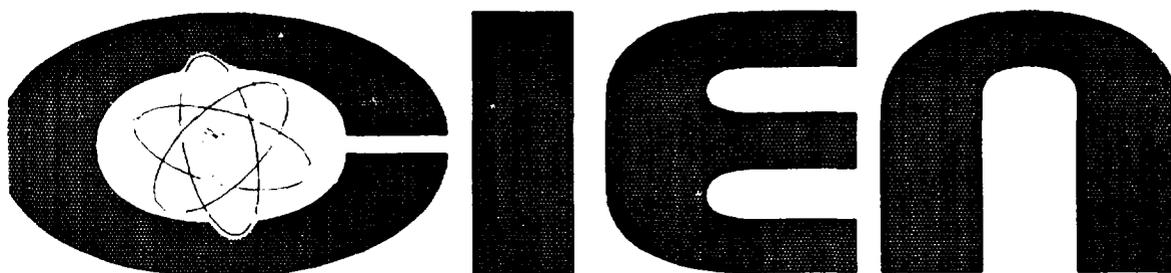




CU9700452

12-97



IMPLEMENTACION DEL ANALISIS POR ACTIVACION NEUTRONICA EN EL  
MULTIPLICADOR NEUTRONICO CS-ISCTN (primera parte)

IMPLEMENTATION OF NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS IN THE NEUTRON  
MULTIPLIER CS-ISCTN (first part)

Contreras, R.; Herrera, E.; Ixquiac, M.; Hernandez, O.;  
Diaz, O.; Lopez, R.; Manso, M.V.  
Padron, G.  
D'Alessandro, K.

\*  
\*\*  
\*\*\*

\* Instituto Superior de Ciencias y Tecnologias Nucleares, La Habana. Cuba  
\*\* Instituto Superior Politecnico, Pinar del Rio. Cuba  
\*\*\* Centro de Isotopos, Habana. Cuba

La Habana, Cuba  
1997

**POOR QUALITY  
ORIGINAL**

VOL 28 No 13

**IMPLEMENTACION DEL ANALISIS POR ACTIVACION  
NEUTRONICA EN EL MULTIPLICADOR NEUTRONICO  
CS-ISCTN (primera parte).**

**R. CONTRERAS<sup>1</sup>, E. F. HERRERA, M. IXQUIAC<sup>1</sup>, O. HERNANDEZ<sup>1</sup>, O. DÍAZ,  
R. LOPEZ, G. PADRON<sup>2</sup>, K. D'ALESSANDRO<sup>3</sup>, I. ALVAREZ, M.V. MANSO**

Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares  
Ave. Salvador Allende eq. Luaces, Habana, Cuba

<sup>1</sup>Universidad de San Carlos, Ciudad de Guatemala

<sup>2</sup>Instituto Superior Politécnico de P. del Río

<sup>3</sup>Centro de Isótopos  
Autopista nacional, km 31/2. Pedro Pi, Habana Cuba

1997

Subject Categories E3600

Key-Words: Neutron Activation Analysis: Q1, Subcritical Assemblies: M1,  
Standardization, Neutron Flux, Gamma Spectroscopy, Sources, Design

# IMPLEMENTACION DEL ANALISIS POR ACTIVACION NEUTRONICA EN EL MULTIPLICADOR NEUTRONICO CS-ISCTN (primera parte).

## IMPLEMENTATION OF NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS IN THE NEUTRON MULTIPLIER CS-ISCTN (first part)

R. CONTRERAS<sup>1</sup>, E. F. HERRERA, M. IXQUIAC<sup>1</sup>, O. HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, O. DÍAZ,  
R. LOPEZ, G. PADRÓN<sup>2</sup>, K. D'ALESSANDRO<sup>3</sup>, I. ALVAREZ, M.V. MANSO

Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares (ISCTN)  
Ave. Salvador Allende eq. Luaces, Habana, Cuba

<sup>1</sup>Universidad de San Carlos, Ciudad de Guatemala

<sup>2</sup>Instituto Superior Politécnico de P. del Río

<sup>3</sup>Centro de Isótopos  
Autopista nacional, km 31/2. Pedro Pi, Habana Cuba

### RESUMEN

En este trabajo se estudia la posibilidad de usar el conjunto subcrítico del ISCTN como irradiador, pero fue diseñado con fines docentes, de modo que sus elementos combustibles tienen poco enriquecimiento de  $^{235}\text{U}$  y es imposible buscar una mejor configuración para aumentar la multiplicación de la instalación. El incremento del flujo sólo puede lograrse aumentando el número de fuentes radioisotópicas de neutrones. También se comparan dos configuraciones fuente-combustible: la original con una sola fuente y una nueva con seis fuentes. La comparación se realiza de acuerdo a los resultados de la multiplicación, la reactividad y el valor teórico del flujo de neutrones térmicos en la posición de irradiación.

### ABSTRACT

The possibility to use the subcritical assemblies of the High Institute of Nuclear Science as irradiator is present, but it was designed with docents purposes. Its fuels haven't enrichment of  $^{235}\text{U}$ . For this reason, is impossible to look for a better configuration to increase the multiplication on the facility. Increase of flux only can reach putting more radioisotopic sources around the irradiation position two configurations source-fuel: the original, with only one source and a new with six sources are compared too. The comparison is realized according the results of multiplication, the reactivity and the theoretical value of the thermal flux in the irradiation position.

### INTRODUCCION

El análisis por activación neutrónica (AAN) viene aplicándose en Cuba desde la década del 70 [1 y 2], haciendo uso de reactores nucleares y microtrones ubicados en el extranjero. En nuestro país las facilidades de irradiación se han visto limitadas solamente a: generadores de neutrones y fuentes radioisotópicas. Sin embargo, a pesar de que se dispuso de un multiplicador de neutrones o conjunto subcrítico (CS) desde 1968, cuando la

URSS donó dicha instalación al Instituto de Investigaciones Nucleares de Cuba ( que en estos momentos se encuentra en el ISCTN ), nunca fue utilizado como irradiador de muestras debido, en principio a la baja densidad de flujo, por lo que su utilidad se limitó solamente a entrenamientos con carácter docente.

Gracias al esfuerzo mancomunado del Dpto. de Ingeniería Física, estudiantes de Maestría de la Universidad de San Carlos de Guatemala y los miembros del Dpto. de Física Nuclear del ISCTN, se ha llevado a cabo el cambio de configuración del CS-ISCTN, con vistas a lograr una mayor densidad de flujo neutrónico y así poder desarrollar el AAN.

En estos momentos los niveles de flujo se mantienen bajos por lo que es necesario desarrollar el análisis por activación instrumental paramétrico (AANIP), ya que no sería económico emplear grandes volúmenes de materiales certificados de referencia (MCR) como único modo de lograr niveles de detección aceptables.

En la actualidad, el uso de reactores nucleares de bajo flujo para la aplicación del AANIP en muestras gigantes está bastante difundido en varios países y no son pocas las ventajas que posee [3].

Para la realización de esta tarea, se ensayaron varias configuraciones fuente-combustible con vistas a que se cumplieran tres objetivos fundamentales: el aumento del flujo neutrónico, una explotación óptima de la multiplicación neutrónica en el combustible y la caracterización general de la posición de irradiación para la implementación del AANIP. En el presente trabajo solamente se muestran los resultados de los valores de multiplicación y reactividad de dos configuraciones extremas.

Con las características físicas de estas configuraciones se procedió al cálculo teórico del flujo térmico, cuyos valores serán usados a modo de patrones para controlar la calidad de los resultados experimentales del flujo térmico, obtenidos por diferentes convenciones usadas en la determinación de la velocidad de reacción por núcleo del blanco. Estas comparaciones serán presentada en trabajos posteriores.

## **EI CS-ISCTN. CARACTERISTICAS PRINCIPALES**

El CS-ISCTN es un sistema de multiplicación neutrónica compuesto por un tanque cilíndrico de aluminio de 1200 mm de diámetro por 1250 mm de altura para el almacenamiento de agua ligera, usada al mismo tiempo como moderador y reflector de los neutrones. Este descansa sobre un pedestal de grafito de 1200 mm de arista, por 600 mm de altura, en el que se encuentra el canal de abertura para la introducción de la semilla, con vistas a que se comporte como una fuente plana de neutrones, ubicada en el fondo del tanque.

El combustible está dispuesto en forma de 8 pastillas de uranio natural, para cada uno de los 165 ELCOS, los cuales son colocados en los retículos de los soportes de duro-aluminio. Existen cuatro tipos de retículos para los estudios de la configuración: tres de paso fijo ( 4.5, 5 y 6 cm, respectivamente) y uno de paso variable [4 - 6].

Los cambios de configuración llevados a cabo para el desarrollo de este trabajo se hicieron solamente empleando el retículo fijo de 5 cm de paso de red.

En el estudio de las dos configuraciones presentadas fueron usadas como semillas seis fuentes de Pu-Be y Am-B a las cuales se les determinó su intensidad por el método de integración espacial (MIE) debido a que no se disponía, en la mayoría de los casos de los pasaportes [7].

### DETERMINACION DE LAS INTENSIDADES DE LAS FUENTES

Para la aplicación del MIE en la determinación de las intensidades de las fuentes, se usó el prisma de grafito que se encuentra ubicado en el laboratorio del CS-ISCTN. Este prisma tiene 1800 mm de arista y es perfectamente cúbico. Dispone de un único canal central. Una a una fueron colocadas las fuentes, las cuales fueron ubicadas a 200 mm del fondo sur del prisma. Fueron registradas 16 posiciones de medición las cuales concuerdan con los diferentes cilindros de grafito que ajustan perfectamente al canal central del prisma: 12 cilindros de 50 mm y 4 de 200 mm de longitud.

Las características del sistema de conteo de los neutrones es la siguiente: un detector de BF<sub>3</sub> SNM-12 de 26 cm<sup>3</sup> de volumen efectivo se conecta por medio de un cable coaxial de 10 m de longitud a un pre-amplificador CANBERRA modelo 2005. Después de 20 m de cable coaxial soterrado, el sistema de detección se conecta a un rack CANBERRA modelo PS 12/1 que contiene a la fuente de alimentación modelo 3106 B, amplificador espectrométrico de investigaciones modelo 2020, SCA modelo 203, el dual-counter-timer modelo 2037 y el LIN-LOG RAT 1481L. Este sistema de alimentación se alterna con otro sistema de rack EUROCAR, TSCA 301, scaler- timer 401 y un LIN-LOG RAT 501.

Todas las mediciones fueron de 1 minuto, ya que se disponía de suficiente estadística de conteo para cada posición.

La determinación de la intensidad de cada fuente (Q) se realizó integrando espacialmente las distribuciones de velocidades de conteos de los neutrones para cada posición. La integración se llevo a cabo por medio de la aplicación del programa Micro-Cal Origin V3, con el cual fueron determinados los errores en el proceso de integración.

La expresión para la determinación de Q fue tomada de [7]:

$$Q = \frac{4\pi N \bar{\sigma}_a}{N_B \sigma_{aB}} \int_0^{\infty} P(r) r^2 dr \quad (1)$$

donde:

N es el número de núcleos por unidad de volumen de moderador

$\bar{\sigma}_a$  es la sección media de absorción del moderador (grafito en este caso)

N<sub>B</sub> es el número de núcleos de boro por unidad de volumen del detector

$\bar{\sigma}_{aB}$  es la sección media de absorción del boro

P(r) velocidad de conteo de neutrones (n s<sup>-1</sup>)

r distancia fuente detector (cm)

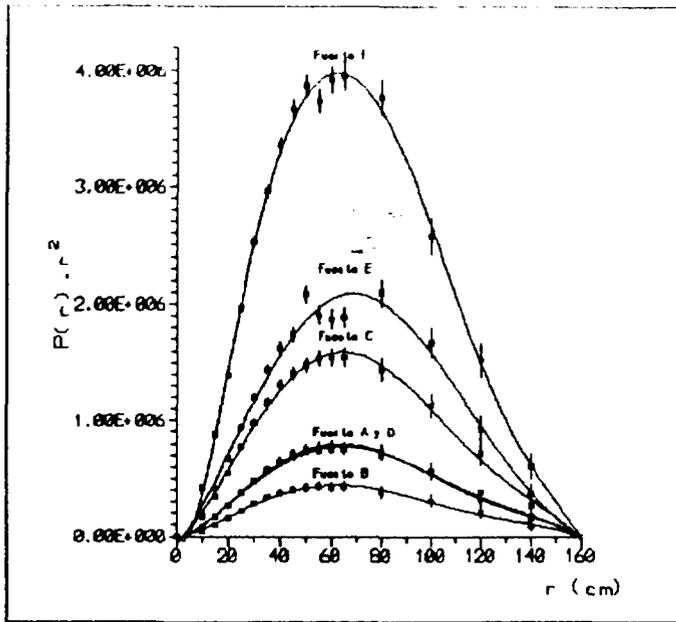


Fig. 1 Intensidades de las fuentes por el MIE

En la figura 1 se muestran las distribuciones espaciales de cada una de las fuentes estudiadas. En el eje de las ordenadas se representa el producto de la velocidad de conteo por la distancia al cuadrado y en el de las abscisas las distancia fuente-detector. Las bandas de error para cada una de las mediciones se presentan en el gráfico y son empleadas como factores de peso en la determinación del error de Q. En la Tabla 1 se muestra el cuadro final donde aparecen las características generales de las fuentes y se

comparan los valores reportados en los pasaportes con los determinados por el método descrito más arriba.

Tabla 1 Características generales de las fuentes

Fuente	Características	Fecha de Medición	Act. y (Bq)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Reporte Inicial ( $n s^{-1}$ )	Valor de Q calculado ( $n s^{-1}$ )
A	Fuente del Prisma Fuente No. 1026 Certificado 5694 Tipo: Pu-Be	29/03/68	$1.0 \times 10^{11}$	$38.0 \pm 0.2$	$40.0 \pm 1.5$	$5.30 \times 10^7$	$(5.2 \pm 0.1) \times 10^6$
B	Tipo Am-B	—	—	$20.0 \pm 0.1$	$60.0 \pm 1.5$	$1.5 \times 10^6 ?$	$(2.9 \pm 0.4) \times 10^6$
C	Estudios geolog. Fuente No. 545 Certificado 7941 Tipo: Pu-Be	01/88	$2.4 \times 10^{11}$	$18.0 \pm 0.8$	$22.0 \pm 0.4$	$1.00 \times 10^7$	$(1.00 \pm 0.1) \times 10^7$
D	Reflector de Neut. Tipo: Am-B ?	—	—	$38.0 \pm 0.2$	$40.0 \pm 1.5$	$5.0 \times 10^6$	$(5.0 \pm 0.1) \times 10^6$
E	Fuente desconocida Tipo: Pu-Be ?	—	—	$50.0 \pm 1.2$	$52.0 \pm 1.4$	—	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^7$
F	Fuente CS-INI Pu-Be	—	—	$45.0 \pm 1.2$	$50.0 \pm 1.4$	$2.1 \times 10^7$	$(2.6 \pm 0.4) \times 10^7$
		TOTAL					$(6.31 \pm 0.6) \times 10^7$

### DETERMINACION DE LA MULTIPLICACION PARA LAS DOS CONFIGURACIONES ESTUDIADAS

Como ya se explicó anteriormente, fueron estudiados varias configuraciones, fuente-combustible, pero solamente se muestran los

resultados de los dos casos extremos: el primero corresponde a la utilización de 164 ELCOS de los 165 existentes ( se extrae el del canal central para usarse como posición de irradiación ) y la fuente denominada como F en la Tabla 1 en el nicho ubicado en el pedestal de grafito y la segunda configuración, en la que se usan la misma cantidad de ELCOS, pero en este caso se colocan cuatro fuentes en la parte inferior de los ELCOS que rodean al canal central, éstas son la A, B, C y D. Por último las fuentes más intensas: F y E se colocan en el nicho del pedestal de grafito.

En la figura 2 se puede observar la representación esquemática de las dos configuraciones comparadas.

Los cálculos de la multiplicación fueron realizados de acuerdo al procedimiento descrito en [5]. Estos cálculos se llevaron a cabo con la ayuda del programa EXEL-V7. En las Tablas 2 y 3 del ANEXO se presentan las matrices cuadradas de los conteos realizados en dos direcciones ( 84 puntos en total ), 12 en la dirección de la altura del tanque de moderación ( z ) y 7 en las posiciones radiales correspondientes a los orificios practicados en la rejilla con paso fijo de 5 cm ( r ). Los pasos en la dirección vertical z fueron tomados cada 10 cm y la primera posición, tomada desde el fondo del tanque de 13 cm, coincide con la distancia desde el fondo del tanque hasta el centro geométrico del volumen efectivo del detector SMN-12.

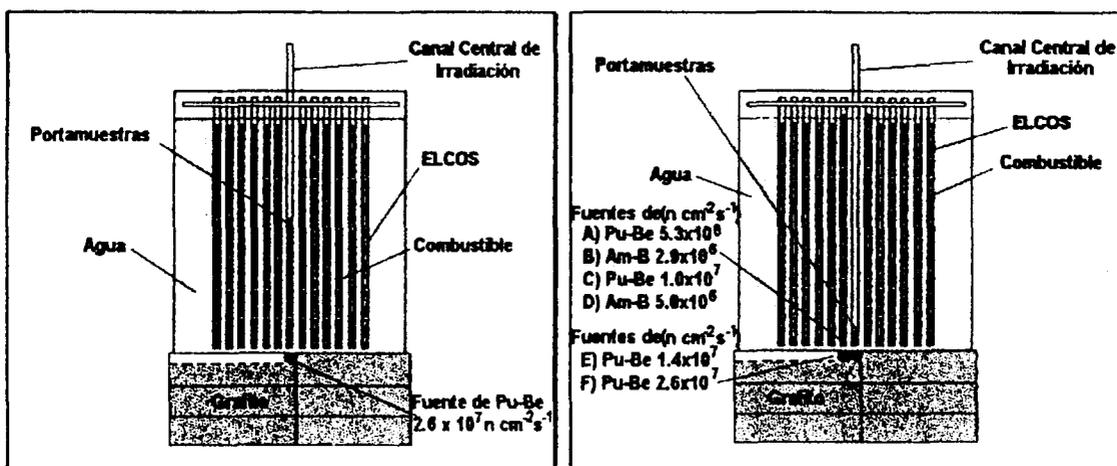


Fig 2 Representación esquemática de las dos configuraciones estudiadas. En la derecha aparece la configuración de una fuente y 164 ELCOS y en la izquierda la configuración e seis fuentes y 164 ELCOS

En la Tabla 2 se reportan los valores de los conteos usando la fuente F y 164 ELCOS, para cada una de las posiciones de acuerdo a la primera configuración. También se presentan los conteos de las mismas posiciones con la fuente F sin ELCOS y los valores de los conteos del fondo de fisión (164 ELCOS sin fuente). Al final de dicha tabla aparecen los cálculos de la multiplicación diferencial en cada punto de la matriz realizados de acuerdo a la expresión:

$$M = \frac{P(r, z) - P_{\pi}(r, z)}{P_0(r, z) - P_{r0}(r, z)} \quad (2)$$

donde:

**M** es la multiplicación

**P(r, z)** es la velocidad de conteo del punto correspondiente en la matriz (r,z), con fuente y con ELCOS.

**P<sub>r</sub>(r, z)** velocidad de conteo del fondo de fisión en el punto correspondiente a la matriz (r,z).

**P<sub>0</sub>(r, z)** velocidad de conteo con fuente y sin ELCOS.

**P<sub>ro</sub>(r, z)** velocidad e conteo del fondo radiactivo del moderador de agua ligera, nulo para toda la matriz (r,z).

El cálculo de la multiplicación integral para todo el sistema se realizó ajustando en la dirección axial (z) una función exponencial decreciente para cada paso en r del tipo:

$$y = a_{1,i}(r)e^{-a_{2,i}z} \quad (3)$$

siendo **a<sub>1,i</sub>(r)** y **a<sub>2,i</sub>(r)** los coeficientes de ajuste en la dirección axial para cada paso en la dirección radial

En la dirección radial se ajustó un polinomio de Bessel del tipo:

$$y = b_1 J_0(b_2 \cdot r) \quad (4)$$

Después de este procedimiento, la multiplicación del sistema integrada en los límites impuestos por la zona asintótica queda como:

$$M = \frac{\left[ \int_{63}^{73} a_{1,i}(r)e^{-a_{2,i}z} \int_{16}^{25} b_1 J_0(b_2 \cdot r) dz dr \right]_{FE} - \left[ \int_{63}^{73} a_{1,i}(r)e^{-a_{2,i}z} \int_{16}^{25} b_1 J_0(b_2 \cdot r) dz dr \right]_{FF}}{\left[ \int_{63}^{73} a_{1,i}(r)e^{-a_{2,i}z} \int_{16}^{25} b_1 J_0(b_2 \cdot r) dz dr \right]_F} \quad (5)$$

Los subíndices indican: FE fuente(s) y ELCOS, FF fondo de fisión y F sólo fuente.

El proceso de integración de la expresión (5) se llevó a cabo a través del programa Micro-Cal Origin V3.

Los errores en la determinación de la multiplicación están asociados a los procesos de ajuste e integración.

En la Tabla 3 del ANEXO se muestran los mismos resultados, pero para la configuración de seis fuentes y 164 ELCOS.

Los valores de la multiplicación integral del sistema con su error y los promedios de los valores diferenciales para los puntos tomados de la matriz (z,r) fueron determinados también por medio del EXEL V7 y son presentados para las dos configuraciones respectivamente en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4 Resultado de la multiplicación integral y promedio diferencial en la zona asintótica para una fuente y 164 ELCOS (Tomado directamente del programa EXEL V7).

CUADRO GENERAL DE LOS RESULTADOS (medición del 7 de octubre de 1996)			
Multiplicación integral en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		9.17340727	16.20%
Reactividad integral en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		-0.10901075	
Multiplicación promedio en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		9.29286728	10.01%
Reactividad promedio en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		-0.10760941	

Se observa fácilmente de la Tabla 4 que los valores integrales y promedio diferenciales de la multiplicación coinciden, debido a que los cálculos se llevaron a cabo en los límites de la zona asintótica del CS-ISCTN, en la cual se cumple que la relación flujo térmico a epitérmico es aproximadamente constante, por lo que las características de multiplicación son parecidas.

Tabla 5 Resultado de la multiplicación integral y promedio diferencial en la zona asintótica para seis fuente y 164 ELCOS (Tomado directamente del programa EXEL V7).

CUADRO GENERAL DE LOS RESULTADOS (medición del 20 de noviembre de 1996)			
Multiplicación integral en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		9.54258781	11.96%
Reactividad integral en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		-0.10479338	
Multiplicación promedio en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		12.1974464	30.58%
Reactividad promedio en la zona (15 < r < 25 cm; 53 < z < 73 cm) =		-0.08198437	

En cambio en la Tabla 5 se observa la no coincidencia entre los valores de la multiplicación integral del sistema y el promedio de la diferencial para la misma zona de integración. Esto se debe a que en el caso de la configuración con seis fuentes, hay cuatro fuentes en la parte moderada por agua, o sea dentro del tanque, por lo que el carácter de fuente plana se pierde, desapareciendo la zona asintótica. Dicha situación explica también el elevado error en el cálculo de la multiplicación promedio diferencial (30.58 %) que se reporta en la Tabla 5, debido a la gran dispersión de los valores de multiplicación diferencial en la misma zona asintótica.

Se observa la desaparición de la zona asintótica de forma más clara si comparamos los gráficos de superficie representados en las figuras 3 y 4 para ambas configuraciones estudiadas. En estos gráficos de superficie se grafican los valores de multiplicación diferencial calculados para cada uno de los puntos de la matriz (r,z).

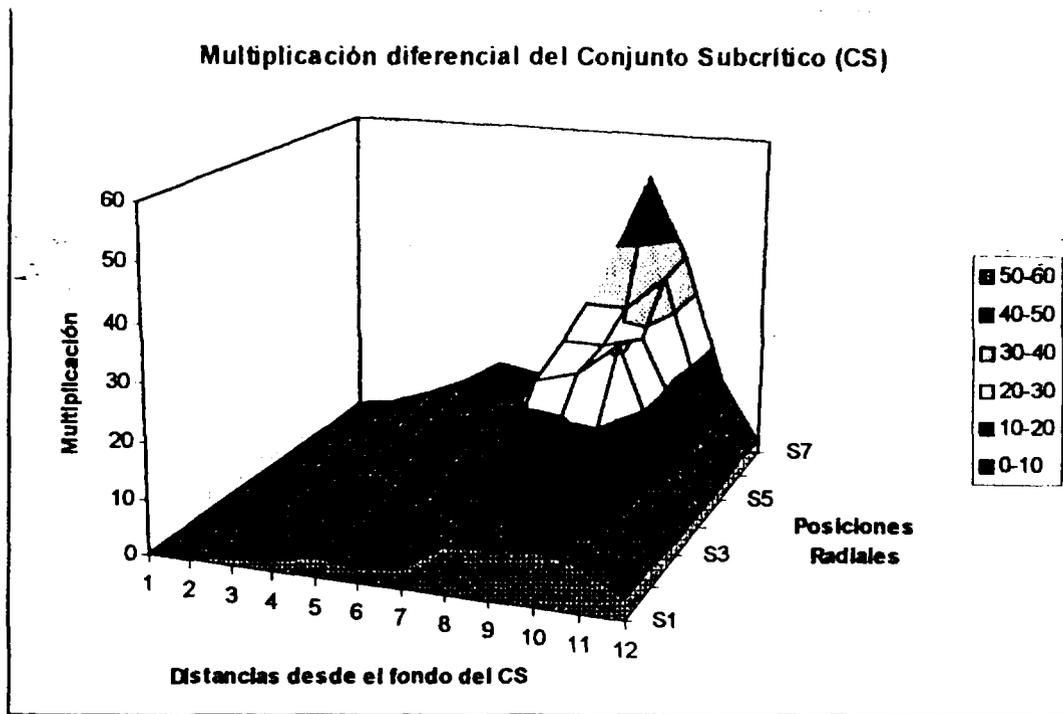


Fig 3 Representación gráfica de las multiplicaciones diferenciales en la matriz  $(z,r)$ . La zona asintótica está enmarcada entre las posiciones 5 y 7 de las distancias hasta el fondo del tanque de moderación y las posiciones S3 y S5 correspondientes a las zonas  $53 < z < 73$  cm y  $15 < r < 25$  cm respectivamente.

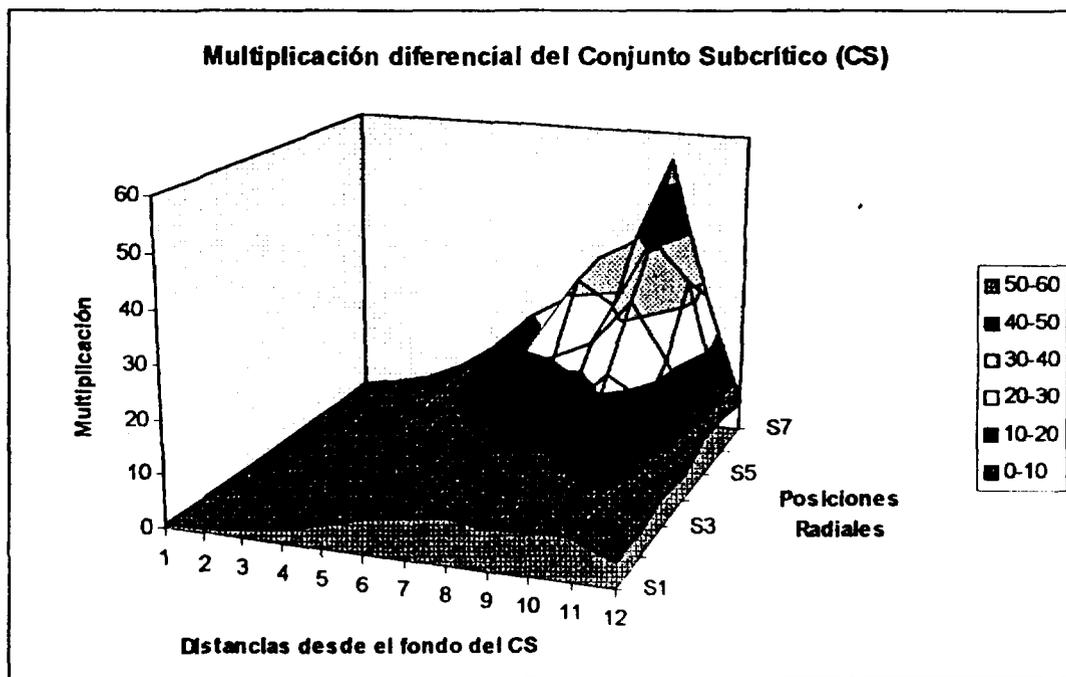


Fig 4 Representación gráfica de las multiplicaciones diferenciales en la matriz  $(z,r)$ . Puede observarse la desaparición de la zona asintótica enmarcada entre las posiciones 5 y 7 de las distancias hasta el fondo del tanque de moderación y las posiciones S3 y S5 correspondientes a las zonas  $53 < z < 73$  cm y  $15 < r < 25$  cm respectivamente, debido a la colocación de cuatro fuentes en el fondo del tanque de moderación del CS.

## DETERMINACION TEORICA DEL FLUJO TERMICO EN EL CS-ISCTN

Una vez que se determinaron los valores de multiplicación en cada una de las configuraciones, puede realizarse el cálculo del flujo térmico teórico empleando las expresiones que se describen en [8], con algunas aproximaciones que son explicadas a continuación:

- **Una sola fuente colocada en la parte superior del prisma de grafito:**

Como la proyección de los neutrones hacia el tanque de moderación deja de comportarse como una fuente plana debido a la gran intensidad de la misma ( $2.6 \pm 0.4$ )  $\times 10^7$  n s<sup>-1</sup>, la cual fue colocada en la parte superior del prisma de grafito para esta configuración (pequeña región asintótica), se puede aproximar el cálculo del flujo térmico teórico al caso de una fuente puntual colocada a 48 cm de la posición de irradiación (ver parte izquierda de la figura 2). Si además de considerar la absorción de los neutrones en el moderador se tiene en cuenta la absorción de los neutrones en el uranio natural contenido en los 164 ELCOS y se incluye el efecto de la multiplicación de los neutrones en la posición de irradiación, el valor teórico del flujo de los neutrones térmicos en el CS-ISCTN para dicha configuración puede calcularse a partir de:

$$\Phi_{th}(r) = \frac{M \cdot Q}{2r \cdot [\eta_1 \cdot \Sigma_a(H_2O) + \eta_2 \cdot \Sigma_a(^{238}U)] \cdot R^2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{l}{1 + \left( \frac{l^2 \pi^2}{R^2 L^2} \right)} \cdot e^{-\frac{l^2 \cdot \pi^2}{R^2} \cdot x} \cdot \text{sen} \left( \frac{l \cdot \pi \cdot r}{R} \right) \quad (6)$$

donde:

$\Phi_{th}(r)$  es el flujo térmico teórico en a una distancia  $z$  de la dirección axial en este caso se tomó  $r = z = 48$  cm desde la posición de irradiación hasta la fuente (longitud de cuatro pastillas de uranio natural)

$M$  es multiplicación en la posición de irradiación igual a **6.587** (ver ANEXO)

$Q$  es la intensidad de la fuente, ( $2.6 \pm 0.4$ )  $\times 10^7$  n s<sup>-1</sup> (ver Tabla 1)

$\eta_1$  y  $\eta_2$  representan las fracciones volumétricas del agua ligera (moderador) y del combustible respecto al volumen total del tanque de moderación, iguales a **0.916** y **0.084** respectivamente

$\Sigma_a(H_2O)$  sección macroscópica de absorción del agua ligera,  **$1.89 \times 10^{-2}$  cm<sup>-1</sup>**[8]

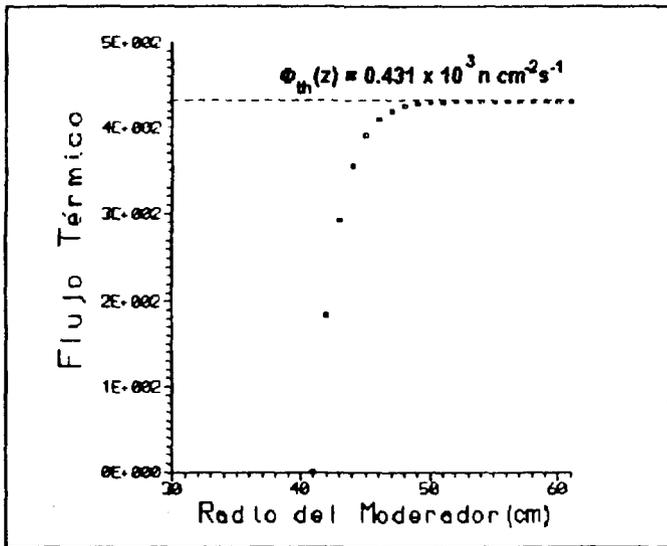
$\Sigma_a(^{238}U)$  sección macroscópica de absorción del combustible, ( **$1.28 \pm 0.02$** )  $\times 10^{-1}$  cm<sup>-1</sup> [8, 9 y 10]

$R$  radio efectivo del moderador, como máximo 60 cm

$L$  Longitud de difusión de los neutrones en agua ligera,  **$2.778 \pm 0.011$  cm**, a 22 °C

$\tau$  edad de los neutrones en el agua,  **$57.3 \pm 2.0$  cm<sup>2</sup>**

Debe aclararse que la expresión (6) es válida solamente para geometrías esféricas del moderador, pero en este caso la aproximación fue válida, ya que el valor de flujo se hace constante a partir de una distancia menor que las propias dimensiones cilíndricas del CS-ISCTN. Para comprobar



este efecto se realizó el cálculo del flujo térmico teórico por medio del programa FLUJQT escrito en FORTRAN 90. En este programa se grafican los valores de flujo para cada uno de los radios teóricos del moderador. En la figura 4 se puede observar como se estabiliza el flujo térmico al valor  $(0.431 \pm 0.041) \times 10^3 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , justamente cerca de los 48 cm de distancia fuente-posición de irradiación.

Fig 5 Estabilización del valor del flujo teórico a partir de 48 cm de radio del moderador.

Con este pequeño valor de flujo no es posible realizar AAN en ninguna de sus variantes. Debido a esto se ensayaron las demás configuraciones en aras de aumentar el valor de flujo con la misma cantidad y geometría del combustible (laplaciano del material y laplaciano geométrico respectivamente).

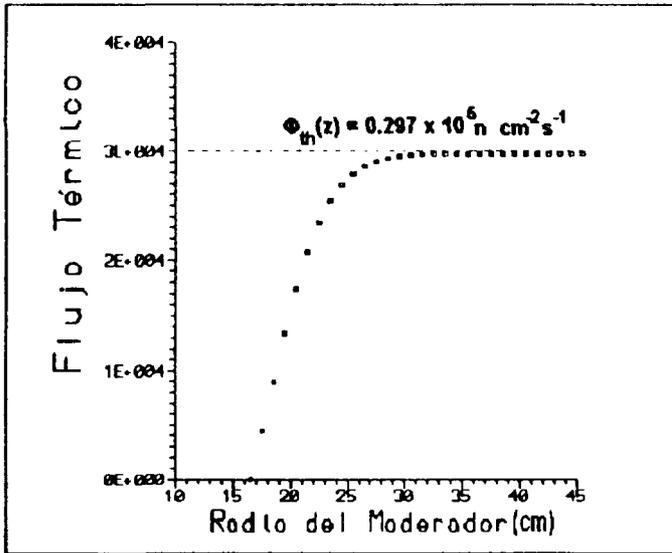
- **Dos fuentes colocadas en la parte superior del prisma de grafito y cuatro alrededor de la posición de irradiación ubicada en el fondo del CS:**

Los procedimientos para la determinación del flujo térmico teórico en esta configuración fueron los mismos. No obstante las características físicas del CS en estas condiciones cambian radicalmente, como ya se ha explicado o sea, se produce la completa desaparición de la zona asintótica debido a la presencia de cuatro fuentes de neutrones en el fondo de los cuatro ELCOS centrales alrededor de la posición de irradiación y dentro del tanque de moderación.

En estas condiciones, el flujo aumenta bruscamente dos órdenes en la posición de irradiación. Sin embargo, no se puede aprovechar correctamente la multiplicación del sistema, pues no sólo ha desaparecido la zona asintótica, sino que los máximos de multiplicación diferencial se han desplazado más de 10 cm hacia arriba, en la dirección axial del CS-ISCTN. Esto se puede observar de la simple comparación entre las figuras 2 y 3. El valor de la multiplicación de la posición de irradiación no fue determinado directamente, pero se pudo extrapolar a partir del resto de las posiciones radiales a 13 cm del fondo del tanque.

Teniendo en cuenta que la distancia media de las fuentes a la posición de irradiación es de 16.5 cm y que la multiplicación en este punto es de 0.9, el valor del flujo térmico teórico para esta configuración es de:

$$\Phi_{th}(z) = (0.297 \pm 0.028) \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



Este valor de flujo fue obtenido teniendo en cuenta que la intensidad de las seis fuentes está concentrado en un solo punto. Como se puede apreciar de la Tabla 1, la suma total de las intensidades de las seis fuentes es de:

$$(6.31 \pm 0.6) \times 10^7 \text{ n s}^{-1}$$

El resto de las magnitudes físicas que se usaron para el cálculo de este flujo tienen los mismos valores que en la configuración anterior.

Fig 6 Estabilización del valor del flujo teórico a partir de 30 cm de radio del moderador.

Al igual que en la figura 5, en la figura 6 también se demuestra que es válida la aproximación de geometría esférica para la determinación del flujo. Se observa que el valor del flujo se estabiliza por encima de los 30 cm, cantidad que queda bastante por debajo de las dimensiones reales del tanque de moderación.

## CONCLUSIONES

Fueron estudiadas dos configuraciones de las fuentes, el combustible y la posición de irradiación. Usando seis fuentes radioisotópicas de neutrones que rodean la posición de irradiación, se puede aumentar el valor del flujo neutrónico en dos órdenes, pero debido a que la misma se encuentra en el fondo del tanque de moderación, no se explota convenientemente la multiplicación de este conjunto subcrítico. Por otra parte, debido a que el laplaciano del material permanece invariable, los valores de reactividad son iguales en ambas configuraciones. En un futuro debe buscarse un compromiso entre el valor del flujo y la multiplicación del sistema. Esta posición debe encontrarse en el centro geométrico del tanque de moderación. Para aumentar el flujo en dicha posición de irradiación es menester aumentar el número de fuentes de neutrones alrededor de la posición de irradiación. En próximos trabajos se mostrarán los resultados de la determinación de los parámetros fundamentales que caracterizan al CS-ISCTN en la posición de irradiación, estos son: la relación del flujo térmico sobre el epitérmico ( $\beta$ ) y el parámetro de forma del espectro epitérmico ( $\alpha$ ). Ambos son imprescindibles para la aplicación del AANIP en este sistema.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los compañeros de la dirección del Departamento de Ingeniería Nuclear, por habernos permitido usar las instalaciones del Conjunto Subcrítico del ISCTN para llevar a cabo los trabajos de medición y procesamiento de los datos.

## REFERENCIAS

- 1- Griffith, J. Ph. Dr Thesis ( en Ruso ). Moscow. P51 (1985)
- 2- Hernández A. T. "Uso del Microtrón para la Comprobación del Análisis por Activación en Rocas y Sustancias Meteoríticas". Ph. Dr. Thesis.( en Ruso ), IUIIN, Dubna (1985).
- 3- Overwater, R. M. W. " The INAA using Big Samples". Ph Dr. Thesis. Delf Univ. (1994)
- 4- Rojas L. "Determinación del Laplaciano del Material y el Flujo de Neutrones Térmicos en un Reactor Sub-Crítico Uranio Natural-Agua Ligera". Trabajo de Diploma (1980)
- 5- Naranjo, H. "Determinación de la Reactividad del CS-ISCTN"(1991)
- 6- Manual de Explotación del CS (1966).
- 7- Soto, L. y Aneiros L.. Manual de Prácticas de Laboratorios de Física de los Neutrones. MES.(1984)
- 8- Beckurts, K. H. and Wirtz, K. " Neutron Physics. Springer-Verlag (1964)
- 9- Velanova, T. Manual de Captura Radiativa de Neutrones. Energoamimizdat ( en Ruso ) (1986)
- 10- De Corte, F. " The  $k_0$  Standardization Method" Ph. Dr. Thesis (1987)

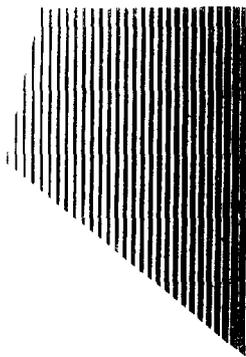
## ANEXO

Tabla 2 Reportes de las velocidades de conteo en los diferentes puntos del plano (r,z) para la determinación de la multiplicación diferencial e integral y la reactividad del CS-ISCTN usando la primera configuración.

Mediciones del 7 de noviembre de 1996								
Reactividad en el CS usando una sola fuente de Pu-Be								
Con una fuente y 164 ELCOS								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6- (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	155234	156057	127367	99259	73385	50445	35411	
23	76164	75982	66314	57879	44519	31958	22632	
33	37825	38779	34002	31534	25259	18083	13557	
43	20116	20178	17471	16734	14138	10261	7738	13379
53	12934	10605	9147	8137	7699	5502	4301	13558
63	8376	5837	4932	4956	4402	3035	2379	13639
73	4630	3143	2749	2683	2356	1687	1328	13305
83	2421	1621	1539	1433	1281	819	769	13465
93	1300	939	862	735	683	510	395	
103	902	779	721	682	613	501	384	Promedio
113	537	476	435	421	329	296	239	13468.2
123	178	140	130	113	103	103	85	
				108660	94295	66295	908862.5	INTEGRAL ERROR
								7.29%
Con una fuente sin ELCOS								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	274946	221515	191283	119503	77023	45791	27401	
23	99049	80574	64433	38572	26714	15436	9095	
33	30465	23267	18912	11356	7868	4937	2727	
43	9751	7055	5594	3316	2258	1529	933	1787
53	3399	2140	1745	1076	759	484	329	1881
63	2692	1639	1170	627	459	300	206	1819
73	1212	810	593	334	247	158	105	1879
83	262	159	105.8	57.6	44.8	28.4	23.2	1875
93	137	80.8	51.8	26.2	23	15.4	6.8	
103	85.2	58.2	35.8	19.2	18.8	12	9.2	Promedio
113	58	38	31.6	25.8	19.6	19.4	15	1848.2
123	37.6	28	32.6	31.4	27.6	21.4	26.8	
				13320	9620	6210	96925	INTEGRAL ERROR
								6.40%
164 ELCOS sin fuente								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	104.4	114.8	95.8	88.2	73.2	65.4	44.4	
23	119.2	127.4	119.4	117.6	97.4	72.8	59	
33	135.4	130	123.8	125.6	98.6	77.6	64	
43	155	143.6	121.2	119.2	101	76	63	1271
53	178	148.2	125	119.2	104	76	67.6	1350
63	198	140.4	123.2	115.2	107	78.4	63.6	1270
73	186.6	140	119.2	108.8	89.6	72	58	1286
83	153.4	109.2	102.2	88	78.6	68	56.6	
93	108.2	78.6	72	62.6	66.4	51	43	Promedio
103	93.8	90.8	85	78.6	74.4	67	44.2	1294.25
113	70.6	65.6	63	66.2	51.6	48.4	37.2	
123	36.8	33.4	35	29.6	29.4	29.8	26	
				2292	2038	1524	19730	INTEGRAL ERROR
								7.72%
MULTIPLICACION CON UNA SOLA FUENTE DE Pu-Be (medición del 7 de octubre de 1996)								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	0.56421843	0.70398032	0.66535552	0.82986034	0.95155733	1.10020746	1.29070472	
23	0.7677493	0.94117854	1.02734003	1.49749559	1.66285843	2.06563877	2.48191314	
33	1.23714426	1.66110801	1.79135998	2.76579782	3.19781393	3.64703261	4.84792813	
43	2.0470721	2.83974486	3.10150161	5.01049457	6.21656333	6.66121648	8.2261522	
53	3.75286849	4.88635514	5.17020057	8.38085502	10.0065676	11.2107438	12.8674772	
63	3.03789004	3.47565589	4.11008547	7.72057416	9.35729847	9.85533333	11.2398058	6.58746348
73	3.66617162	3.70740741	4.43473862	7.70718563	8.1757085	10.221519	12.0852381	
83	8.65496183	9.5081761	13.5803403	23.3506944	26.8392857	29.9647887	30.7068966	
93	8.69927007	10.6485149	15.2509653	25.6641221	26.8086957	29.8051848	51.7647059	
103	9.48591549	11.8247423	17.7653631	31.4270833	28.6489362	36.1666667	36.9347826	
113	8.04137931	10.8	11.7721519	13.751938	14.1530612	12.7628866	13.4533333	
123	3.75531915	3.80714286	2.91411043	2.65605096	2.66666667	3.42056075	2.20149254	

Tabla 3 Reportes de las velocidades de conteo en los diferentes puntos del plano (r,z) para la determinación de la multiplicación diferencial e integral y la reactividad del CS-ISCTN usando la segunda configuración.

Mediciones del 20 de noviembre de 1996								
Reactividad en el CS usando seis fuentes de Pu-Be								
Con seis fuentes y 164 ELCOS								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	555970	390212	299818	219316	155926	104335	73563	
23	309352	197225	159397	133746	99618	68421	49316	
33	160281	99749	85445	74263	59617	41425	30314	
43	84701	52900	45415	40668	33401	23832	17787	725480
53	45649	28386	24365	22565	17946	13148	10018	726018
63	24422	15650	13081	12097	9820	7469	5922	744472
73	12873	8372	7108	6472	5439	4052	3245	725031
83	6589	4321	3639	3434	2985	2166	1756	724655
93	3239	2206	2073	1870	1513	1157	980	
103	1852	1531	1733	1593	1309	1076	915	Promedio
113	1114	1063	1029	905	815	609	494	729131.2
123	296	255	249	245	225	184	135	
				266155	215125	160690	2142737.5	INTEGRAL ERROR(%)
								7.50%
Con seis fuentes sin ELCOS								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	601924	564481	453398	278450	162867	91743	51966	
23	260354	236693	191950	109972	59878	34226	18329	
33	89506	78354	64820	36248	20215	11768	6593	
43	30608	24902	21114	11528	6579	3911	2272	
53	10248	8446	7185	3888	2138	1305	785	
63	3764	3113	2645	1444	771	522	298	
73	1680	1275	1049	543	302	190	133	
83	751	540	445	234	141	65	51	
93	430	313	242	119	61	40	25	
103	216	191	145	67	38	25	16	Promedio
113	131	110	71	48	35	17	17	#1DIV/0!
123	59	50	41	47	28	23	21	
				36595	19910	12695	222775	INTEGRAL ERROR(%)
								5.70%
164 ELCOS sin fuente								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	102	79	79	94	58	58	42	
23	152	113	104	102	76	57	48	
33	169	103	112	81	87	72	57	
43	180	139	111	88	100	59	43	
53	196	121	105	111	95	66	55	
63	190	125	112	95	86	64	52	
73	155	119	102	99	84	55	59	
83	144	88	96	86	86	65	48	
93	95	74	69	63	57	45	40	Promedio
103	72	72	74	72	57	35	42	#1DIV/0!
113	62	54	45	33	45	31	28	
123	14	17	23	19	21	23	14	
				2000	1755	1245	16887.5	INTEGRAL ERROR(%)
								7.37%
MULTIPLICACION CON UNA SOLA FUENTE DE Pu-Be (medición del 20 de noviembre de 1996)								
Z/R	1 (0 cm)	2 (5 cm)	3 (10 cm)	4 (15 cm)	5 (20 cm)	6 (25 cm)	7 (30 cm)	Pos. Irrad.
13	0.92348536	0.69113575	0.66109467	0.78729395	0.95702629	1.13662078	1.41479044	
23	1.18761379	0.83277494	0.82986715	1.21525479	1.66241357	1.99742886	2.54891614	
33	1.78884097	1.27174107	1.31646097	2.04651291	2.94484294	3.51402107	4.58926134	
43	2.76140225	2.11874548	2.14568533	3.52012491	5.06171151	6.07849655	7.80985915	
53	4.43530445	3.34655458	3.37647878	5.77520576	8.34939196	10.0245211	12.6917197	
63	6.43783209	4.98715066	4.90699433	8.31163435	12.6251621	14.1858238	19.6979866	#1DIV/0!
73	7.5702381	6.47284118	6.67874166	11.7366483	17.7317881	21.0368421	23.9548872	
83	8.58189081	7.83888889	7.96179775	14.3076923	20.5602837	32.3230769	33.4901961	
93	7.31162791	6.8115016	8.28099174	15.1848739	23.8688525	27.8	37.6	
103	8.24074074	7.63874346	11.4413793	22.7014925	32.9473684	41.64	54.5625	
113	8.03053435	9.17272727	13.8591549	18.1666667	22	34	27.4117647	
123	4.77966102	4.76	5.51219512	4.80851064	7.28571429	7	5.76190476	



**CIE**

**CENTRO DE INFORMACION  
DE LA ENERGIA NUCLEAR**

Calle 20 No. 4113 e/ 18A y 47, Playa

Telf.: 22-7527. Fax: 331188.

E mail: cien @ceniai cu