763369.4	1005191.612
0.380452	5.124	0.298	55763369.4	851479.8839
0.035489	15.2	0.298	55763369.4	2525857.579
0.443555	1.035	0.298	55763369.4	171990.9602
0.32104	1.404	0.298	55763369.4	233309.4764
0.408065	0.623	0.298	55763369.4	103526.9258
0.204138	1.07	0.298	55763369.4	177807.0796
0.208077	0.837	0.298	55763369.4	139088.3417
0.172719	0.646	0.298	55763369.4	107348.9471
0.116955	0.887	0.298	55763369.4	147397.0837
0.227891	0.443	0.298	55763369.4	73615.45444
0.20932	0.152	0.298	55763369.4	25258.57579
0.178842	0.114	0.298	55763369.4	18943.93184
0.6174	0.018	0.298	55763369.4	2991.147133
0.36656	0.027	0.298	55763369.4	4486.7207
0.198654	0.0432	0.298	55763369.4	7178.753119
0.40195	0.021	0.298	55763369.4	3489.671655
0.49129	0.016	0.298	55763369.4	2658.797452
0.49737	0.014	0.298	55763369.4	2326.44777
0.5031	0.013	0.298	55763369.4	2160.272929
0.6528	0.009	0.298	55763369.4	1495.573567
0.31495	0.0136	0.298	55763369.4	2259.977834
0.05843	0.05	0.298	55763369.4	8308.742036
0.33182	0.0085	0.298	55763369.4	1412.486146
0.53862	0.0047	0.298	55763369.4	781.0217514
0.48973	0.0046	0.298	55763369.4	764.4042673
0.7298	0.0025	0.298	55763369.4	415.4371018
0.08102	0.017	0.298	55763369.4	2824.972292
0.0198	0.069	0.298	55763369.4	11466.06401
0.06185	0.007	0.298	55763369.4	1163.223885
0.110895	0.0035	0.298	55763369.4	581.6119425
0.13281	0.0029	0.298	55763369.4	481.9070381
0.6933	0.00031	0.298	55763369.4	51.51420062
				50988890.38

Eu 155

Energias (Mev)	Intensidad Rel.	K	Act	Intensidad Absoluta
0.086545	100	0.307	615707607	189022235.4
0.105305	68.9	0.307	615707607	130236320.2
0.0600086	3.68	0.307	615707607	6956018.262
0.0452972	4.32	0.307	615707607	8165760.568
0.086062	0.49	0.307	615707607	926208.9533
0.026532	1.03	0.307	615707607	1946929.024
0.146061	0.169	0.307	615707607	319447.5778
0.0579805	0.217	0.307	615707607	410178.2508
0.04075	0.086	0.307	615707607	162559.1224
0.018764	0.16	0.307	615707607	302435.5766
0.0138	0.064	0.307	615707607	120974.2306
0.031444	0.023	0.307	615707607	43475.11414
0.02456	0.025	0.307	615707607	47255.55884
0.0127	0.032	0.307	615707607	60487.11532
0.01049	0.0159	0.307	615707607	30054.53542
0.1076	0.0013	0.307	615707607	2457.28906
0.021036	0.00153	0.307	615707607	2892.040201
				338755688.8

Cs 137

Energias (Mev)	Intensidad Rel.	K	Intensidad Absoluta
0.2835	0.00058	1	0.0000058
0.661657	85.1	1	0.851
	85.10058		

Te 129

Energias (Mev)	Intensidad Rel.	K	Act	Intensidad Absoluta
0.4596	100	0.077	9.28767E-28	7.1515E-29
0.48739	18.4	0.077	9.28767E-28	1.31588E-29
1.08385	6.4	0.077	9.28767E-28	4.57696E-30
0.02781	212	0.077	9.28767E-28	1.51612E-28
1.11164	2.48	0.077	9.28767E-28	1.77357E-30
0.27843	7.36	0.077	9.28767E-28	5.26351E-30
0.8021	2.49	0.077	9.28767E-28	1.78072E-30
0.25062	4.97	0.077	9.28767E-28	3.5543E-30

			28	
0.62434	1.26	0.077	9.28767E-28	9.01089E-31
0.53183	1.14	0.077	9.28767E-28	8.15271E-31
0.28126	2.14	0.077	9.28767E-28	1.53042E-30
0.83328	0.59	0.077	9.28767E-28	4.21939E-31
0.20896	2.34	0.077	9.28767E-28	1.67345E-30
0.74096	0.486	0.077	9.28767E-28	3.47563E-31
0.8046	0.28	0.077	9.28767E-28	2.00242E-31
0.34288	0.64	0.077	9.28767E-28	4.57696E-31
0.98227	0.208	0.077	9.28767E-28	1.48751E-31
1.26063	0.145	0.077	9.28767E-28	1.03697E-31
1.26416	0.106	0.077	9.28767E-28	7.58059E-32
1.23282	0.097	0.077	9.28767E-28	6.93696E-32
0.82993	0.083	0.077	9.28767E-28	5.93575E-32
0.56005	0.079	0.077	9.28767E-28	5.64969E-32
0.76877	0.055	0.077	9.28767E-28	3.93333E-32
0.34254	0.11	0.077	9.28767E-28	7.86665E-32
1.01943	0.029	0.077	9.28767E-28	2.07394E-32
0.5515	0.046	0.077	9.28767E-28	3.28969E-32
1.01357	0.017	0.077	9.28767E-28	1.21576E-32
0.27037	0.06	0.077	9.28767E-28	4.2909E-32
0.73262	0.017	0.077	9.28767E-28	1.21576E-32
0.72957	0.016	0.077	9.28767E-28	1.14424E-32
0.55198	0.018	0.077	9.28767E-28	1.28727E-32
1.05021	0.009	0.077	9.28767E-28	6.43635E-33

1.02243	0.009	0.077	9.28767E-28	6.43635E-33
0.49193	0.015	0.077	9.28767E-28	1.07273E-32
0.91829	0.008	0.077	9.28767E-28	5.7212E-33
0.76901	0.0093	0.077	9.28767E-28	6.6509E-33
0.2817	0.02	0.077	9.28767E-28	1.4303E-32
1.2915	0.0036	0.077	9.28767E-28	2.57454E-33
0.21066	0.017	0.077	9.28767E-28	1.21576E-32
0.41588	0.008	0.077	9.28767E-28	5.7212E-33
0.38208	0.008	0.077	9.28767E-28	5.7212E-33
0.93157	0.0027	0.077	9.28767E-28	1.93091E-33
0.77354	0.003	0.077	9.28767E-28	2.14545E-33
0.7225	0.003	0.077	9.28767E-28	2.14545E-33
1.18196	0.0015	0.077	9.28767E-28	1.07273E-33
0.46204	0.003	0.077	9.28767E-28	2.14545E-33
0.7011	0.0017	0.077	9.28767E-28	1.21576E-33
1.1688	0.0006	0.077	9.28767E-28	4.2909E-34
0.817	0.0008	0.077	9.28767E-28	5.7212E-34
0.28138	0.002	0.077	9.28767E-28	1.4303E-33
0.70176	0.0006	0.077	9.28767E-28	4.2909E-34
0.2422	0.00002	0.077	9.28767E-28	1.4303E-35
				2.60449E-28

Zr 95

Energías (Mev)	Intensidad Rel.	K	Act	Intensidad Absoluta
0.756729	100	0.5446	4.86911E-08	2.65172E-08
0.724199	81.11	0.5446	4.86911E-08	2.15081E-08

0.23569	0.54	0.5446	4.86911E-08	1.43193E-10 4.81685E-08
---------	------	--------	-------------	----------------------------

Nb 95

Energias (Mev)	Intensidad Rel.	K	Act	Intensidad Absoluta
0.20412	100	0.416	3.27882E-26	1.36399E-26
0.58207	2.35	0.416	3.27882E-26	3.20537E-28
0.78616	0.68	0.416	3.27882E-26	9.27512E-29
0.82061	0.016	0.416	3.27882E-26	2.18238E-30
0.83513	0.0011	0.416	3.27882E-26	1.50039E-31 1.40555E-26

Ru 103

Energias (Mev)	Intensidad Rel.	K	Act	Intensidad Absoluta
0.29498	0.333	0.91	5.9217E-21	1.79445E-23
0.497084	100	0.91	5.9217E-21	5.38875E-21
0.61033	6.33	0.91	5.9217E-21	3.41108E-22
0.55704	0.954	0.91	5.9217E-21	5.14086E-23
0.4438	0.379	0.91	5.9217E-21	2.04233E-23
0.61202	0.118	0.91	5.9217E-21	6.35872E-24
0.053275	0.487	0.91	5.9217E-21	2.62432E-23
0.31777	0.021	0.91	5.9217E-21	1.13164E-24
0.5146	0.0125	0.91	5.9217E-21	6.73593E-25
0.6518	0.0076	0.91	5.9217E-21	4.09545E-25
0.24188	0.0198	0.91	5.9217E-21	1.06697E-24
0.35739	0.0103	0.91	5.9217E-21	5.55041E-25
0.03976	0.076	0.91	5.9217E-21	4.09545E-24

0.2927	0.0063	0.91	5.9217E-21	3.39491E-25
0.56787	0.0031	0.91	5.9217E-21	1.67051E-25
0.11497	0.0081	0.91	5.9217E-21	4.36488E-25
0.11325	0.0039	0.91	5.9217E-21	2.10161E-25
0.04263	0.0057	0.91	5.9217E-21	3.07158E-25
0.06241	0.00048	0.91	5.9217E-21	2.5866E-26
0.31772	0.000007	0.91	5.9217E-21	3.77212E-28
				5.86165E-21

ANEXO II

Cálculo de criticidad

Modelo I

Message: ixr

c Cálculo de criticidad para filtros

c Datos de celdas

1 2 -2.17 -1

2 1 -0.0012 1 -2

3 3 -2.350E-3 2 -3

4 1 -0.0012 3 -4

5 0 4

c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies

1 so 12.25

2 rpp -150 150 -150 150 -30 250

3 rpp -180 180 180 180 -60 280

4 so 450

c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales

M1 7014 -0.77 8016 -0.23

M2 92235 -0.0845 8016 -0.0115 92238 -0.00934 8016 -0.001256 13027 -0.2615 &
8016 -0.4649 1001 -0.0290 1001 -0.0153 8016 -0.1224

M3 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &
8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &
8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14

c M4 1001 -0.111 8016 -0.888

c Fin de los datos de materiales

c

c Criticidad

KCODE 1000 0.5 10 800

KSRC 0 0 0

c

c Datos generales

c nps 1000000000

c ctme 10

prdmp 2j 1

mode n

print

imp:n 1 2r 0

Modelo II

Message: ixr

c Cálculo de criticidad para filtros

c Datos de celdas

1 2 -2.17 -1

2 1 -0.0012 1 -2

3 3 -2.350E-3 2 -3

4 1 -0.0012 3 -4

5 0 4

c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies

1 rcc 0 0 0 0 16.3 12.24

2 rpp -150 150 -150 150 -30 250

3 rpp -180 180 180 180 -60 280

4 so 450

c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales

M1 7014 -0.77 8016 -0.23

M2 92235 -0.0845 8016 -0.0115 92238 -0.00934 8016 -0.001256 13027 -0.2615 &
8016 -0.4649 1001 -0.0290 1001 -0.0153 8016 -0.1224

M3 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &
8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &
8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14

c M4 1001 -0.111 8016 -0.888

c Fin de los datos de materiales

c

c Criticidad

KCODE 1000 0.5 10 800

KSRC 0 0 45
c
c Datos generales
c nps 1000000000
c ctme 10
prdmp 2j 1
mode n
print
imp:n 1 2r 0

Modelo III

Message: ixr

c Cálculo de criticidad para filtros
c Datos de celdas
1 7 -5.0 -1 U=1
2 8 -2.45 -2 U=1
3 1 -0.0012 -3 U=1
4 3 -7.9 -4 U=1
5 1 -0.0012 -5 U=1
6 3 -7.9 #1 #2 #3 #4 #5 U=1
7 0 -6 FILL=1 U=2
8 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=2
9 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=2
11 1 -0.0012 #7 #8 #9 U=2
13 3 -7.9 7 U=3
131 0 -8 FILL=3 U=4
14 6 -2.350E-3 #20 #21 #22 #23 #24 #25 #26 #27 #28 #29 #30 #31 &
#32 #33 #34 #35 #36 #37 #38 #39 #40 8 -9 U=4
15 2 -7.8 9 -10 U=4
16 1 -0.0012 10 -101 U=4
161 5 -11.35 101 -11 U=4
17 2 -7.8 11 -12 U=4
18 1 -0.0012 12 -13 U=4
19 1 -0.0012 15 -16
20 LIKE 131 BUT TRCL=(0 0 43)U=4
21 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 0)U=4
22 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 43)U=4
23 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 0)U=4
24 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 43)U=4
25 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 0)U=4
26 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 43)U=4
27 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 0 0)U=4
28 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 0 43)U=4
29 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 0)U=4
30 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 43)U=4
34 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 43)U=4
35 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 0)U=4

36 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 43)U=4
37 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 0)U=4
38 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 43)U=4
39 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 0)U=4
40 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 43)U=4
41 0 -14 FILL=4 U=5
411 1 -1 #41 U=5
44 0 -13 FILL=5
45 6 -2.350E-3 13 -15
46 0 16
c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies
1 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 0.5 2.9
2 rcc 5.5 5.5 0.8 0 0 4.4 2.9
3 rcc 5.5 5.5 5.2 0 0 1.1 2.9
4 rcc 5.5 5.5 6.3 0 0 1.5 2.9
5 rcc 5.5 5.5 7.8 0 0 3.8 2.9
8 rcc 5.5 5.5 0 0 0 38.9 5.5
c 81 rcc 0 0 0 0 0 39 6
9 rcc 0 0 0 0 0 83.8 29.6
10 rcc 0 0 0 0 0 84 29.8
101 rcc 0 0 0 0 0 86 32.8
11 rcc 0 0 0 0 0 86 34.8
12 rcc 0 0 -5 0 0 105 35
13 rpp -50 170 -50 170 -6 250
14 rcc 0 0 -5.5 0 0 105.5 35.5
15 rpp -80 200 -80 200 -36 280
16 so 450
c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales
M1 7014 -0.77 8016 -0.23
M2 26000 -0.7 6000 -0.3
M3 26000 -0.7 28000 -0.1 24000 -0.19 6000 -0.01
c M4 1001 -0.111 8016 -0.888
M5 82207 -1
M6 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &
8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &
8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14
M7 28000 -0.018 42000 -0.005 29000 -0.015 6000 -0.005 26000 -0.957 M8 92235 -0.193
8016 -0.026 92238 -0.0229 8016 -0.001288 13027 -0.214 &
8016 -0.381 1001 -0.0238 1001 -0.0152 8016 -0.122
c Fin de los datos de materiales

c
c Criticidad
KCODE 1000 0.5 10 800
KSRC 5.5 5.5 3 5.5 5.5 14.6 &
5.5 5.5 57 55 5.5 69 &

7.5 5.5 3 -7.5 5.5 14.6 &
-7.5 5.5 26.2 75 5.5 46 &
7.5 5.5 57 -7.5 55 69 &
-0.5 -7 3 -0.5 -7 14.6 &
-0.5 -7 2.2 -0.5 -7 46 &
-0.5 -7 57 -0.5 -7 69

c

c Datos generales

prtmp 2j 1

mode n

print

imp:n 1 34r 0

Modelo IV

Message: ixr

c Cálculo de criticidad para filtros

c Datos de celdas

1 7 -5.0 -1 U=1

2 8 -2.17 -2 U=1

3 1 -0.0012 -3 U=1

4 3 -7.9 -4 U=1

5 1 -0.0012 -5 U=1

7 0 -6 FILL=1 U=2

8 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=2

9 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=2

c 10 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 34.8)U=2

11 1 -0.0012 #7 #8 #9 U=2

12 0 -7 FILL=2 U=3

13 3 -7.9 7 U=3

131 0 -8 FILL=3 U=4

14 6 -2.350E-3 #20 #21 #22 #23 #24 #25 #26 #27 #28 #29 #30 #31 &
#32 #33 #34 #35 #36 #37 #38 #39 #40 8 -9 U=4

15 2 -7.8 9 -10 U=4

16 1 -0.0012 10 -101 U=4

161 5 -11.35 101 -11 U=4

17 2 -7.8 11 -12 U=4

18 1 -0.0012 12 -13 U=4

19 1 -0.0012 15 -16

20 LIKE 131 BUT TRCL=(0 0 43)U=4

21 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 0)U=4

22 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 43)U=4

23 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 0)U=4

24 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 43)U=4

25 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 0)U=4

26 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 43)U=4

27 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 0 0)U=4

28 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 0 43)U=4

29 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 0)U=4
30 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 43)U=4
33 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 0)U=4
34 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 43)U=4
35 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 0)U=4 7
36 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 43)U=4
37 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 0)U=4
38 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 43)U=4
39 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 0)U=4
40 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 43)U=4
41 0 -14 FILL=4 U=5
411 1 -1 #41 U=5
44 0 -13 FILL=5
45 6 -2.350E-3 13 -15
46 0 16
c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies

1 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 0.5 2.9
2 rcc 5.5 5.5 0.8 0 0 4.4 2.9
3 rcc 5.5 5.5 5.2 0 0 1.1 2.9
4 rcc 5.5 5.5 6.3 0 0 1.5 2.9
5 rcc 5.5 5.5 7.8 0 0 3.8 2.9
6 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 11.6 3.15
7 rcc 5.5 5.5 0.2 0 0 37.2 5.1
8 rcc 5.5 5.5 0 0 0 38.9 5.5
9 rcc 0 0 0 0 0 83.8 29.6
12 rcc 0 0 -5 0 0 105 35
13 rpp -50 170 -50 170 -6 250
14 rcc 0 0 -5.5 0 0 105.5 35.5
15 rpp -80 200 -80 200 -36 280
16 so 450

c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales

M1 7014 -0.77 8016 -0.23
M2 26000 -0.7 6000 -0.3
M3 26000 -0.7 28000 -0.1 24000 -0.19 6000 -0.01
c M4 1001 -0.111 8016 -0.888
M5 82207 -1
M6 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &
8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &
8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14
M8 92235 -0.0845 8016 -0.0115 92238 -0.00934 8016 -0.001256 13027 -0.2615 &
8016 -0.4649 1001 -0.0290 1001 -0.0153 8016 -0.1224

c Fin de los datos de materiales

c

c Criticidad

KCODE 1000 0.5 10 800

KSRC 5.5 5.5 3 5.5 5.5 14.6 &
5.5 5.5 26.2 5.5 5.5 46 &
-7.5 5.5 26.2 -75 5.5 46 &
7.5 5.5 57 -7.5 5.5 69 &
-0.5 -7 3 -0.5 -7 14.6 &
-0.5 -7 26.2 -0.5 -7 46 &
-0.5 -7 57 0.5 7 69

c

c Datos generales

prdmp 2j 1

mode n

print

imp:n 1 37r 0

Modulo V

Message: ixr

c Cálculo de criticidad para filtros

c Datos de celdas

1 7 -5.0 -1 U=1

2 8 -2.14 -2 U=1

3 1 -0.0012 -3 U=1

4 3 -7.9 -4 U=1

5 1 -0.0012 -5 U=1

6 3 -7.9 #1 #2 #3 #4 #5 U=1

7 0 -6 FILL=1 U=2

8 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=2

9 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=2

11 1 -0.0012 #7 #8 #9 U=2

12 0 -7 FILL=2 U=3

13 3 -7.9 7 U=3

131 0 -8 FILL=3

14 7 -5.0 -9 U=4

15 9 -2.2 -10 U=4

16 1 -0.0012 -11 U=4

17 3 -7.9 -12 U=4

18 1 -0.0012 -13 U=4

19 3 -7.9 #14 #15 #16 #17 #18 U=4

20 0 -14 FILL=4 U=5

21 LIKE 20 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=5

23 1 -0.0012 #20 #21 #22 U=5

24 0 -15 FILL=5 U=6

241 3 -7.9 15 U=6

251 0 -16 FILL=6

26 6 -2.350E-3 #251 #131 #32 #33 #34 #35 #36 #37 #38 #39 #40 #41 #42 &
#43 #44 #45 #46 #47 #48 #49 #50 #51 16 -17

261 2 -7.8 17 -18

27 1 -0.0012 18 -19

271 5 -11.35 19 -20

28 2 -7.8 20 -21
29 1 -0.0012 21 -23
30 1 -0.0012 24 -25
32 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 0)
33 LIKE 251 BUT TRCL=(-19 13 0)
34 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 0)
35 LIKE 251 BUT TRCL=(-6 -13 0)
36 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 0)
37 LIKE 251 BUT TRCL=(7 13 0)
38 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 0 0)
39 LIKE 251 BUT TRCL=(-13 0 0)
40 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 0)
41 LIKE 251 BUT TRCL=(-19 -13 0)
42 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 13 0)
43 LIKE 251 BUT TRCL=(-6 13 0)
47 LIKE 251 BUT TRCL=(7 -13 0)
48 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 0)
49 LIKE 251 BUT TRCL=(-13 -26 0)
50 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 0)
51 LIKE 251 BUT TRCL=(-26 0 0)
52 1 -0.0012 23 -22
54 6 -2.350E-3 22 -24
55 0 25
c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies

1 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 0.5 2.9
2 rcc 5.5 5.5 0.8 0 0 4.4 2.9
3 rcc 5.5 5.5 5.2 0 0 1.1 2.9
4 rcc 5.5 5.5 6.3 0 0 1.5 2.9
5 rcc 5.5 5.5 7.8 0 0 3.8 2.9
6 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 11.6 3.15
7 rcc 5.5 5.5 0.2 0 0 37.2 5.1
8 rcc 5.5 5.5 0 0 0 38.9 5.5
c 81 rcc 0 0 0 0 0 39 6
9 rcc 5.5 5.5 43.3 0 0 0.5 2.9
10 rcc 5.5 5.5 43.8 0 0 4.4 2.9
11 rcc 5.5 5.5 48.2 0 0 1.1 2.9
12 rcc 5.5 5.5 49.3 0 0 1.5 2.9
13 rcc 5.5 5.5 50.8 0 0 3.8 2.9
14 rcc 5.5 5.5 43.3 0 0 11.6 3.15
17 rcc 0 0 0 0 0 83.8 29.6
18 rcc 0 0 0 0 0 84 29.8
19 rcc 0 0 0 0 0 86 32.8
20 rcc 0 0 0 0 0 86 34.8
21 rcc 0 0 -5 0 0 105 35
22 rpp -50 170 -50 170 -6 250
23 rcc 0 0 -5.5 0 0 105.5 35.5
24 rpp -80 200 -80 200 -36 280

25 so 450

c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales

M1 7014 -0.77 8016 -0.23

M2 26000 -0.7 6000 -0.3

M3 26000 -0.7 28000 -0.1 24000 -0.19 6000 -0.01

c M4 1001 -0.111 8016 -0.888

M5 82207 -1

M6 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &

8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &

8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14

M7 28000 -0.018 42000 -0.005 29000 -0.015 6000 -0.005 26000 -0.957

M8 92235 -0.0726 8016 -0.0098 92238 -0.0079 8016 -0.001 13027 -0.266 &

8016 -0.4673 1001 -0.030 1001 -0.0155 8016 -0.1224

M9 92235 -0.095 8016 -0.013 92238 -0.011 8016 -0.014 13027 -0.257 &

8016 -0.458 1001 -0.029 1001 -0.015 8016 -0.1224

c Fin de los datos de materiales

c

c Criticidad

KCODE 1000 0.5 10 800

KSRC 5.5 5.5 3 5.5 5.5 14.6 &

-7.5 5.5 3 -7.5 5.5 14.6 &

-7.5 5.5 26.2 -7.5 5.5 46 &

-7.5 5.5 57 -7.5 5.5 69 &

-0.5 -7 3 -0.5 -7 14.6 &

-0.5 -7 57 -0.5 -7 69

c

c Datos generales

prdmpr 2j 1

mode n

print

imp:n 1 54r 0

Modelo VI

Message: ixr

c Datos de celdas

1 7 -5.0 -1 U=1

2 8 -2.16 -2 U=1

3 1 -0.0012 -3 U=1

4 3 -7.9 -4 U=1

5 1 -0.0012 -5 U=1

6 3 -7.9 #1 #2 #3 #4 #5 U=1

7 0 -6 FILL=1 U=2

8 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=2

9 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=2

11 1 -0.0012 #7 #8 #9 U=2

13 3 -7.9 7 U=3

131 0 -8 FILL=3

14 7 -5.0 -9 U=4
 15 9 -2.25 -10 U=4
 16 1 -0.0012 -11 U=4
 17 3 -7.9 -12 U=4
 18 1 -0.0012 -13 U=4
 19 3 -7.9 #14 #15 #16 #17 #18 U=4
 20 0 -14 FILL=4 U=5
 21 LIKE 20 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=5
 22 LIKE 20 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=5
 23 1 -0.0012 #20 #21 #22 U=5
 24 0 -15 FILL=5 U=6
 25 3 -7.9 15 U=6
 251 0 -16 FILL=6
 26 7 -5.0 -17 U=7
 27 10 -2.05 -18 U=7
 28 1 -0.0012 -19 U=7
 29 3 -7.9 -20 U=7
 30 1 -0.0012 -21 U=7
 31 3 -7.9 #26 #27 #28 #29 #30 U=7
 32 0 -22 FILL=7 U=8
 33 LIKE 32 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=8
 34 LIKE 32 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=8
 35 1 -0.0012 #32 #33 #34 U=8
 36 0 -23 FILL=8 U=9
 37 3 -7.9 23 U=9
 371 0 -24 FILL=9
 c 31 LIKE 131 BUT TRCL=(0 0 43)
 45 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 0)
 46 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 0 0)
 47 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 0)
 48 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 13 0)
 49 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 0)
 50 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 0)
 51 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 0)
 52 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 0)
 53 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 0)
 54 LIKE 131 BUT TRCL=(0 -26 0)
 55 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 -43)
 56 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 -43)
 57 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 -43)
 58 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 -43)
 59 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 13 -43)
 60 LIKE 251 BUT TRCL=(-13 0 0)
 61 LIKE 251 BUT TRCL=(-6 -13 0)
 62 LIKE 371 BUT TRCL=(7 13 -43)
 621 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 -43)
 c 51 LIKE 251 BUT TRCL=(-26 0 0)
 63 2 -7.8 25 -26
 64 1 -0.0012 26 -27

65 5 -11.35 27 -28
66 2 -7.8 28 -29
67 1 -0.0012 29 -31
68 1 -0.0012 32 -33
69 1 -0.0012 31 -30
70 6 -2.350E-3 30 -32
71 0 33
c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies
1 rcc 5.5 5.5 43.3 0 0 0.5 2.9
2 rcc 5.5 5.5 43.8 0 0 4.4 2.9
3 rcc 5.5 5.5 48.2 0 0 1.1 2.9
4 rcc 5.5 5.5 49.3 0 0 1.5 2.9
5 rcc 5.5 5.5 50.8 0 0 3.8 2.9
6 rcc 5.5 5.5 43.3 0 0 11.6 3.15
7 rcc 5.5 5.5 43.2 0 0 37.2 5.1
8 rcc 5.5 5.5 43 0 0 38.9 5.5
9 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 0.5 2.9
10 rcc 5.5 5.5 0.8 0 0 4.4 2.9
11 rcc 5.5 5.5 5.2 0 0 1.1 2.9
12 rcc 5.5 5.5 6.3 0 0 1.5 2.9
13 rcc 5.5 5.5 7.8 0 0 3.8 2.9
14 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 11.6 3.15
15 rcc 5.5 5.5 0.2 0 0 37.2 5.1
16 rcc 5.5 5.5 0 0 0 38.9 5.5
17 rcc -20.7 5.5 43.3 0 0 0.5 2.9
20 rcc -20.7 5.5 49.3 0 0 1.5 2.9
21 rcc -20.7 5.5 50.8 0 0 3.8 2.9
22 rcc -20.7 5.5 43.3 0 0 11.6 3.15
23 rcc -20.7 5.5 43.2 0 0 37.2 5.1
24 rcc -20.7 5.5 43 0 0 38.9 5.5
25 rcc 0 0 0 0 0 83.8 29.6
26 rcc 0 0 0 0 0 84 29.8
27 rcc 0 0 0 0 0 86 32.8
28 rcc 0 0 0 0 0 86 34.8
29 rcc 0 0 -5 0 0 105 35
30 rpp -50 170 -50 170 -6 250
31 rcc 0 0 -5.5 0 0 105.5 35.5
32 rpp -80 200 -80 200 -36 280
33 so 450
c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales
M1 7014 -0.77 8016 -0.23
M3 26000 -0.7 28000 -0.1 24000 -0.19 6000 -0.01
M4 1001 -0.111 8016 -0.888 \$
M5 82207 -1 \$ Plomo
M6 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &
8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &

8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14
M7 28000 -0.018 42000 -0.005 29000 -0.015 6000 -0.005 26000 -0.957
M8 92235 -0.0855 8016 -0.0116 92238 -0.8638 8016 -0.1161 13027 -0.2637 &
8016 -0.4689 1001 -0.0293 1001 -0.0154 8016 -0.1233
M9 92235 -0.1144 8016 -0.0156 92238 -0.0132 8016 -0.0018 13027 -0.2499 &
8016 -0.4443 1001 -0.0277 1001 -0.0148 8016 -0.1182
M10 92235 -0.0308 8016 -0.0042 92238 -0.0035 8016 -0.0005 13027 -0.2821 &
8016 -0.5015 1001 -0.0313 1001 -0.0162 8016 -0.1297

c Fin de los datos de materiales

c

c Criticidad

KCODE 1000 0.5 10 800

KSRC 5.5 5.5 57.5 5.5 5.5 14.6 &

-7.5 5.5 57.5 -7.5 5.5 14.6 &

-0.5 -7 57.5 -0.5 -7 14.6 &

-13 -7 57.5 -13 -7 14.6 &

13 -7 57.5 13 -7 14.6 &

-0.6 18 57.5 -0.6 18 14.6

c

c Datos generales

prdmp 2j 1

mode n

print

Cálculo de Tasa de dosis

Message: ixr

c Cálculo de Tasa de dosis para el tambor de filtros

c Datos de celdas

1 7 -5.0 -1 U=1

2 8 -2.17 -2 U=1

3 1 -0.0012 -3 U=1

5 1 -0.0012 -5 U=1

6 3 -7.9 #1 #2 #3 #4 #5 U=1

7 0 -6 FILL=1 U=2

8 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 11.6)U=2

9 LIKE 7 BUT TRCL=(0 0 23.2) U=2

11 1 -0.0012 #7 #8 #9 U=2

12 0 -7 FILL=2 U=3

13 3 -7.9 7 U=3

131 0 -8 FILL=3 U=4

14 6 -2.350E-3 #20 #21 #22 #23 #24 #25 #26 #27 #28 #29 #30 #31 &

#32 #33 #34 #35 #36 #37 #38 #39 #40 8 -9 U=4

15 2 -7.8 9 -10 U=4

16 1 -0.0012 10 -101 U=4

161 5 -11.35 101 -11 U=4
 17 2 -7.8 11 -12 U=4
 18 1 -0.0012 12 -13 U=4
 19 1 -0.0012 15 -16
 20 LIKE 131 BUT TRCL=(0 0 43)U=4
 21 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 0)U=4
 22 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 13 43)U=4
 23 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 0)U=4
 24 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 -13 43)U=4
 25 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 0)U=4
 26 LIKE 131 BUT TRCL=(7 13 43)U=4
 30 LIKE 131 BUT TRCL=(-19 -13 43)U=4
 31 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 13 0)U=4
 32 LIKE 131 BUT TRCL=(-6 13 43)U=4
 33 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 0)U=4
 34 LIKE 131 BUT TRCL=(13 0 43)U=4
 35 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 0)U=4
 36 LIKE 131 BUT TRCL=(7 -13 43)U=4
 37 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 0)U=4
 38 LIKE 131 BUT TRCL=(-13 -26 43)U=4
 39 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 0)U=4
 40 LIKE 131 BUT TRCL=(-26 0 43)U=4
 41 0 -14 FILL=4 U=5
 411 1 -1 #41 U=5
 44 0 -13 FILL=5
 45 6 -2.350E-3 13 -15
 46 0 16
 c Fin de los datos de celdas

c Datos de superficies
 1 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 0.5 2.9
 2 rcc 5.5 5.5 0.8 0 0 4.4 2.9
 3 rcc 5.5 5.5 5.2 0 0 1.1 2.9
 4 rcc 5.5 5.5 6.3 0 0 1.5 2.9
 5 rcc 5.5 5.5 7.8 0 0 3.8 2.9
 6 rcc 5.5 5.5 0.3 0 0 11.6 3.15
 7 rcc 5.5 5.5 0.2 0 0 37.2 5.1
 8 rcc 5.5 5.5 0 0 0 38.9 5.5
 9 rcc 0 0 0 0 0 83.8 29.6
 10 rcc 0 0 0 0 0 84 29.8
 101 rcc 0 0 0 0 0 86 32.8
 11 rcc 0 0 0 0 0 86 34.8
 12 rcc 0 0 -5 0 0 105 35
 13 rpp -50 170 -50 170 -6 250
 14 rcc 0 0 -5.5 0 0 105.5 35.5
 15 rpp -80 200 -80 200 -36 280
 16 so 450
 c Fin de los datos de superficies

c Datos de materiales

M1 7014 -0.77 8016 -0.23
M2 26000 -0.7 6000 -0.3
M3 26000 -0.7 28000 -0.1 24000 -0.19 6000 -0.01
c M4 1001 -0.111 8016 -0.888
M5 82207 -1
M6 20040 -0.066 8016 -0.026 14028 -0.017 8016 -0.019 13027 -0.0029 &
8016 -0.0027 26056 -0.0038 8016 -0.0017 14028 -0.19 8016 -0.22 13027 -0.025 &
8016 -0.0023 20040 -0.17 8016 -0.069 6012 -0.052 8016 -0.14
M7 28000 -0.018 42000 -0.005 29000 -0.015 6000 -0.005 26000 -0.957
M8 92235 -0.0845 8016 -0.0115 92238 -0.00934 8016 -0.001256 13027 -0.2615 &
8016 -0.4649 1001 -0.0290 1001 -0.0153 8016 -0.1224
c Fin de los datos de materiales
c
c Datos generales
c
c Datos de la Fuente
SDEF ERG=D1 POS=D2 AXS=0 0 1 RAD=D3 EXT=2.2 PAR=2
SC1 ENERGÍAS PARA LAS FUENTES TORTA
SII L 0.086545 0.105305 0.427874 0.600597 0.63595 0.463365 0.606713 &
0.133515 0.176314 0.671441
SP1 0.47597285 0.32794529 0.04184413 0.02494747 0.01585893 &
0.01483374 0.00704237 0.01579803 0.00967018 0.00253115
SC2 POSICION DE LA FUENTE
SI2 L -13.5 18.5 3 -13.5 18.5 14.5 -13.5 18.5 26 &
-13.5 18.5 46 -13.5 18.5 57.6 -13.5 18.5 69.2 &
-0.6 18.5 3 -0.6 18.5 14.5 -0.6 18.5 26
-0.6 18.5 46 -0.6 18.5 57.6 -0.6 18.5 69.2 &
13.5 18.5 3 13.5 18.5 14.5 13.5 18.5 26 &
13.5 18.5 46 13.5 18.5 57.6 13.5 18.5 69.2
-20.6 5.5 3 -20.6 5.5 14.5 -20.6 5.5 26 &
-20.6 5.5 46 -20.6 5.5 57.6 -20.6 5.5 69.2 &
-7.5 5.5 3 -7.5 5.5 14.5 -7.5 5.5 26 &
-7.5 5.5 46 -7.5 5.5 57.6 -7.5 5.5 69.2 &
5.5 5.5 3 5.5 5.5 14.5 5.5 5.5 26
5.5 5.5 46 5.5 5.5 57.6 5.5 5.5 69.2 &
18.5 5.5 3 18.5 5.5 14.5 18.5 5.5 26 &
18.5 5.5 46 18.5 5.5 57.6 18.5 5.5 69.2
-13.5 -7.6 3 -13.5 -7.6 14.5 -13.5 -7.6 26 &
-13.5 -7.6 46 -13.5 -7.6 57.6 -13.5 -7.6 69.2 &
-0.6 -7.6 3 -0.6 -7.6 14.5 -0.6 -7.6 26 &
-0.6 -7.6 46 -0.6 -7.6 57.6 -0.6 -7.6 69.2 &
13.5 -7.6 3 13.5 -7.6 14.5 13.5 -7.6 26 &
88.5 18.5 46 88.5 18.5 57.6 88.5 18.5 69.2 &
54.5 5.5 3 54.5 5.5 14.5 54.5 5.5 26 &
54.5 5.5 46 54.5 5.5 57.6 54.5 5.5 69.2 &
61.5 -7.6 3 61.5 -7.6 14.5 61.5 -7.6 26 &
61.5 -7.6 46 61.5 -7.6 57.6 61.5 -7.6 69.2 &
74.5 -7.6 3 74.5 -7.6 14.5 74.5 -7.6 26 &
74.5 -7.6 46 74.5 -7.6 57.6 74.5 -7.6 69.2 &

88.5 -7.6 3 88.5 -7.6 14.5 88.5 -7.6 26 &
88.5 -7.6 46 88.5 -7.6 57.6 88.5 -7.6 69.2 &
67.5 -20.5 3 67.5 -20.5 14.5 67.5 -20.5 26 &
67.5 -20.5 46 67.5 -20.5 57.6 67.5 -20.5 69.2 &
22.5 93.5 3 22.5 93.5 14.5 22.5 93.5 26 &
22.5 93.5 46 22.5 93.5 57.6 22.5 93.5 69.2 &
35.5 93.5 3 35.5 93.5 14.5 35.5 93.5 26 &
35.5 93.5 46 35.5 93.5 57.6 35.5 93.5 69.2 &
48.5 93.5 3 48.5 93.5 14.5 48.5 93.5 26 &
48.5 93.5 46 48.5 93.5 57.6 48.5 93.5 69.2 &
15.5 80.5 3 15.5 80.5 14.5 15.5 80.5 26 &
15.5 80.5 46 15.5 80.5 57.6 15.5 80.5 69.2 &
28.5 80.5 3 28.5 80.5 14.5 28.5 80.5 26 &
28.5 80.5 46 28.5 80.5 57.6 28.5 80.5 69.2 &
41.5 80.5 3 41.5 80.5 14.5 41.5 80.5 26 &
41.5 80.5 46 41.5 80.5 57.6 41.5 80.5 69.2 &
54.5 80.5 3 54.5 80.5 14.5 54.5 80.5 26 &
54.5 80.5 46 54.5 80.5 57.6 54.5 80.5 69.2 &
22.5 67.6 3 22.5 67.6 14.5 22.5 67.6 26 &
22.5 67.6 46 22.5 67.6 57.6 22.5 67.6 69.2 &
35.6 67.6 3 35.6 67.6 14.5 35.6 67.6 26 &
35.6 67.6 46 35.6 67.6 57.6 35.6 67.6 69.2 &
49.5 67.6 3 49.5 67.6 14.5 49.5 67.6 26 &
49.5 67.6 46 49.5 67.6 57.6 49.5 67.6 69.2 &
28.5 54.5 3 28.5 54.5 14.5 28.5 54.5 26 &
28.5 54.5 46 28.5 54.5 57.6 28.5 54.5 69.2

SP2 0.00505 197R

SC3 RADIO DE MUESTREO DE LA FUENTES

SI3 0 2.9

SP3 0 1

c Fin datos de la Fuente

c

c Datos de Tallies(mSv/h)

c f5:p 37 5 120 0.7

f5:p -1 40 120 0.7

c f5:p 5 -85 120 0.7

c f5:p -82 5 120 0.7

c f5:p -82 -82 120 0.7

FM5: 397128188.3

DE0 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 6.25

DF0 39.6E-6 58.2E-7 29E-2 5.8E-7 28.3E-7 37.9E-7 50.1E-7 63.1E-7 75.9E-7 &
87.8E-7 98.5E-7 10.8E-6 11.7E-6 12.7E-6 13.6E-6 14.4E-6 15.2E-6 16.8E-6 &
19.8E-6 25.1E-6 29.9E-6 34.2E-6 38.2E-6 40.1E-6 44.1E-6 48.3E-6 52.3E-6 &
56E-6 58E-6 60.1E-6 63.7E-6 67.4E-6

c Fin Datos de Tallies

c

c Datos generales

nps 1000000000

ctme 30

prdmj 2j 1
mode p
print
IMP:n 1 27r 1 1 35r 0