

PRUEBA Y VALIDACIÓN DEL CÓDIGO ITERATIVO PARA LA ESPECTROMETRÍA Y DOSIMETRÍA DE NEUTRONES: NSDUAZ

Alfredo Reyes-Haro¹, José Manuel Ortíz-Rodríguez¹, Arturo Reyes-Alfaro¹, Rodrigo Castañeda-Miranda¹, Luis Octavio Solís-Sánchez¹, Héctor Rene Vega-Carrillo^{1,2}

¹ Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas
Av. López Velarde #801, Col. Centro
98000 Zacatecas, Zacatecas México

² Universidad Autónoma de Zacatecas Unidad Académica de Ciencias Nucleares
C. Cipres 10, Fracc. La Peñuela
98068 Zacatecas, Zacatecas Mexico

alfredo_reyesh@hotmail.com, morvymm@yahoo.com.mx, art8291@hotmail.com,
rcastm@gmail.com, l_solis@ymail.com, fermineutron@yahoo.com.

Resumen

En este trabajo se realiza la prueba y validación de un código iterativo para espectrometría neutrónica conocido como Neutron Spectrometry and Dosimetry de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Este código fue diseñado en una interface de usuario gráfica, amigable e intuitiva en el ambiente de programación de LabVIEW empleando el algoritmo iterativo conocido como SPUNIT. Las características principales del programa son: la selección automática del espectro inicial a partir del catálogo de espectros de neutrones compilado por la International Atomic Energy Agency, la posibilidad de generar un reporte en formato HTML que muestra en forma gráfica y numérica la fluencia de neutrones y con base a ésta calcula la dosis equivalente ambiental. Para probar el código diseñado, se utilizaron las tasas de conteo de un sistema espectrometrico de Esferas Bonner con un detector de ⁶Li(Eu) con 7 esferas de polietileno con diámetro de 0", 2", 3", 5", 8", 10" y 12". Se usaron las tasas de conteo medidas con dos fuentes de neutrones: ²⁵²Cf y ²³⁹PuBe. Para validar el código, los resultados obtenidos se compararon frente a los obtenidos empleando el código BUNKIUT. Encontramos que los espectros reconstruidos presentan un error que está dentro del límite reportado en la literatura que oscila alrededor del 15%. Con lo anterior se concluye que el código diseñado presenta resultados semejantes a las técnicas empleadas en la actualidad.

Palabras Clave: Espectrometría y Dosimetría de Neutrones; Esferas Bonner; Códigos de Reconstrucción; Métodos iterativos; Protección Radiológica.

1.- INTRODUCCION

Los neutrones se encuentran presentes en la radiación cósmica, en el interior de instalaciones nucleares experimentales o de potencia, en las unidades de tratamiento del combustible nuclear y en la proximidad de los aceleradores de partículas [Miller 1993].

Los neutrones al ser partículas sin carga son difíciles de detectar lo que genera un problema para la protección radiológica [Thomas 2004].

Debido a la ausencia de carga de los neutrones, estos tienen un poder de penetración mayor que las partículas cargadas y radiación electromagnética. Este peculiar comportamiento hace que la detección de los neutrones sea un problema mucho más complejo que la detección de las partículas α , β y γ (partículas con carga y fotones), ya que los neutrones no transportan ninguna carga eléctrica y no causan ionización directa [Martínez Blanco. 2009].

La espectrometría de la radiación permite medir la intensidad de los campos de radiación con respecto a la energía. A la distribución de la intensidad y la energía se le conoce como espectro, por lo tanto, el espectro de neutrones es la intensidad de la energía despedida por la fuente de neutrones; esta información nos permite calcular una dosis de radiación. De aquí surge la tarea de encontrar un método para la detección del espectro de neutrones que sea simple [Miller 1993].

Desde el descubrimiento del neutrón se han desarrollado diversos métodos para la espectrometría neutrónica [Brooks 2002; Klein 2002]. En 1960 se reportó un sistema que permite medir el espectro de neutrones a este sistema compuesto por un conjunto de esferas de polietileno y un detector de neutrones se le llamo sistema espectrométrico de esperas Bonner (SEEB) [Johnson and Gorbics 1981].

El SEEB está compuesto de siete esferas de polietileno cuyos diámetros, expresados en pulgadas son: 0", 2", 3", 5", 8", 10" y 12" [Johnson and Gorbics 1981]. El espectro de

neutrones se puede resolver a través de la ecuación integral de Fredholm de primer tipo, mostrada en la ecuación 1 [Vega-Carrillo and Iñiguez 2002].

$$C(D) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R_{\Phi}(D, E) \Phi_E(E) dE \quad (1)$$

En donde $C(D)$ son los rangos de los detectores, $R_{\Phi}(D, E)$ es la matriz de respuesta, que se calcula y se verifica experimentalmente [Alevra *et al.*, 1992], y $\Phi_E(E)$ es el espectro de los neutrones [Vega-Carrillo and Iñiguez 2002].

La cantidad de detectores y de grupos de energía es finita, y la versión discreta de la ecuación 1, se muestra en la ecuación 2, en donde se puede observar que se trata de un sistema de ecuaciones con pocas ecuaciones tomadas a partir de la lectura de las tasas de conteo con las esferas Bonner, C_i , y un número grande de incógnitas, que en el presente caso se refiere al espectro de neutrones que se desea reconstruir, Φ , el cual es expresado en 31 grupos de energía, $R_{i,j}$ representa la matriz de respuesta del sistema.

$$C_i = \sum_{j=1}^m R_{i,j} \Phi_j \quad (2)$$

El encontrar la solución óptima del sistema se conoce como la “reconstrucción del espectro de neutrones” [Vega-Carrillo and Iñiguez 2002].

Para resolver la ecuación 2 se han utilizado diversas técnicas entre las que se pueden mencionar los métodos Monte Carlo, iterativos, y de la máxima entropía. Estas técnicas emplean códigos de deconvolución como BUNKIUT [Miller 1993], BUMS [Sweezy *et al.*, 2002], MITOM [Tomás *et al.*, 2004; Bakali 2001], FRUIT [Bedogni *et al.*, 2007], NSDUAZ [Vega-Carrillo *et al.*, 2012], entre otros.

Aunque dichos métodos son efectivos para la reconstrucción del espectro de neutrones, presentan los siguientes inconvenientes: el peso del SEEB, los largos periodos de tiempo empleados para realizar las mediciones, la baja resolución del sistema, la necesidad de un espectro inicial y un usuario experimentado para la manipulación del código, son algunas desventajas que este sistema presenta.

En este trabajo se usó como referencia el BUNKIUT, este código utiliza los algoritmos BON31G y SPUNIT. El BUNKIUT nos brinda varias formas para ingresar el espectro inicial una de esas es usando la opción MAXIET. A partir de la experiencia obtenida utilizando el código BUNKIUT [Miller 1993], se ha observado que presenta los siguientes inconvenientes: es muy dependiente del usuario y requiere de un espectro inicial muy cercano a la respuesta que se intenta encontrar. En un intento por resolver los problemas del BUNKIUT se diseñó el código para la reconstrucción de espectros de neutrones basado en métodos iterativos conocido como NSDUAZ (Neutron Spectrometry and Dosimetry unfolding code of the Universidad Autónoma de Zacatecas) [Vega-Carrillo *et al.*, 2012].

El propósito de este trabajo es probar y validar el código NSDUAZ mediante la reconstrucción de espectros de neutrones y comparar los resultados obtenidos con el código BUNKIUT.

2.- MATERIALES Y METODOS

En este apartado se describen los materiales y estrategias empleadas para la validación del NSDUAZ, la herramienta fue desarrollada en base a métodos iterativos usando el algoritmo SPUNIT, este algoritmo también es usado por el código BUNKIUT el cual sirvió de control para realizar las comparaciones [Miller 1993].

2.1.- Algoritmo SPUNIT.

La ecuación 3 muestra el algoritmo SPUNIT:

$$\Phi_k^{i+1} = \frac{\Phi_k^i}{\sum_j \frac{R_{jk}}{C_j^i}} \sum_j^N \frac{R_{jk}}{C_j^i} \quad (3)$$

Donde C_n^j son los datos medidos con el detector j-ésimo durante la i-ésima iteración y Φ_k^i es el flujo de la k-ésima energía durante el intervalo de la i-ésima iteración.

El proceso de reconstrucción asume la solución para Φ_k basado en el conocimiento a priori (espectro inicial). Se resuelve la ecuación 3 para cada intervalo de energía k, usando la solución propuesta Φ_k^i , las mediciones de las cuentas del detector C_n^j y los datos calculados para el detector C_j^i de tal manera que una nueva solución sea encontrada.

Este proceso se repite hasta que se complete una convergencia aproximada, expresada en la ecuación 4.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(NG_i - C_i)^2}{NG_i - C_i} \quad (4)$$

Donde NG_i es un rango experimental medido con el SEBB y C_i es un dato calculado con el algoritmo SPUNIT.

El programa NSDUAZ incluye una rutina de programación que emplea un proceso estadístico basado en los rangos relativos a las esferas de 5 pulgadas de diámetro, para la selección automática del espectro inicial [Ortiz-Rodríguez 2011a].

2.2.- Selección del Espectro Inicial.

Para resolver la necesidad de proporcionar un espectro inicial, se emplea un catálogo de espectros de neutrones compilado por la IAEA. El código NSDUAZ fue diseñado con la matriz de respuesta conocida como UTA4, la cuál es expresada en 31 grupos de energía que van desde 10^{-8} hasta 231.2 MeV. Debido a que el compendio de neutrones se encuentra expresado en 60 grupos de energía, es necesario realizar un proceso de conversión,

conocido como rebobinado, para expresar dichos espectros en los correspondientes grupos de energía de la matriz de respuesta UTA4 [Ortiz-Rodríguez 2011b].

Al multiplicar cada espectro rebobinado con la matriz de respuesta UTA4, se calculan las tasas de conteo que el sistema produciría con en las esferas Bonner. Las cuentas calculadas se normalizaron con relación a la esfera de 5 pulgadas, como se muestra en la figura 1, donde se pueden apreciar las cuentas normalizadas.

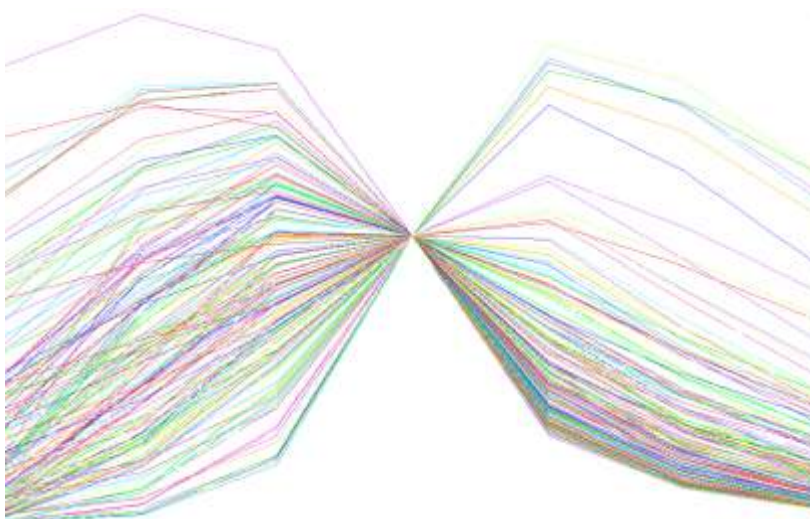


Figura 1. Tasas de conteo calculadas y normalizadas a las cuentas medidas con la esfera de 5”.

En NSDUAZ, la selección automática del espectro inicial implica comparar las tasas de conteo experimentales, normalizadas con relación a la esfera de 5 pulgadas, con las tasas de conteo calculadas. Para cada espectro del catálogo se calcula un parámetro usando la ecuación 5.

$$Q_s = \sum_{j=1}^m \left(\frac{C_{sj} - C_{Expj}}{C_{sj}} \right) \rightarrow S = 1, 2, \dots, ns \quad (5)$$

Donde C_{sj} es el rango de cuentas de la j-ésima esfera producidas por el s-ésimo espectro del catálogo, C_{Expj} es el rango de cuentas de la j-ésima esfera producido por un espectro desconocido, m es el número de esferas usadas en el experimento y ns es el número de espectro usado en el catálogo.

Cada tasa de conteo calculada tiene asociado un espectro de neutrones. El espectro asociado con la tasa de conteo que obtenga el menor valor de Q_s , será utilizado como espectro inicial. Este espectro será utilizado como k en el algoritmo SPUNIT.

Después que el algoritmo SPUNIT reconstruye el espectro de neutrones, $\phi_r(E)$, el código NSDUAZ calcula el flujo total de neutrones, Φ , y el valor promedio de energía $\langle E \rangle$, expresados en las ecuaciones 6 y 7.

$$\Phi = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi_E(E) dE \quad (6)$$

$$\langle E \rangle = \frac{\phi = \int_{E_{min}}^{E_{max}} E \phi_E(E) dE}{\phi = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi_E(E) dE} \quad (7)$$

El espectro reconstruido por el código NSDUAZ se emplea para calcular la dosis equivalente, $h^*(10)$, y la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, como se muestra en las ecuaciones 8 y 9.

$$H = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi_E(E) h(E) dE \quad (8)$$

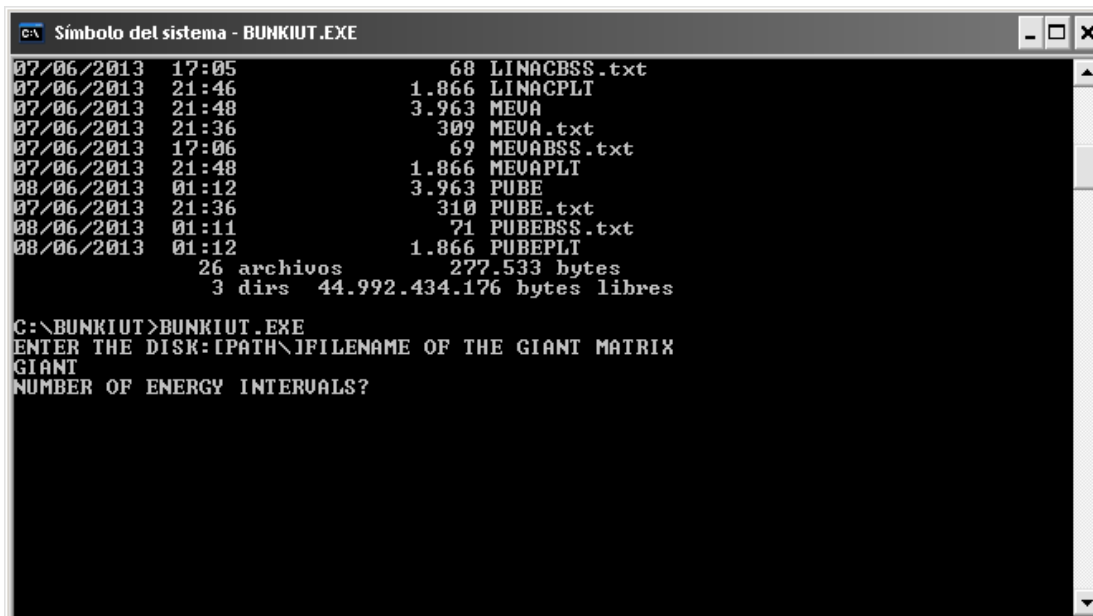
$$H^*10 = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi_E(E) h^*10(E) dE \quad (9)$$

En la ecuación 8, los valores del fluente a factores de conversión de dosis equivalentes, $h(E)$ son obtenidos del reporte 21 del ICRP [ICRP 1973]. En la ecuación 9, los valores del fluente a factores de conversión de dosis equivalentes del entorno son obtenidos del reporte 74 del ICRP [ICRP 1996].

2.3.- Código BUNKIUT

El BUNKI es un código escrito en FORTRAN 4 para el uso en una computadora DEC-10. BUNKI fue diseñado para el uso en un laboratorio para reconstruir el espectro de neutrones, calcular la dosis absorbida y la dosis del espectro equivalente.

Años después se desarrolló el programa BUNKIUT cuya única diferencia fue ser pasado del FORTRAN 4 al FORTRAN 77 lo cual permitió que se pudiera compilar y pudiese ser ejecutado en cualquier computadora que contara con el entorno MS-DOS [Miller S. C. 1993]. En el código BUNKIUT el usuario puede elegir entre dos algoritmos, el BON31G y el SPUNIT, además de elegir diferentes opciones para proporcionar un espectro inicial, una de estas opciones es mediante la opción MAXIET. A pesar de esto el BUNKIUT sigue presentando la necesidad de tener el espectro inicial, el cual, como se dijo anteriormente es muy cercano a la respuesta que se desea obtener esto ocasiona que el programa sea muy dependiente del usuario; ya que este debe proporcionar el espectro inicial calculado esto puede interferir en gran medida con el resultado final ya que este depende de la calidad del espectro inicial. Además la interfaz del programa es poco amigable para el usuario como se ve en la figura 3.1.



```
Símbolo del sistema - BUNKIUT.EXE
07/06/2013 17:05          68 LINACBSS.txt
07/06/2013 21:46         1.866 LINACPLT
07/06/2013 21:48         3.963 MEUA
07/06/2013 21:36         309 MEUA.txt
07/06/2013 17:06          69 MEUABSS.txt
07/06/2013 21:48         1.866 MEUAPLI
08/06/2013 01:12         3.963 PUBE
07/06/2013 21:36         310 PUBE.txt
08/06/2013 01:11          71 PUBEBSST.txt
08/06/2013 01:12         1.866 PUBEPLI
          26 archivos      277.533 bytes
          3 dirs 44.992.434.176 bytes libres

C:\BUNKIUT>BUNKIUT.EXE
ENTER THE DISK: LPATH \ JFILENAME OF THE GIANT MATRIX
GIANT
NUMBER OF ENERGY INTERVALS?
```

Figura 2. Entorno del código BUNKIUT.

Esto requiere la necesidad de un usuario especialista; además, el código no es ejecutable en las versiones más recientes de windows (Vista 64bits y posteriores) [Ortiz-Rodríguez J. M. 2011a].

2.3.- Código NSDUAZ.

El código NSDUAZ se diseñó a partir del algoritmo SPUNIT, la matriz de respuesta UTA4, el catálogo rebobinado de espectros de neutrones y las tasas de conteo calculadas con los dos anteriores.

La figura 3 muestra la ventana principal del programa desplegado en Windows. El programa se diseñó para ser instalado en entornos Windows XP o superiores por medio de un archivo de instalación ejecutable.

A continuación se describe la interfaz del programa. En la parte superior izquierda de la pantalla, el programa captura la fecha y hora del sistema en el que se encuentre instalado. Abajo se encuentra un cuadro de texto donde si el usuario lo desea puede colocar su nombre o el nombre de la empresa, al lado derecho se encuentra otro cuadro de texto donde el usuario puede añadir información adicional y/o comentarios. En la parte izquierda media de la interfaz se localiza la sección de configuraciones y entrada de datos. En esta parte se selecciona el archivo, el porcentaje de error (se recomienda seleccionar un error del 10%), el número de iteraciones y se selecciona el número de columna empezando del cero.

Para poder ingresar los datos de entrada, esto es las tasas de conteo medidas con el SEEB, el usuario deberá crear un archivo en formato *.txt como se muestra en la figura 4, se puede apreciar que las lecturas experimentales medidas con el SEEB, se colocan en una columna. El primer renglón corresponde a la esfera de 0 pulgadas, es decir, el detector desnudo; del segundo al séptimo renglón se colocan las lecturas tomadas con las esferas de 2, 3, 5, 8 10 y 12 pulgadas respectivamente.

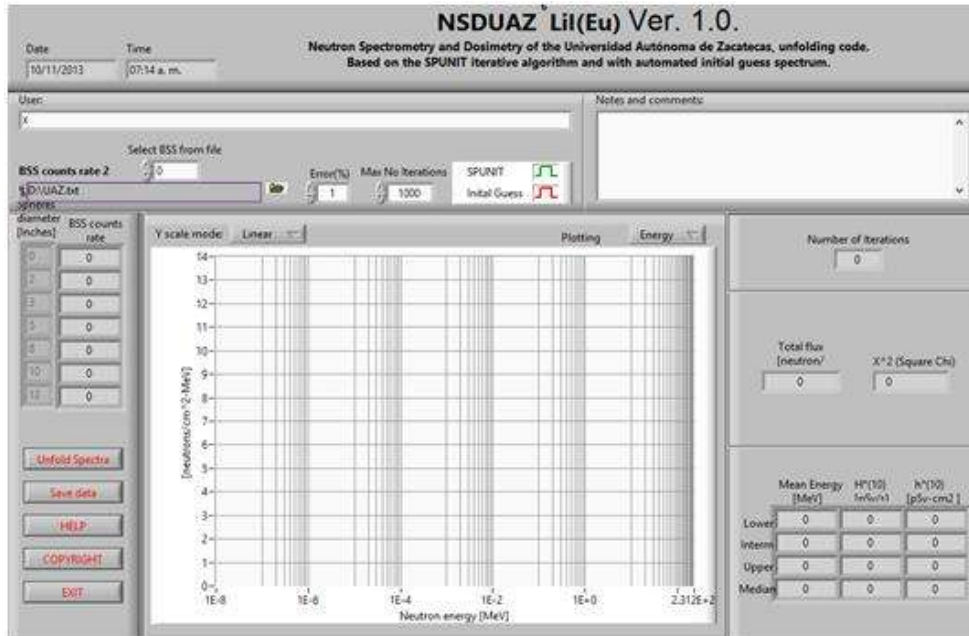


Figura 3. Ventana principal del código NSDUAZ

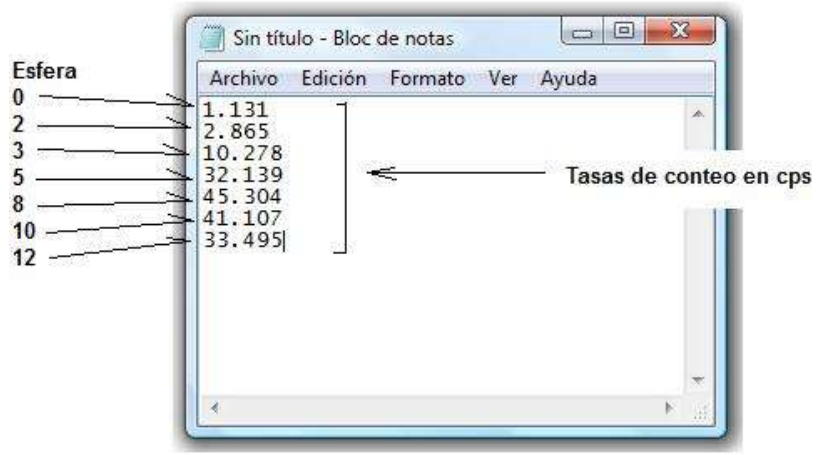


Figura 4. Tasas de conteo de un archivo de entrada.

En la esquina inferior izquierda se encuentran los comandos para iniciar el proceso de reconstrucción del espectro, para ello, el usuario debería dar clic en el botón “Unfold Spectra”; El botón “Save Data” genera un reporte en formato HTML.

En la parte media de la interfaz se muestra la gráfica que representa el espectro de neutrones y su correspondiente espectro inicial seleccionado de forma automática por la rutina programada.

3.- RESULTADOS.

Se realizaron dos pruebas con las fuentes de neutrones de Californio-252 y Plutonio-239/Berilio; las pruebas se realizaron usando dos programas iterativos el primero fue el BUNKIUT el cual al ser un programa válido se sabe que entregara resultados confiables por lo que se usó como control; el segundo programa usado fue el NSDUAZ que es al que se sometió a la prueba para su validación. Para realizar la comparación se realizó la prueba de la desviación relativa.

3.1.- Californio (^{252}Cf).

Aquí se muestran las pruebas realizadas para la fuente de ^{252}Cf en los entornos BUNKIUT y NSDUAZ, así como una comparación entre ambos. La fluencia total arrojada por el BUNKIUT fue de 253 n/cm^2 , mientras que en el NSDUAZ fue de 250 n/cm^2 realizando la comparación mediante la desviación estándar nos dio un error de 1.19% que es menor al 15% permitido.

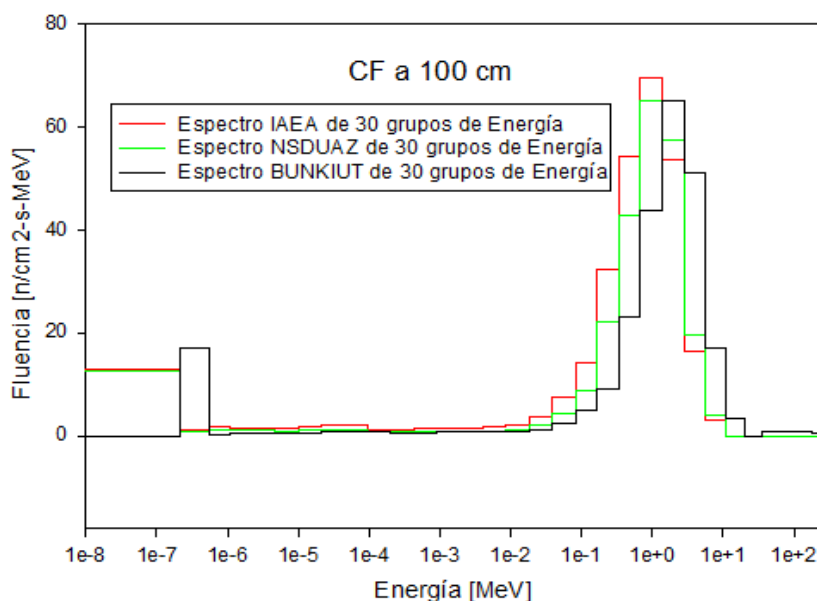


Figura 5. Comparación entre los espectros obtenidos de ambos códigos además del espectro otorgado por la IAEA para la fuente de ^{252}Cf .

3.2.- Plutonio-Berilio ($^{239}\text{PuBe}$).

Aquí se muestran las pruebas realizadas para la fuente de $^{239}\text{PuBe}$ en los entornos BUNKIUT y NSDUAZ, así como una comparación entre ambos. La fluencia total arrojada por el BUNKIUT fue de 62 n/cm^2 , mientras que en el NSDUAZ fue de 62 n/cm^2 , realizando la comparación mediante la desviación estándar nos dio un error muy cercano al 0%.

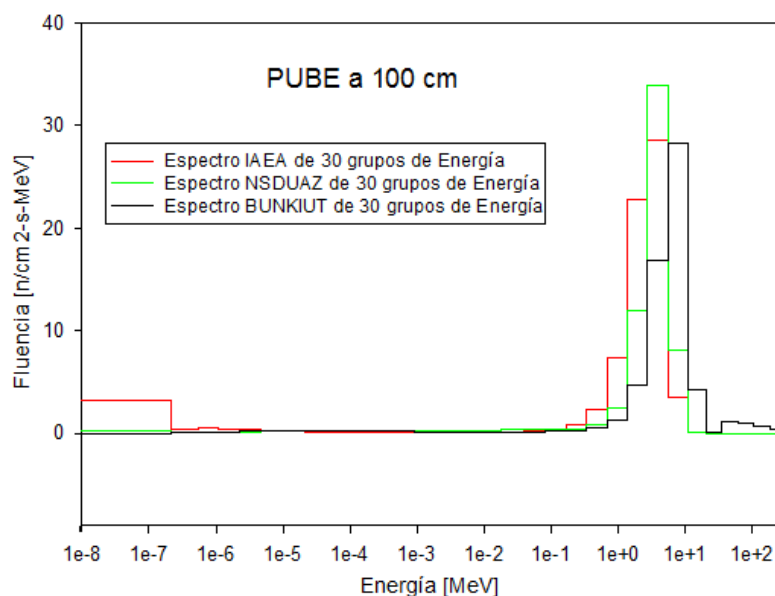


Figura 5. Comparación entre los espectros obtenidos de ambos códigos además del espectro otorgado por la IAEA para la fuente de $^{239}\text{PuBe}$.

4.- DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos se observa que los espectros reconstruidos presentan un error que está dentro del límite reportado en la literatura que oscila alrededor del 15%.

5.- CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se observa que los espectros reconstruidos presentan un error que está dentro del límite reportado en la literatura que oscila alrededor del 15%. Con lo

anterior se concluye que el código diseñado presenta resultados semejantes a las técnicas empleadas en la actualidad.

El código diseñado presenta la ventaja con relación a los códigos utilizados actualmente de seleccionar el espectro inicial de forma automática, reduciendo significativamente el tiempo requerido para la reconstrucción del espectro.

El NSDUAZ usando el algoritmo SPUNIT nos da la posibilidad de ver el espectro de manera gráfica, nos permite realizar anotaciones, escoger las unidades en que se presentan los resultados.

El NSDUAZ es compatible con las últimas versiones de Windows (Vista, 7 y 8)

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los resultados obtenidos en el proyecto de investigación bajo el convenio ZAC-2011-C01-168387 parcialmente financiado por los de Fondos Mixtos CONACYT – Gobierno del estado de Zacatecas. También, se agradece el apoyo recibido, por el primer autor, por parte del COZCyT.

REFERENCIAS

- Alvera AV; Cosack M; Hunt JB; Thomas DJ; Schraube H. (1992). *Experimental determination of the response of four Bonner Sphere sets to monoenergetic neutrons (II)*, Radiation Protection Dosimetry **40**: 91- 102.
- Bakali M. (2001) *Espectrometría neutrónica en las centrales nucleares mediante un sistema de esferas Bonner*. Tesis de doctorado de la Universidad Autónoma de Barcelona, España.
- Bedogni R; Domingo C; Esposito A; Fernández F. (2007). *FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces*. Radiation Protection Dosimetry **580**: 1301-1309.
- Brooks FD; Klein H. (2002). *Neutron Spectrometry, historical review and present status*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **476**: 347-352.

- ICRP. (1973). *Data for Protection Against Ionising Radiation from External Sources*. ICRP publication 21.
- ICRP. (1996). *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*. ICRP publication 74.
- Johnson TL; Gorbics SG. (1981). *An iterative perturbation method for unfolding neutron spectra from Bonner sphere data*. Annual Health Physics Society meeting. Louisville, Kentucky.
- Martínez Blanco MR. (2009). *NSDaan: Una herramienta de cómputo para la espectrometría y dosimetría de neutrones basada en RNA*. Tesis de Maestría, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- Miller SC. (1993). *AFITBUNKI: a modified iterative code to unfold neutron spectra from Bonner sphere detector data*. Master Thesis of the Air Force Institute of Technology Air University, Estados Unidos.
- Ortiz-Rodríguez JM. (2011a). *NSDUAZ Unfolding code, for a Bonner Sphere system based on a Lil(Eu) thermal neutron detector. Reference manual for the neutron spectra unfolding code, based on the SPUNIT iterative unfolding algorithm, with automated initial guess spectrum*. Universidad Autonoma de Zacatecas, Mexico.
- Ortiz-Rodríguez JM. (2011b). *Inteligencia Artificial: aplicaciones a la espectrometría y dosimetría neutronicas*. Tesis de Doctorado de la Universidad de Córdoba, España.
- Sweezy J; Hertel N; Veinot K. (2002). *BUMS-Bonner sphere unfolding made simple: an html based multisphere neutron spectrometer unfolding package*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **476**: 263-269.
- Thomas DJ. (2004). *Neutron Spectrometry for Radiation Protection*. Radiation Protection Dosimetry **110**: 545-548.
- Tomás M; Fernández F; Bakali M; Muller H. (2004), *MITOM: a new unfolding code based on a spectra model method applied to neutron spectrometry*. Radiation Protection Dosimetry **110**: 545-548.
- Vega-Carrillo HR; Iniguez MP. (2002). *Catalogue to select the initial guess spectrum during unfolding*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **476**: 270-272.
- Vega-Carrillo HR; Ortiz-Rodriguez JM; Martinez-Blanco MR. (2012). *NSDUAZ unfolding package for neutron spectrometry and dosimetry with Bonner spheres*. Applied Radiation and Isotopes **71**: 87-91.