

Medición de la relación de la actividad de ^{24}Na y la dosis de neutrones recibida

¹Gossio S, ¹Carrelli J, ¹Villella, A, ¹Soppe, E

¹Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), Argentina
Av. Del Libertador 8250 (C14298BNP)
sgossio@arn.gob.ar

ABSTRACT

En casos de accidentes de criticidad se requiere de un rápido sistema dosimétrico que permita evaluar las dosis del personal involucrado.

La reacción (n, γ) con el sodio presente en el cuerpo (^{23}Na) genera ^{24}Na , que emite dos gammas de 1369 KeV y 2754 KeV que se pueden medir fuera del cuerpo con un contador de todo el cuerpo.

La experiencia se llevo a cabo mediante la irradiación con una fuente de ^{252}Cf de un fantoma con una solución de NaCl en agua. Luego de la irradiación se midió la actividad de ^{24}Na en el contador de todo el cuerpo, que cuenta con un detector de HPGe previamente calibrado en energía y eficiencia.

Considerando las correcciones por decaimiento, cantidad de ^{23}Na presente en el cuerpo de una persona adulta y curva de eliminación del ^{24}Na , se estableció un coeficiente de dosis neutrónica por unidad de actividad de ^{24}Na medida en el contador de todo el cuerpo.

Este método es útil para una estimación retrospectiva de la dosis, como así también para realizar un “triage” radiológico en caso de criticidad.

1. INTRODUCCION

Un accidente de criticidad puede definirse como la liberación de energía, parte de la misma en forma de radiación gamma y neutrónica, producida por una reacción en cadena divergente autosostenida no controlada.

Las mediciones de espectros neutrónicos a partir de dispositivos de criticidad rápidos, muestran grandes variaciones, dependiendo de la composición del material a través del cual los neutrones deben pasar antes de escapar.

Como no existe un detector que dé una respuesta proporcional a la dosis en tejido sobre todo el rango de energía de interés es necesario hacer algunas suposiciones acerca del espectro para convertir las lecturas del detector a dosis.

En un accidente de criticidad pueden ser muy complejas la geometría y composición de la instalación y su entorno. Sin embargo, hay dos aproximaciones que hacen más plausible que el espectro calculado para sistemas simples pueda dar aproximaciones razonables con respecto al encontrado en un accidente real. En primer lugar, las personas que reciben dosis muy altas es probable que estén cerca del sistema crítico y reciban una fracción relativamente pequeña de dosis provenientes de los neutrones reflejados en los objetos que los rodean. Luego el espectro de pérdida del núcleo ya filtrado por reflector y materiales estructurales del núcleo puede ser a menudo una aproximación adecuada del espectro real en la posición del individuo expuesto.

En segundo lugar, la comparación entre el espectro calculado y medido así como la comparación del espectro calculado en distintas geometrías, muestra que la geometría es mucho menos importante para determinar la forma del espectro de pérdida que la composición y espesor del material a través del cual atraviesan los neutrones. [1]

La distribución de la fluencia de energía de los neutrones “prompt” (iniciales) ha sido descrita mediante varias funciones analíticas. Como el espectro real de un dispositivo crítico siempre difiere de un espectro de fisión sin colisionar, las pequeñas diferencias no son importantes. La expresión para la fluencia de neutrones sin colisionar más fácil para usar en cálculos analíticos o numéricos es una función del tipo Maxwelliana dependiente de la energía. [1]

Luego de una irradiación con neutrones, el ^{23}Na presente en el cuerpo se activa mediante la reacción nuclear de activación neutrónica $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$. El ^{24}Na es radiactivo, en su decaimiento emite dos gammas de 1369 KeV y 2754 KeV, que se pueden medir en el contador de todo el cuerpo (CTC). En la tabla 1 se presentan las características físicas del ^{24}Na .

Tabla 1: Características físicas del ^{24}Na .

Nucleído	Vida Media	Reacción	Energía (KeV)	Emisividad (%)
^{24}Na	14.96 hs	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	1369	100
			2754	100

2. MATERIALES Y METODO

Con el objetivo de determinar la relación entre la actividad de ^{24}Na presente en el cuerpo humano y la dosis equivalente ambiental ($H^*(10)$) de neutrones recibida, se irradió con una fuente de ^{252}Cf , un fantoma que simula el torso de una persona estándar relleno con una solución de NaCl en agua destilada.

Para este experimento se utilizó un fantoma con forma de paralelepípedo de 29x24x42 cm, relleno con aproximadamente 22 litros de agua destilada a la cual se le agregó 2800 g de NaCl, lo que corresponde a 2.88×10^{25} átomos de ^{23}Na . En la figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** se observa el fantoma utilizado en la experiencia



Figura 1: Fantoma de torso utilizado en el experimento

Con el objetivo de determinar la actividad de ^{24}Na activada luego de la irradiación se utilizó un contador de todo el cuerpo que cuenta con un HPGe con una eficiencia relativa del 100%. Por lo tanto, antes de la irradiación se calibró el CTC en energía y eficiencia y se determinó el límite de detección.

El cálculo teórico de activación de ^{24}Na en función del tiempo se realizó mediante la siguiente ecuación [2].

(1)

Donde: A: Actividad ^{24}Na ; Φ : Fluencia de neutrones; $\langle\sigma\rangle$: Sección eficaz media de captura neutrónica del ^{23}Na ; λ : Constante de semidesintegración del ^{24}Na ; $N_{\text{átomos}}$: Número de átomos de ^{23}Na ; $t_{\text{irradiación}}$: Tiempo de irradiación.

La fluencia total conocida por una calibración realizada el día 11/09/06 se corrigió por decaimiento del ^{252}Cf considerando un semiperiodo de desintegración de 2.46 años. En la tabla 2 se observan la fluencia térmica, epitérmica y rápida al momento de irradiación.

Tabla 2: Fluencia de neutrones de la fuente de ^{252}Cf al momento de la irradiación.

Espectro	Fluencia ($\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Térmico (0-0.5 eV)	1.99
Epitérmico (0.5 eV-100 KeV)	46.08
Rápido (>100 KeV)	5.13×10^{-4}

La sección eficaz media de captura del ^{23}Na se calculó mediante la siguiente expresión [3,4]

(2)

El espectro de fisión de ^{252}Cf correspondiente a un espectro de Maxwell con una energía promedio de $E_n=1.42$ MeV. [1]

(3)

Donde: E es la energía del neutrón, E_n energía promedio del espectro, Φ_f es la fluencia total.

La sección eficaz de captura neutrónica del ^{23}Na en función de la energía se obtuvo de la página de Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI, sigla en inglés). En la figura 2 se observa la sección eficaz de captura neutrónica del ^{23}Na .

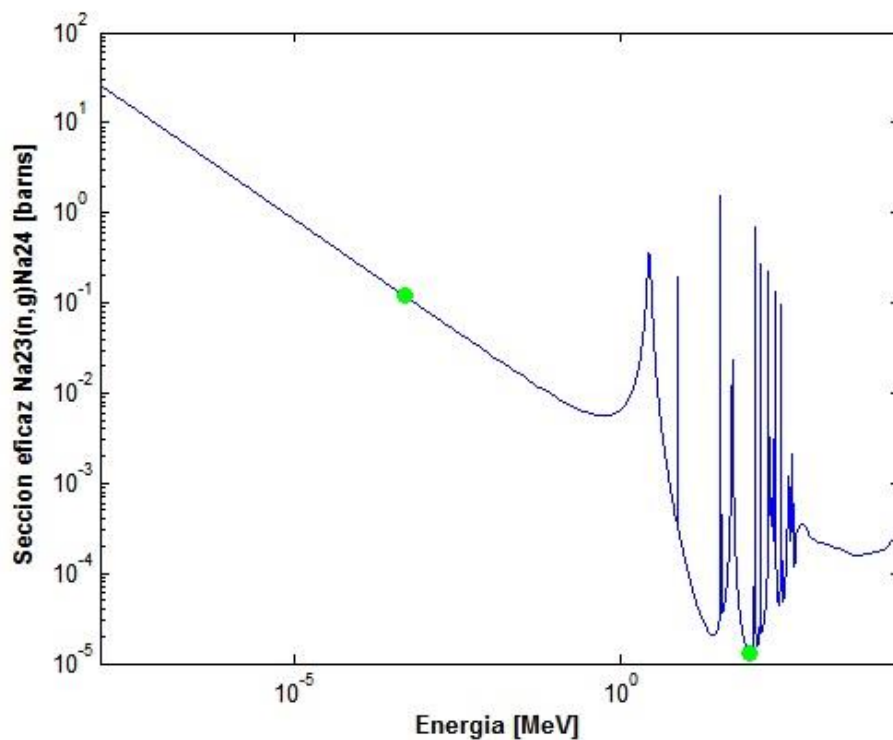


Figura 2: Sección eficaz de captura neutrónica del ^{23}Na

Para resolver la ecuación 2 se generó una función en MATLAB que permite integrar la sección eficaz obtenida del KAERI [5] y el espectro de fisión Maxwelliano de ^{252}Cf , utilizando el método de Simpson.

El criterio seguido para la determinación del tiempo de irradiación fue que la actividad calculada superase al momento de la medición holgadamente el límite de detección de actividad del ^{24}Na . Utilizando la ecuación de actividad en función del tiempo y suponiendo un tiempo de traslado luego del fin de la irradiación de 0.5 hs., se encontró que el tiempo óptimo de irradiación es de 2 días. La actividad estimada de ^{24}Na en el tiempo de irradiación determinado fue de 30.82 Bq.

La geometría de irradiación utilizada fue la siguiente: el centro de la cara frontal del fantoma se colocó a dos metros de altura del piso y a 70 cm respecto del centro de la fuente de ^{252}Cf . El fantoma se apoyó sobre la mesa móvil que rueda sobre los rieles de la tarima que permite el posicionamiento en distancia. En el esquema de la figura 3 se muestra el fantoma fuente y las distancias relativas.

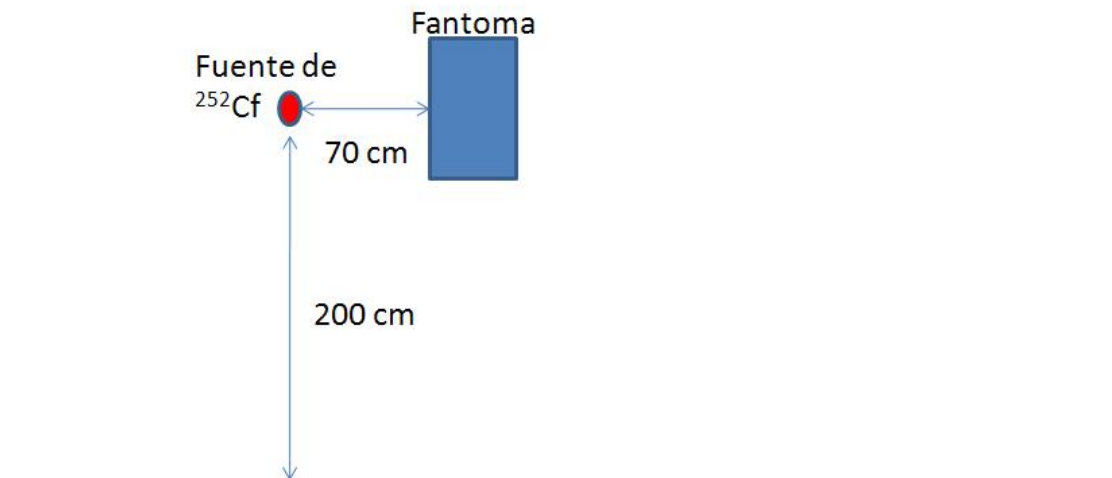


Figura 3: Esquema de la geometría de irradiación.

En la figura 4 se muestra una foto del montaje experimental.



Figura 4: Fantoma colocado sobre la plataforma a 70 cm de la fuente.

Una vez medida la actividad de ^{24}Na luego de la irradiación, esta se compara con la estimación en forma teórica y de esta manera se puede establecer un factor de build-up (B).

(4)

En caso de ocurrido el accidente, teniendo este factor de build-up, el peso de la persona y el tiempo desde finalizada la irradiación debida al accidente se podrá obtener la dosis equivalente ambiental a 10 mm en profundidad ($H^*(10)$).

Para obtener la dosis ambiental se aplica la siguiente formula:

(5)

Donde: V_{neta} : Tasa de conteo neta de ^{24}Na . B: Factor de Build-up; $h^*(10)$: Coeficiente de dosis equivalente ambiental, 411 pSv cm²; $ef_{24}\text{Na}$: Eficiencia de detección del sistema del ^{24}Na ; N átomos ^{23}Na ; Átomos de sodio presentes en la persona irradiada sabiendo que la relación entre ^{23}Na y el masa de la persona es la siguiente 1.4 g $^{23}\text{Na}/\text{Kg}$ de masa; K_1 : Factor de corrección por la eliminación biológica del ^{24}Na ; K_2 : Factor de corrección por decaimiento durante la medición; $\langle\sigma\rangle$: Sección eficaz media de captura neutrónica del ^{23}Na ; λ : Constante de semidesintegración del ^{24}Na ; t: Tiempo de irradiación.

3. RESULTADOS

Se irradió el fantoma durante un tiempo de 1.92 días. El tiempo de traslado desde el bunker de irradiación hasta el CTC fue de 7 min. El fantoma se midió durante 9356 segundos de tiempo vivo.

El espectro obtenido se presenta en la figura 5.

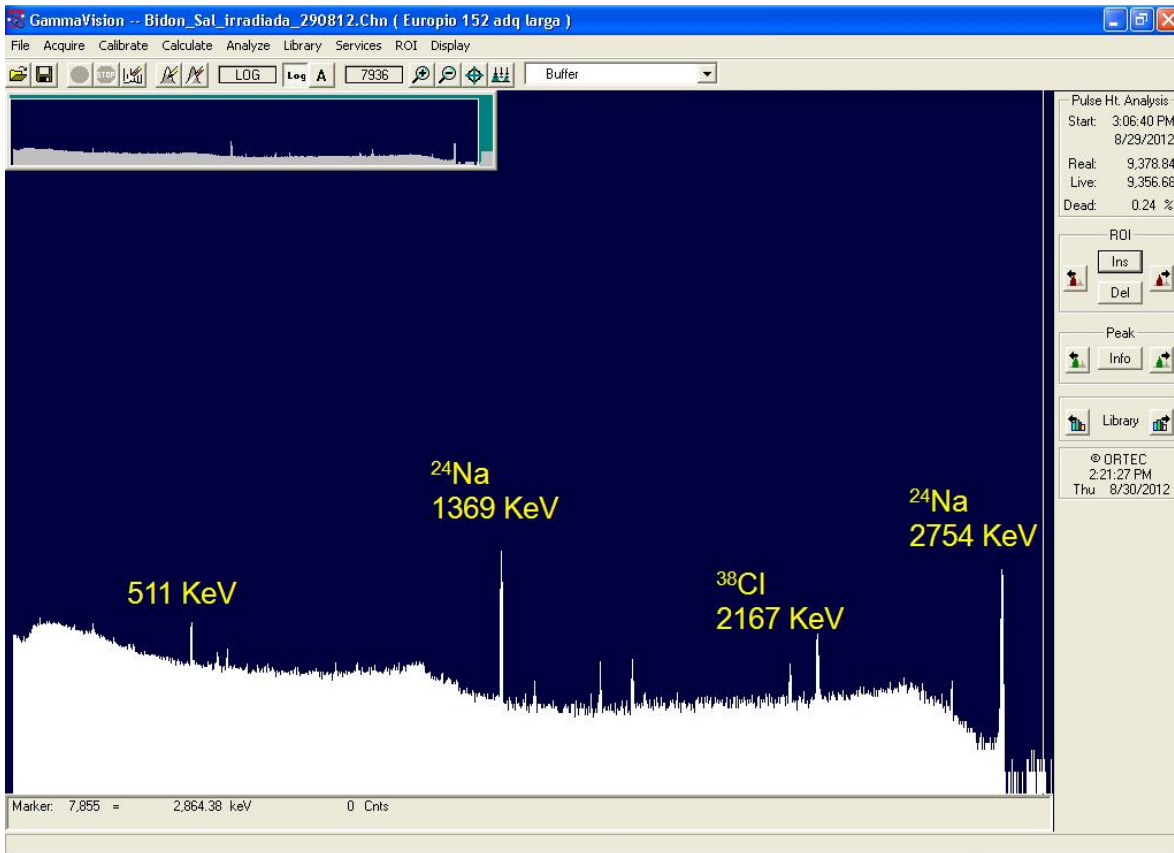


Figura 5: Espectro de emisión del fantoma luego de la irradiación. Se observan los dos picos del ^{24}Na y el pico del ^{38}Cl .

En el espectro se observan los dos picos del ^{24}Na y el pico de ^{38}Cl (1643 KeV) que se genera mediante la reacción $^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$.

La tasa de cuentas netas del pico ^{24}Na correspondiente a la energía de 1639 KeV es de 1.91 cuentas por segundo lo que corresponde a una actividad de ^{24}Na es de 3.97×10^3 Bq

Por lo tanto el factor de build-up es de 0.0078.

4. DISCUSIÓN

Se observó que la actividad medida era dos órdenes de magnitud superior a la estimada en forma teórica, este puede ser debido a que el espectro interno es distinto al externo, puesto que los neutrones interactúan fuertemente con el Hidrogeno del agua. De esta manera se termaliza y la sección eficaz, a menores energía de los neutrones, es mayor: Por otra parte, debido a la dispersión que se produce dentro del fantoma aumenta la fluencia.

5. CONCLUSIONES

Se pudo calcular el factor y medir el factor de build-up satisfactoriamente.

Mediante este trabajo se pudo establecer una relación entre la actividad medida y la dosis equivalente ambiental $H^*(10)$.

Esta magnitud es de interés en el caso de ocurrido un accidente de criticidad.

Este método es rápido y puede ser utilizado en un “triage” radiológico, para determinar las personas que tuvieron una irradiación por neutrones.

En el caso de una irradiación neutrónica debida una fuente de fisión es información que colabora para evaluar la exposición.

REFERENCIAS

[1] Dosimetry for Critically Accidents A Manual. Technical Reports Series N 211. IAEA.

[2] Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, Frank Herber Attix, Ed. Willey-VCH (2007)

[3] The ARN Critical Dosimetry System, B. Gregory, S. Papadopoulos, J. Cruzate, H. Equillor, J. Kunst.

[4] Dose Evaluation Based on ^{24}Na Activity in the Human Body at the JCO Critical Accident in Tokai-mura, Takumaro Momose, Norio Tsujimura, Takashi Tasaki, Kunihiko Shinohara, Environment and Safe Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute.

[5] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) <http://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/endlplot.pl> visitado el 09/2012.