

PRIMER EJERCICIO

GRUPO B - FÍSICA Y TECNOLOGÍA NUCLEARES

TEMA 10

Blindajes contra las radiaciones. Diseño. Materiales y cálculos.

ÍNDICE

1	RESUMEN EJECUTIVO Y RELACIÓN CON OTROS TEMAS	3
2	DISEÑO DE BLINDAJES. MATERIALES.....	5
2.1	GENERAL	5
2.2	DISEÑO DE BLINDAJES PARA PARTÍCULAS CARGADAS	7
2.2.1	Partículas alfa	8
2.2.2	Partículas beta.....	8
2.3	DISEÑO DE BLINDAJES PARA NEUTRONES	9
2.4	DISEÑO DE BLINDAJES PARA LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	10
3	CÁLCULO DE BLINDAJES.....	13
3.1	TEORÍA DE TRANSPORTE DETERMINISTA.....	13
3.2	MÉTODO DE MONTE CARLO.....	14
4	APLICACIONES	16
4.1	CONTENEDORES DE COMBUSTIBLE GASTADO	16
4.2	INSTALACIONES MÉDICAS DE RAYOS X PARA DIAGNÓSTICO.....	17
4.3	INSTALACIONES MÉDICAS DE PROTONTERAPIA	17
5	BIBLIOGRAFÍA	19

1 RESUMEN EJECUTIVO Y RELACIÓN CON OTROS TEMAS

En la Ingeniería Nuclear, uno de los problemas de mayor importancia es el blindaje contra la radiación ionizante que se desglosa en la práctica en partes específicas como son el blindaje térmico, el blindaje instrumental y el blindaje biológico.

El blindaje térmico es el utilizado en reactores nucleares de potencia, para atenuar el flujo de radiación gamma, con el propósito de proteger la vasija de los efectos de un calentamiento excesivo.

El blindaje instrumental tiene por objeto alcanzar condiciones adecuadas de funcionamiento en instrumentos.

Entre todos los blindajes, destaca por su especial importancia el blindaje biológico, cuya finalidad es reducir adecuadamente la exposición sufrida por personas situadas en las proximidades de fuentes de radiación.

El problema más complejo es el cálculo de blindajes biológicos contra radiación X, gamma y neutrones, que por carecer de alcance definido solo sufre atenuación en su paso por absorbentes.

El blindaje contra partículas cargadas entraña menos problemas, ya que, al poseer un alcance definido, un absorbente de espesor ligeramente mayor, proporciona un blindaje eficaz al detener todas las partículas.

En todos los casos, el problema básico consiste en determinar el espesor y la composición de un blindaje para que la dosis equivalente recibida por las personas no sobrepase los límites reglamentarios.

Los blindajes tienen múltiples aplicaciones dentro de la industria convencional y la industria nuclear, pero también son ampliamente utilizados en tratamientos médicos y en investigación.

Este tema se relaciona con los siguientes:

PRIMER EJERCICIO

1 B-2 Esquemas de desintegración radiactiva. Interacción partículas cargadas y radiaciones con la materia. Detección de partículas y radiaciones.

1 B-3 Neutrones. Interacción de los neutrones con la materia. Secciones eficaces de las reacciones neutrónicas. Fisión nuclear. Difusión y moderación de neutrones

1 D-2 Magnitudes y unidades de protección radiológica.

1 D-3 Instrumentación y métodos analíticos utilizados en la detección y medida de la radiación ionizante. Verificación, calibración y control de calidad.

1 D-14 Criterios radiológicos utilizados en el diseño de las centrales nucleares.

TERCER EJERCICIO

3 B-2 La dosis debida a radiación externa. Métodos de estimación. Dosimetría.

3 B-18 Generación de radionucleidos en reactores nucleares de potencia. Comparación entre diferentes diseños desde el punto de vista radiológico.

3 A-33 Gestión del combustible irradiado. Métodos de almacenamiento a corto, medio y largo plazo. Estudios de seguridad asociados.

2 DISEÑO DE BLINDAJES. MATERIALES

2.1 GENERAL

Un blindaje es una entidad física interpuesta entre una fuente de radiación ionizante y un objeto a proteger de manera que se reduzca el nivel de radiación en la posición de ese objeto.

Como principio general, el diseño de blindajes debe basarse en la aplicación del criterio ALARA. El objetivo es conseguir unas dosis tan bajas como sea practicable sin superar en ningún caso los límites reglamentarios.

Las medidas generales de protección frente a las radiaciones ionizantes son:

- Distancia entre la fuente de radiación y el individuo: aumentando la distancia entre el operador y la fuente de radiaciones ionizantes, la tasa de dosis disminuye en la misma proporción en que aumenta el cuadrado de la distancia. En muchos casos, bastará con alejarse suficientemente de la fuente de radiación para que las condiciones de trabajo sean aceptables.
- Tiempo durante el cual, el individuo permanece en el campo de radiación: disminuyendo el tiempo de exposición todo lo posible, se reducirán las dosis. Es importante que las personas que vayan a realizar operaciones con fuentes de radiación tengan una gran experiencia y formación, con el fin de invertir el menor tiempo posible en las tareas a realizar.
- Barrera o blindaje interpuesto entre la fuente de radiación y el individuo: en los casos en que los dos factores anteriores no sean suficientes, será necesario interponer un espesor de material absorbente, blindaje, entre el operador y la fuente de radiación.

La protección tiene que estar presente de forma equilibrada en:

- Los equipos: desde la normativa, al diseño y posterior fabricación.
- La instalación: desde la normativa, diseño de barreras, construcción y verificación inicial.
- Operación: en cuanto a métodos de trabajo, entrenamiento, accesorios de protección, optimización permanente y verificaciones periódicas de los equipos e instalaciones.

En el diseño de blindajes en primer lugar hay que identificar el tipo de radiación involucrada, su distribución de energía y su intensidad. Existen varios **tipos de radiación**:

- Radiación primaria de la fuente (haz directo o útil)
- Radiación parásita:
 - Radiación dispersa: se origina por la interacción con el blindaje u otras partes estructuras del edificio. Se tiene que considerar blindaje para esta radiación. Los ejemplos de blindaje para la radiación dispersa son: techos, o laberintos de entrada en los accesos a las salas.
 - Radiación de fuga: es la radiación que emerge a través del blindaje de protección de una fuente de radiación, o a través de las penetraciones existentes en los blindajes, como las tuberías, los enchufes, el cableado, etc.

Se tiene que estudiar un trazado adecuado en la fase de diseño, evitando en general la línea directa entre la fuente y la salida de dichas penetraciones.

Por este motivo, se distinguen **dos tipos de barreras**:

- Barrera primaria: es el blindaje sobre el que incide el haz de radiación.
- Barrera secundaria: son el resto de elementos que absorben la radiación dispersa y de fuga.

Los datos generales necesarios para calcular un blindaje son los siguientes:

- Relativos a la fuente (estado físico, composición química, geometría, etc, radionucleidos que la componen y sus actividades específicas). Para ello, se necesitan conocer los siguientes datos:
 - Diagrama de desintegración de los radionucleidos que la componen
 - Formas de desintegración y rendimientos
 - Energías y períodos de desintegración
- Relativos al receptor de la radiación (personal, medio ambiente, aire, instrumentos, etc.). Es necesario conocer los coeficientes másicos de absorción que son función de la energía.
- Exigencias radiológicas: tasa de dosis absorbida que se desea alcanzar al exterior del blindaje de acuerdo con la normativa radiológica vigente
- Material del blindaje: se deben conocer datos relativos a los coeficientes de atenuación y factores de acumulación.

En el cálculo de blindajes intervienen una serie de factores, como son:

- Factor de carga o grado de utilización (W): fracción de tiempo que funciona el equipo o la fuente.
- Factor de utilización o factor de dirección (U): cuantifica la fracción de tiempo que el sistema opera o la fracción de tiempo que opera en cada dirección
- Factor de ocupación (T): fracción del tiempo total que permanecen los individuos en el lugar a proteger y que está siendo objeto de cálculo. Puede ser:
 - Ocupación permanente: viviendas, laboratorios, oficinas. En este caso el valor de T sería 1.
 - Ocupación parcial: pasillos, aparcamientos ($T < 1$)
 - Ocupación ocasional: salas de espera, escaleras, ascensores y zonas externas. El valor de T sería menor que 1.

En el diseño de blindajes es importante elegir adecuadamente el material utilizado para blindar, determinar el espesor necesario para obtener la atenuación deseada hasta niveles aceptables y tener en cuenta aspectos económicos. Por ello, para la elección del material o los materiales del blindaje hay que tener en cuenta los siguientes criterios:

- Consideraciones económicas: La protección proporcionada por un blindaje depende no tanto de la naturaleza del material como del espesor entre la fuente y

la persona u objeto a proteger. Si no hubiera restricciones en cuanto a volumen o peso del blindaje, la elección del material se basaría en un equilibrio entre el material y los costes de construcción, teniendo en cuenta los costes de mantenimiento y el valor residual. Por otro lado, el volumen y el peso del blindaje influyen muy a menudo en otros costes de instalación. Por lo tanto, el diseño del blindaje debe integrarse con todos los demás aspectos de diseño de la instalación.

- Fabricación, mantenimiento y seguridad ocupacional: aunque los costes de construcción o fabricación son un factor importante en la selección del material del blindaje, los costes de mantenimiento son un punto a tener en cuenta. También se tienen que contemplar los riesgos para los trabajadores durante la construcción de los mismos.
- Propiedades térmicas y mecánicas: en el caso de que un blindaje cumpla también funciones estructurales, se tienen que tener en cuenta los efectos que pudiera tener la radiación sobre las propiedades mecánicas y las consecuentes tensiones térmicas por calentamiento debidas a la absorción de la radiación.

2.2 DISEÑO DE BLINDAJES PARA PARTÍCULAS CARGADAS

Al interaccionar las partículas con la materia, producen una serie de efectos, que son función del tipo de partícula, de su energía, y del medio material con el que interaccionan.

El diseño de los blindajes tiene que tener en cuenta el tipo de partícula y cómo interacciona dicha partícula con la materia.

Los procesos que contribuyen a la pérdida de energía de una partícula cargada en su interacción con medios materiales son:

- **Dispersión:**
 - **Dispersión elástica:** En la dispersión elástica, parte de la energía cinética de la partícula incidente es cedida a la otra partícula o núcleo, pero se conserva la suma de las energías cinéticas y la cantidad de movimiento de ambos. La energía cinética intercambiada depende de las masas relativas de ambas partículas y del ángulo de colisión.
 - **Dispersión inelástica:** En la dispersión inelástica, la suma de las energías cinéticas de los productos de la interacción es menor que la suma de las energías cinéticas iniciales. La partícula incidente colisiona inelásticamente con los átomos del material, produciendo una excitación de los mismos, que emiten partículas secundarias al desexcitarse.
- **Colisión radiativa:** la partícula cargada se frena o desvía en su interacción con los átomos del medio y como resultado emite ondas electromagnéticas. Este proceso se produce con mayor probabilidad en las proximidades del núcleo atómico como consecuencia de pequeñas desviaciones de la partícula incidente.

Las partículas también pueden sufrir colisiones con los núcleos atómicos, produciendo reacciones nucleares, pero son muy improbables y no se suelen considerar en los procesos de interacción.

2.2.1 Partículas alfa

Las principales características de las partículas alfa son las siguientes:

- Interaccionan fundamentalmente con los electrones atómicos.
- Sus trayectorias son prácticamente rectilíneas.
- El proceso fundamental de pérdida de energía es la ionización, si el medio absorbente es un gas monoatómico, y en menor medida, la excitación. Si el medio absorbente son gases poliatómicos y medios condensados, predomina la disipación energética en procesos de excitación y disociación. En todos los casos, las partículas alfa van perdiendo paulatinamente velocidad, hasta que se detienen y capturan dos electrones del entorno, convirtiéndose en átomos de helio.
- Su recorrido es limitado ya que su gran poder de interacción (ionización específica muy alta) hace que pierdan rápidamente su energía al ionizar átomos del medio.
- Las partículas alfa de la misma energía tendrán el mismo rango.

El alto poder de ionización y consecuentemente el recorrido limitado que realizan en medios materiales hace que no sean consideradas en el cálculo de blindajes.

2.2.2 Partículas beta

Las partículas beta pueden ser electrones (β^-) o positrones (β^+), ambas producen las mismas interacciones. Su principal diferencia es que los positrones cuando han perdido toda su energía se combinan con un electrón y producen dos rayos gamma de aniquilación. La producción de pares de aniquilación, es una circunstancia importante a tener en cuenta en el cálculo de blindajes.

Las principales características de las partículas beta son las siguientes:

- Los mecanismos de interacción de las partículas ligeras, como son las partículas beta, son las colisiones con los electrones atómicos, con producción de excitación e ionización a bajas energías por parte de la partícula cargada ligera, y de radiación de frenado, en el caso de partículas cargadas de alta energía.
- Las partículas beta interaccionan con los electrones de la materia, pero al tener mayor penetración que las partículas alfa, son mucho más penetrantes. Tienen menor ionización específica.
- La masa de las partículas beta es mucho menor que la de las partículas alfa por lo que tienen mayor movilidad, con trayectorias muy sinuosas y con fuertes desviaciones respecto a la trayectoria media, produciendo también interacciones más complejas.

El blindaje para las partículas beta requiere frecuentemente la utilización de blindajes de materiales adecuados, interpuestos entre la fuente emisora y el punto a proteger, que están constituidos por un absorbente, cuyo espesor es ligeramente superior al alcance de las partículas más energéticas que componen el haz.

En principio, se podría utilizar cualquier material como absorbente, teniendo en cuenta la condición de que su espesor másico fuera el obtenido a través de un cálculo de alcance ya sea mediante cálculo analítico o mediante curvas de alcances en función de la energía de las partículas beta.

No obstante, la producción paralela de fotones de Bremsstrahlung, creciente con el cuadrado del número atómico del absorbente, hace totalmente desaconsejable el empleo de materiales pesados, tales como el plomo, que, si bien cumplirían el objetivo deseado de absorber las partículas beta o electrones, sería a cambio de emitir radiación de frenado, muy penetrante y causante igualmente de daños biológicos.

Por todo lo anterior, para construir blindajes para radionucleidos emisores beta, se requiere una combinación de materiales, que deberán estar formados por una primera capa (en contacto con la fuente radiactiva) de un material ligero, de número atómico bajo, tal como plástico o aluminio, seguido eventualmente (en especial con emisores beta puros), de un material de número atómico alto, como por ejemplo una fina capa de plomo, con objeto de atenuar convenientemente la radiación de Bremsstrahlung originada.

Como resumen, la **regla general para el diseño de blindajes para emisores β** , sería:

- Utilizar un espesor suficiente de material de bajo número atómico para absorber todas las partículas beta.
- Añadir un espesor suficiente de material de alto número atómico para atenuar la radiación de frenado a un valor aceptable.

2.3 DISEÑO DE BLINDAJES PARA NEUTRONES

Los neutrones son partículas sin carga eléctrica, por lo que su penetración en la materia puede ser considerable al no producir directamente ionización ni radiación de frenado como sucede con las partículas cargadas.

Los mecanismos de interacción con la materia, a diferencia de las partículas cargadas, se produce con los núcleos del medio absorbente y no con los electrones corticales. Por este motivo, el proceso que predomina en la interacción neutrónica, es la producción de reacciones nucleares de dispersión y de absorción, que dependen de la energía del neutrón.

La **dispersión elástica** se produce a cualquier energía. La pérdida de energía es mayor cuanto más ligero sea el absorbente, siendo máxima con el hidrógeno,

La **dispersión inelástica** se produce con energías entre 0.5 y 5 MeV. El neutrón es absorbido por el núcleo formando un núcleo compuesto. El núcleo emite otro neutrón de menor energía cinética y queda excitado. La diferencia de energía cinética total antes y después de la dispersión constituye la energía de excitación del núcleo blanco que se libera habitualmente en forma de radiación gamma.

En los procesos de **absorción o captura**, el neutrón es capturado por el núcleo y se produce un núcleo compuesto en estado excitado. Para desexcitarse emite radiación gamma. Este proceso se produce a cualquier energía, aunque predomina en el caso de los neutrones térmicos (1 eV -100 keV). La energía de la radiación gamma que generan al desexcitarse está entre 6 y 10 MeV. Los materiales absorbentes de neutrones son aquellos que presentan una alta sección eficaz de captura neutrónica.

Otro mecanismo de interacción a tener en cuenta en el caso del diseño de blindajes de neutrones es el fenómeno de fisión, que es el proceso mediante el cual se produce la división de un núcleo pesado en dos partes, llamados productos de fisión, cuyas masas son del mismo orden de magnitud. Puede producirse espontáneamente, pero en general

es provocada por la absorción de rayos gamma o por un neutrón incidente con una determinada energía. La fisión va acompañada de emisión de neutrones, de radiación gamma y de liberación de cantidades importantes de energía.

En el diseño de blindajes de neutrones hay que tener en cuenta 3 factores:

- La termalización de los neutrones rápidos:
 - mediante colisión con núcleos se utilizan materiales ligeros hidrogenados: agua, parafina
 - Para energías superiores a 1 Mev también es eficaz el empleo de materiales más pesados al entrar en juego la dispersión inelástica
 - la combinación de un elemento pesado o moderadamente pesado con hidrógeno es una combinación muy eficaz en la termalización de neutrones, incluso los de muy alta energía
- La absorción de neutrones térmicos:
 - Se emplean materiales con una alta sección eficaz de captura y con un espectro de baja energía de la emisión gamma que acompaña el proceso, esto último para evitar mayores problemas de blindaje.
 - Los materiales más utilizados son boro y cadmio.
- La atenuación de la radiación gamma generada en la absorción neutrónica: con plomo o similar.

El espesor del blindaje dependerá del flujo neutrónico y de la sección eficaz macroscópica.

El método general de resolver la protección frente a haces de neutrones, normalmente formados por mezclas de neutrones rápidos y térmicos, es aplicar el principio conservador de suponerlos todos rápidos y utilizar un blindaje.

El análisis del blindaje de neutrones suele ser bastante complejo e implica no solo la atenuación de neutrones primarios o fuente, sino también la producción y atenuación de partículas secundarias. Además, también puede requerir la consideración de la deposición de energía en el material de blindaje y los efectos de daño térmico y de radiación resultantes. Para obtener resultados precisos con una baja incertidumbre, es necesario utilizar técnicas numéricas sofisticadas basadas en descripciones exactas de las interacciones de fotones y neutrones en el blindaje. En el punto 3 “Cálculo de blindajes” se desarrollan estas técnicas.

2.4 DISEÑO DE BLINDAJES PARA LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética difiere notablemente de su interacción con la materia respecto a la de las partículas cargadas. Esta diferencia se debe principalmente a que la absorción de la radiación es de carácter exponencial, por lo que carece de alcance definido, a diferencia de las partículas cargadas, que pierden su energía a través de un gran número de colisiones con los electrones atómicos. En cada colisión, la energía de la partícula disminuye en una pequeña cantidad, por lo que la pérdida de energía es paulatina, hasta que resulta frenada y absorbida. En cambio, cuando un haz de radiación electromagnética incide sobre un absorbente delgado, cada fotón perdido por el haz

resulta de un proceso único (de absorción, o de dispersión), llamado **atenuación de la radiación**.

La interacción entre un fotón y un electrón supone un choque mecánico directo. Esto explica su gran poder de penetración en la materia, muy superior al de las partículas cargadas.

La carencia de un alcance definido en la interacción de la radiación electromagnética con la materia, se deriva del hecho de que un fotón al atravesar la materia, tiene una cierta probabilidad de atenuación por unidad de longitud, denominado **coeficiente de atenuación lineal**, que es independiente del camino recorrido.

Para deducir la expresión analítica de la ley de atenuación, se considera un haz de partículas que inciden perpendicularmente sobre una lámina de material de espesor dL . Se supone que todas las partículas del haz poseen el mismo momento lineal y que si una partícula interacciona, es absorbida. Por tanto, una partícula del haz solo puede atravesar la lámina o ser absorbida en ella. Siendo μ la probabilidad individual de que una partícula interacciones por unidad de espesor (cm^{-1} ó mm^{-1}), el número de partículas absorbido en el material de espesor dL es:

$$dN = -\mu N dL$$

Por tanto, se obtiene la fracción de partículas absorbidas en cada lámina de material dL :

$$\frac{dN}{dL} = -\mu N$$
$$\frac{dN}{N} = -\mu dL$$

Integrando esta ecuación para un espesor total L :

$$\int_{N_0}^{N_s} \frac{dN}{N} = - \int_0^L \mu dL$$
$$N_s = N_0 e^{-\mu L}$$

Esta expresión se conoce como la **ley de atenuación exponencial**, que depende del flujo que incide sobre el blindaje, el coeficiente de atenuación lineal y el espesor del blindaje.

Un concepto muy utilizado para definir la intensidad de atenuación de un absorbente, es su **espesor de semirreducción**, definido para una radiación determinada, como aquel espesor que reduce a la mitad el flujo de radiación incidente.

Esta ley de atenuación exponencial ocurre cuando consideramos la atenuación de fotones monoenergéticos en condiciones de **haz estrecho**, es decir, cuando sólo una fracción despreciable de los fotones dispersos puede alcanzar el detector y ser contada. Estas situaciones solo se producen con fines experimentales.

En la práctica, pueden tener lugar varios procesos a la hora de absorber una partícula del haz incidente. En la situación real o de **haz ancho**, el material de blindaje es atravesado por haces anchos paralelos o divergentes produciéndose radiación dispersa, parte de la cual vuelve al haz emergente. Debido a ello, la atenuación no sigue una ley exponencial.

En la geometría de haz ancho, el detector recibirá tanto la radiación primaria como la dispersada o secundaria, por tanto, la señal leída en el detector será mayor que aquella esperada en la geometría de haz estrecho. Para tener esto en cuenta se introduce el **factor**

de acumulación (build-up) que dependerá de la energía de los fotones incidentes, de la geometría del haz incidente, del material del absorbente y de su espesor. Su cálculo es muy complejo, pero existen tabulaciones muy completas que cubren todos los casos más habituales.

El **mecanismo de atenuación de la radiación** en la materia es complejo ya que es una combinación de tres procesos, cada uno predominante en un determinado intervalo de energías del fotón incidente:

- **Efecto fotoeléctrico:** es un fenómeno físico por el que una radiación electromagnética incidente interacciona con la materia transfiriendo parte de su energía a un electrón, el electrón es arrancado del átomo con una determinada energía cinética. Se produce con fotones de baja energía y materiales blanco con alto número atómico.
- **Efecto Compton:** es el efecto de la interacción de la radiación electromagnética con la materia, que se produce cuando un fotón interacciona con un electrón libre o débilmente ligado, transfiriéndole parte de su energía y resultando a su vez dispersado con menor energía y con menor frecuencia. Se produce con fotones de energía moderada y materiales blanco con bajo número atómico
- **Efecto de Producción de pares:** conversión de un fotón gamma de elevada energía en un par de partículas electrón-positrón, que emergen en direcciones opuestas con una energía igual a la del fotón original menos la energía equivalente a la masa de ambas partículas. Se produce con fotones de energía alta y materiales blanco con alto número atómico.

3 CÁLCULO DE BLINDAJES

Existen situaciones de blindaje en las que la dispersión de partículas o la producción de radiación secundaria hace necesario describir el campo de radiación con suficiente precisión. Por ello, los métodos aproximados de cálculo no son suficientes y se tiene que recurrir a métodos más complejos.

La descripción exacta de las partículas de radiación que tiene en cuenta todas las posibles interacciones entre partículas y medio y los efectos de la composición y geometría del medio es el ámbito de la teoría del transporte.

Hay dos enfoques básicos que se utilizan para cálculos de transporte rigurosos. El primero es a través de la **teoría de transporte determinista** que consiste en utilizar una ecuación que describa rigurosamente el campo de radiación y cuya solución proporcione la fluencia o densidad de flujo esperada de las partículas de radiación en todo el medio de protección. El segundo consiste en realizar una simulación mediante **técnicas de Monte Carlo** de cómo migran las partículas de radiación a través de un medio.

3.1 TEORÍA DE TRANSPORTE DETERMINISTA

La teoría del transporte proporciona la descripción exacta de las partículas de radiación que tiene en cuenta todas las posibles interacciones entre partículas y medio y los efectos de la composición y geometría del medio.

Para cuantificar la cantidad de partículas resultantes tras las interacciones con la materia, se aplica un balance de las colisiones que producen su desaparición y de las colisiones de otras partículas que la producen. La **ecuación del transporte de Boltzman** es una ecuación integro-diferencial, que se expresa de la siguiente forma:

$$\Omega \cdot \nabla \phi(X, E, \Omega, t) + \Sigma_t(X, E, \Omega, t) \phi(X, E, \Omega, t) = S(X, E, \Omega, t) + \int_{E'} \int_{\Omega'} \Sigma_s(X, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega, t) \phi(X, E', \Omega', t) d\Omega' dE'$$

Esta ecuación sirve como una descripción precisa del campo de radiación en todas las situaciones de blindaje de fotones o neutrones. Sin embargo, en esta ecuación se han hecho varias suposiciones:

- Se supone que las partículas de radiación son partículas puntuales que fluyen en línea recta entre colisiones que ocurren en distintos puntos del sistema, es decir, se supone que la longitud de onda asociada de la partícula y la distancia de interacción entre la partícula y los átomos del medio son muy pequeñas en comparación con la longitud media del camino libre de la partícula y el tamaño del sistema.
- Se ignora toda la estructura interna, como el espín o la polarización de las partículas en difusión.
- La ecuación es lineal porque se desprecian todas las interacciones fotón-fotón o neutrón-neutrón.

Para todas las aplicaciones de blindaje, estas suposiciones son bastante válidas y la ecuación de transporte o una variante de la misma, es la base de muchos de los códigos de cálculo de blindaje que se utilizan habitualmente en la actualidad.

Las soluciones analíticas exactas de la ecuación de transporte sólo se conocen para los cálculos más simples, ninguno es directamente aplicable a problemas reales de blindaje.

Por ello, se han hecho muchos esfuerzos en el desarrollo de aproximaciones a la ecuación de transporte que luego puedan resolverse mediante métodos numéricos o incluso para los cálculos más simples, por métodos analíticos.

La ecuación de transporte de Boltzman se puede resolver a través de métodos deterministas en los que se realiza una aproximación del problema para obtener un sistema de ecuaciones lineales y a continuación, resolver este sistema.

En primer lugar, se discretiza la ecuación del transporte en sus 6 variables: espaciales (x , y , z), direccionales (θ , ϕ) y energética (energía o velocidad). El resultado es una solución exacta, pero de una aproximación del problema.

3.2 MÉTODO DE MONTE CARLO

El método de Monte Carlo es un método estocástico que consiste en realizar un muestreo del transporte de la partícula desde su nacimiento (en la fuente) hasta su desaparición (absorción o fuga de la geometría).

En los cálculos de Monte Carlo, las trayectorias o historias de las partículas se generan simulando la naturaleza aleatoria de las interacciones de las partículas con el medio. No se necesita invocar a la ecuación de transporte para las operaciones más elementales; lo que se necesitan son expresiones matemáticas completas de las relaciones de probabilidad que gobiernan la longitud de la trayectoria de una partícula individual entre puntos de interacción, la elección de un tipo de interacción en cada uno de esos puntos, la elección de una nueva energía y nuevas direcciones si la interacción es de tipo dispersión y la posible producción de partículas adicionales. Todas estas son variables estocásticas; y para hacer selecciones de valores específicos para estas variables, se necesita una comprensión completa de los diversos procesos que experimenta una partícula durante su vida desde el momento en que la fuente la genera hasta que es absorbida o abandona el sistema bajo consideración.

El proceso de decidir sobre un valor específico de alguna variable estocástica generalmente se basa en la selección de un número al azar de un conjunto de números enteros distribuidos uniformemente. Una forma sencilla de hacer esto podría ser utilizar una rueda de ruleta imparcial que se puede utilizar para elegir al azar cualquier número del 1 al N .

Para obtener una baja incertidumbre estadística, se han de simular un gran número de partículas individuales, que a menudo requiere grandes tiempos de cálculo. Este método es viable principalmente a través de códigos de cálculo.

Para definir la eficiencia de un cálculo de Monte Carlo, se deben tener en cuenta tanto la rapidez del cálculo como la varianza. La velocidad de cálculo está controlada en gran medida por hardware, además de la habilidad del programador y el sistema operativo del ordenador. Lo interesante es la varianza de los resultados de un cálculo y las formas de minimizarla.

Uno de los **métodos de reducción de varianza** es el llamado Monte Carlo no análogo (sesgado). El objetivo de este método es obtener la misma varianza con menos muestras o reducir la varianza con las mismas muestras. Para ello, en primer lugar, se muestrean eventos que tengan interés para el conteo, esto implica modificar las funciones de densidad/distribución. A continuación, se compensa introduciendo el concepto de peso de

la partícula, que se ajusta para compensar la modificación de las funciones de densidad/distribución. El peso de la partícula se puede considerar como el número de partículas transportadas en ese muestreo (en el método de Monte Carlo análogo se transportaría una partícula por muestreo). El resultado final es el conteo de los pesos de las partículas.

4 APLICACIONES

Con el diseño de los blindajes es posible realizar prácticas que involucren el manejo de grandes cantidades de material radiactivo de forma segura para las personas, como pueden ser:

- Tareas de operación y mantenimiento de equipos en centrales nucleares en operación y desmantelamiento.
- Complejos contenedores para almacenar y transportar elementos combustibles gastados,
- Blindajes fijos de un acelerador con fines terapéuticos.
- Blindajes en instalaciones de radiodiagnóstico.
- Blindajes en instalaciones de medicina nuclear.
- Blindajes en instalaciones de protonterapia.
- Blindajes en irradiadores gamma de investigación.
- Blindajes para instrumentación como pueden ser medidores de nivel con radiación gamma o medidas de humedad con neutrones.

En los siguientes subapartados se desarrollan alguna de las aplicaciones más importantes.

4.1 CONTENEDORES DE COMBUSTIBLE GASTADO

Los contenedores de combustible gastado almacenan el combustible nuclear una vez que ha sido extraído del reactor para su almacenamiento temporal o definitivo.

El combustible durante su irradiación en el reactor acumula radioisótopos, como los propios actínidos, los productos de fisión resultantes y productos de activación.

Por ello, es necesario que el diseño de los contenedores incorpore los blindajes apropiados para atenuar la radiación de forma que no supongan un riesgo inaceptable para los trabajadores y el público.

Generalmente las emisiones alfa y beta quedan retenidas dentro de la matriz del combustible gastado. Sin embargo, la emisión neutrónica y la gamma, con un alto poder de penetración en la materia, requieren del uso de blindajes específicos.

Los contenedores de combustible gastado pueden ser de varios tipos, de almacenamiento, de transporte o de doble propósito (almacenamiento y transporte). El blindaje empleado en los diseños de contenedor se configura de forma diferente atendiendo a las necesidades de cada aplicación.

Los contenedores de almacenamiento constan habitualmente de una cápsula cilíndrica formada por varias capas, de acero inoxidable, acero al carbono y blindaje neutrónico, que aseguran el confinamiento del material y que contienen en el interior un bastidor con absorbente neutrónico en el que se aloja el combustible.

Para su transporte, el contenedor de almacenamiento se introduce en otra cápsula específica, o bien, en el caso de los contenedores de doble propósito se le añade una tapa de cierre, limitadores de impacto y muñones.

El diseño de los blindajes en contenedores de almacenamiento o transporte de combustible nuclear gastado tiene como objetivos los siguientes:

- Cumplimiento con los límites de tasa de dosis establecidos en la normativa (IS-29 para almacenamiento, ADR para transporte)
- Lograr que la dosis a los trabajadores que realizan actividades con dichos contenedores sea inferior a los límites de dosis y tan baja como sea razonablemente alcanzable (ALARA)

La evaluación del blindaje en contenedores de almacenamiento o transporte de combustible nuclear gastado se realiza con códigos de cálculo de transporte de Montecarlo, siendo los más utilizados MCNP y SCALE.

4.2 INSTALACIONES MÉDICAS DE RAYOS X PARA DIAGNÓSTICO

En Radiodiagnóstico es habitual utilizar planchas de plomo con un espesor aproximado de 2 mm. En muchos casos, las propias paredes de la instalación pueden ofrecer un blindaje significativo o incluso sustituir la función del plomo, como son los muros de hormigón o de ladrillo macizo.

En el caso de las instalaciones de radiodiagnóstico, se utilizan tres procedimientos para determinar el espesor de la barrera:

- Estimar el campo de radiación que existiría en la zona a proteger si no hubiera blindaje, fijar como hipótesis un tope para el valor de dosis y deducir el espesor necesario para atenuar el valor de campo hasta dicho tope.
- Utilizar directamente tablas que contienen los resultados de aplicar el método anterior para un elevado número de hipótesis de partida.
- Por último, se pueden utilizar, por razones prácticas, espesores normalizados a uno o dos valores para todas las barreras. Esto es aceptable en la mayoría de los casos, en los que las condiciones de trabajo están dentro de los márgenes habituales.

4.3 INSTALACIONES MÉDICAS DE PROTONTERAPIA

La terapia con protones o protonterapia es la modalidad de radioterapia externa de mayor precisión, que aporta mejor distribución de la dosis y, por tanto, menor irradiación de los tejidos sanos y menor riesgo de efectos radioinducidos innecesarios (segundos tumores).

Los riesgos para el personal de la instalación y el público como consecuencia de la operación de las instalaciones derivan directamente de la interacción de los haces de protones con los materiales de los equipos y blindajes, y tienen una fuerte dependencia de la energía del haz de protones.

Para la estimación de los blindajes se deben determinar dos elementos fundamentales, que serán las hipótesis empleadas en los cálculos posteriores: la naturaleza de la radiación emitida en los puntos de “pérdida de haz”, y la carga de trabajo.

La caracterización de la radiación emitida en los puntos de “pérdida de haz” es una tarea compleja que debe considerar las distintas energías, los materiales de interacción y las corrientes de protones empleadas. Esta información es calculada por los fabricantes empleando códigos de simulación de Monte Carlo.

La carga de trabajo, en cambio, la determina el hospital. Es una función del tipo de tratamientos que se van a realizar, de su frecuencia y de los requisitos de energía y dosis que tienen estos tratamientos.

Estos dos elementos son la base del cálculo de blindajes final, que puede realizarse bien mediante simulación numérica con el método de Monte Carlo, bien mediante aproximaciones analíticas, o también mediante una combinación de ambos.

Los blindajes finales en estas instalaciones oscilan entre espesores de 1,2 a 2 metros aproximadamente.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Radiation Shielding" J. Kenneth Shultis, Richard E. Faw, Prentice Hall PTR (2000).
- [2] "Principles of Radiation Shielding" Arthur B. Chilton, J. Kenneth Shultis, Richard E. Faw, Prentice Hall (1984).
- [3] "Procesos de interacción de partículas cargadas con la materia" Curso Técnico Experto en Protección Radiológica. CIEMAT (2023).
- [4] "La radiación electromagnética. Interacción de la radiación electromagnética con la materia" Curso Técnico Experto en Protección Radiológica. CIEMAT (2023).
- [5] "Interacción al diseño de blindajes biológicos" Curso Técnico Experto en Protección Radiológica. CIEMAT (2023).
- [6] GS 5.11 "Aspectos técnicos de seguridad y protección radiológica de instalaciones médicas de rayos X para diagnóstico". CSN (1990).
- [7] Revista alfa nº40/2019. CSN.
- [8] Revista alfa nº52/2022. CSN.