

ESTIMACIÓN DE TASA DE EXPOSICIÓN GAMMA EN INSTALACIONES DE IRRADIACIÓN DE REACTORES NUCLEARES EXPERIMENTALES

Daoud A. daoud@cnea.gov.ar

Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson
Comisión Nacional de Energía Atómica – UNSAM

Abstract:

GAMMA EXPOSURE RATE ESTIMATION IN IRRADIATION FACILITIES OF NUCLEAR RESEARCH REACTORS.

There are experimental situations in the nuclear field, in which dose estimations due to energy-dependent radiation fields are required.

Nuclear research reactors provide such fields under normal operation or due to radioactive disintegration of fission products and structural materials activation.

In such situations, it is necessary to know the exposure rate of gamma radiation the different materials under experimentation are subject to. Detectors of delayed reading are usually used for this purpose.

Direct evaluation methods using portable monitors are not always possible, because in some facilities the entrance with such devices is often impracticable and also unsafe. Besides, these devices only provide information of the place where the measurement was performed, but not of temporal and spatial fluctuations the radiation fields could have.

In this work a direct evaluation method was developed for the “in-situ” gamma exposure rate for the irradiation facilities of the RA-1 reactor. This method is also applicable in any similar installation, and may be complemented by delayed evaluations without problem.

On the other hand, it is well known that the residual effect of radiation modifies some properties of the organic materials used in reactors, such as density, colour, viscosity, oxidation level, among others. In such cases, a correct dosimetric evaluation enables in service estimation of material duration with preserved properties.

This evaluation is for instance useful when applied to lubricating oils for the primary circuit pumps in nuclear power plants, thus minimizing waste generation.

In this work the necessary elements required to estimate in-situ time and space integrated dose are also established for a gamma irradiated sample in an irradiation channel of a nuclear facility with zero neutron flux.

1 Objetivo

- 1.1** Ajustar las leyes de decaimiento temporal y espacial de la intensidad del campo de radiación gamma remanente en el eje longitudinal de un canal de irradiación.
- 1.2** Ensayar distintos métodos de ajuste de curvas y comparar resultados entre los mismos.

2 Alcance

Proporcionar un método de caracterización de la distribución del campo de radiación gamma, a lo largo del eje longitudinal de la instalación de Columna Rápida del reactor RA-1 para su adecuado aprovechamiento por parte de los experimentadores, y usuarios en general, del mismo.

3 Descripción

Dada la necesidad de caracterizar el campo de radiación gamma en ausencia de flujo neutrónico en la instalación de "Columna Rápida" del RA-1, con el fin de proporcionar a los usuarios de la misma la distribución de la intensidad de la radiación a lo largo de su recorrido desde la pared externa del reactor y hasta una distancia de 60 o más centímetros, se ha implementado un procedimiento de evaluación de la exposición o dosis absorbida en aire "in situ".

Este procedimiento se implementa con la ayuda de una cámara de ionización de la cual se conoce su sensibilidad media en unidades de corriente eléctrica por unidad de tasa de exposición, un electrómetro con calibración certificada, una fuente estabilizada de alta tensión, y dispositivos de evaluación dosimétrica diferida termoluminiscentes (TLD's) para contrastación de los resultados.

El aspecto operativo se reduce a la determinación de las corrientes registradas por la cámara de ionización a lo largo del canal de irradiación a intervalos regulares de distancia para poder caracterizar el decaimiento espacial, repitiendo las medidas en no menos de tres series que permitan estimar el decaimiento temporal. Estas mediciones se realizan previamente a la colocación de las muestras que el usuario desea exponer a radiación gamma.

Así los valores registrados se procesan por medio de adecuadas rutinas desarrolladas en software, el cual puede evaluar distintos modos de interpolación espacial y temporal que mejor se ajusten a la distribución del campo gamma a lo largo del canal de irradiación.

Posteriormente a la elección del método de interpolación, es posible establecer la exposición o dosis absorbida en aire a la que se someterá la muestra según la posición elegida dentro de la instalación, el largo de la misma, y el tiempo necesario para alcanzar la dosis requerida por el usuario.

Para poder contrastar el método, se procedió con la ayuda de TLD's a realizar las primeras mediciones, ubicando a estos dispositivos en posiciones prefijadas.

Se registraron los valores de corriente de cámara en esas posiciones, y una vez determinado el método de interpolación, se estimó por este procedimiento la dosis absorbida en aire, arrojando valores que se encontraban dentro del intervalo de incertidumbre de los TLD's utilizados.

4 Procedimiento

Al exponer un detector gaseoso a los efectos de las radiaciones ionizantes provenientes de fuentes patrones de actividad gamma es posible calibrarlos para obtener la exposición de fuentes desconocidas. Puede establecerse experimentalmente, que para un amplio rango de energías, existe una relación de proporcionalidad directa entre la corriente "I" que registra la cámara de ionización del detector y la tasa de exposición gamma " \dot{X} " a la que el mismo se expone./3/

$$I[\text{Ampéres}] = \epsilon \cdot \dot{X}[R/h] \quad (1)$$

Donde el factor de equivalencia “ε” constituye la llamada sensibilidad del detector, siendo la unidad correspondiente la de corriente por unidad de tasa de dosis [Ampere/(R/h)].

La tasa de exposición, o la exposición por unidad de tiempo a una distancia “r” en metros, de una fuente puntual de radiación se puede expresar como:

$$\dot{X} = \frac{A.k_0}{4\pi.r^2} \sum_E E.\xi_E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{(E,aire)} \quad (2)$$

siendo “A” la actividad en Curies, “k₀” una constante de proporcionalidad dimensional, “E” la energía de emisión en Mev, ξ la eficiencia de dicha emisión correspondiente al radionucleido involucrado, y “μ_{en}/ρ” el coeficiente másico energético en m²/Kg. /4./

El coeficiente másico energético, indica qué porción de los electrones liberados por interacción de los fotones en el medio, ceden exclusivamente su energía en forma de energía cinética en dicho medio, esto es, excluye aquella fracción de energía que se emite en forma electromagnética por frenado de la partícula cargada al acercarse a los núcleos atómicos/11/

Es importante explicitar como se relaciona la exposición con la dosis absorbida.

Para poder producir un par iónico en aire, es necesario impartir en éste una energía W = 33,97 e.v. siendo la carga de un electrón q = 1,609 10⁻¹⁹ Coulombs, entonces por cada electrón liberado, se habrá impartido una energía igual a “W”.

Entonces denominando a toda la carga generada en el volumen de aire “dQ”, resultará el número de partículas liberadas igual a la carga total dividido el valor de carga correspondiente a dichas partículas. Siendo estas electrones, resulta que “N = dQ/q”, es el número de electrones liberados.

Además, considerando que ha sido necesario impartir una energía igual a W para liberar cada electrón, resultará la energía total impartida,

$$dE_{imp} = W.N, \text{ o bien } dE_{imp} = W.dQ/q$$

dividiendo ambos miembros de la última expresión por unidad de masa, resulta

$$dE_{imp}/dm = dQ/dm . W/q,$$

siendo la dosis igual a la energía impartida por unidad de masa, resulta

$$D = X.W/q$$

reemplazando los valores de W y q, y recordando que 1 e.v. equivale a 1,609 10⁻¹⁹ Julios resulta:

D[Gy] = X[R]. 33,97[ev] 1,609 10⁻¹⁹ [J/ev]. 2.58 10⁻⁴[C/(Kg.R)] / (1,609 10⁻¹⁹ [C]). con lo cual la dosis absorbida en aire se relaciona con la exposición del siguiente modo:

$$D[Gy] = 8.76 \cdot 10^{-3} [Gy / R]. X[R] ,$$

respectivamente la exposición con la dosis absorbida en aire,

$$X[R] = 114 [R / Gy]. D[Gy]$$

de igual manera la tasa de dosis absorbida en aire y la tasa de exposición;

$$\dot{D}[Gy / h] = 8.76 \cdot 10^{-3} [Gy / R]. \dot{X}[R / h]$$

Haciendo consideraciones análogas, puede establecerse la constante de proporcionalidad dimensional “k₀” para actividad en Bequerelios,

$$\dot{X}[R/h] = \frac{A[Bq]}{4\pi.r^2[m^2]} \sum_E E[Mev] \xi_E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_E \left[\frac{m^2}{Kg}\right] \cdot 1,609 \cdot 10^{-13} \left[\frac{J}{Mev}\right] \cdot \left[\frac{1}{Bq.seg}\right] \cdot 3600 \left[\frac{seg}{h}\right] \cdot 114 \left[\frac{R}{(J/Kg)}\right]$$

O bien para el caso de considerar la actividad en Curies,

$$X[R/h] = \frac{A[Ci]}{4\pi r^2 [m^2]} \sum_E E[Mev] \xi_E \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_E \left[\frac{m^2}{Kg}\right] \cdot 1,609 \cdot 10^{-13} \left[\frac{J}{Mev}\right] \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \left[\frac{1}{Ci \cdot seg}\right] \cdot 3600 \left[\frac{seg}{h}\right] \cdot 1,14 \left[\frac{R}{(J/Kg)}\right]$$

Con lo cual “k₀” se constituye como resultado de factores de proporcionalidad entre unidades.

Para el caso de actividades registradas en Bequerelios

$$k_0 = 1,609 \cdot 10^{-13} \left[\frac{J}{Mev}\right] \cdot 1 \left[\frac{1}{Bq \cdot seg}\right] \cdot 3600 \left[\frac{seg}{h}\right] \cdot 1,14 \left[\frac{R}{(J/Kg)}\right]$$

$$\text{Así } k_0 = 6,6135 \cdot 10^{-8} \left[\frac{R \cdot Kg}{h \cdot Mev \cdot Bq}\right]$$

Para el caso de actividades registradas en Curies

$$k_0 = 1,609 \cdot 10^{-13} \left[\frac{J}{Mev}\right] \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \left[\frac{1}{Ci \cdot seg}\right] \cdot 3600 \left[\frac{seg}{h}\right] \cdot 1,14 \left[\frac{R}{(J/Kg)}\right]$$

$$\text{Así } k_0 = 2,447 \cdot 10^3 \left[\frac{R \cdot Kg}{h \cdot Mev \cdot Ci}\right]$$

4.1 Desarrollo del método propuesto.

Éste trabajo se desarrolló con una metodología básicamente cuantitativa, limitándose los aspectos cualitativos a la explicación de los fenómenos a medida que estos se fueron presentando.

La implementación de este método exige las mismas condiciones iniciales que los métodos de evaluación diferida:

1. Campos de radiación en las áreas de trabajo acordes a las normas de protección radiológicas vigentes para el personal que trabaja en las mismas.
2. Tiempo de extinción del reactor adecuado para evitar exposiciones innecesarias, minimizando la dosis equivalente del personal involucrado.

La primera, de carácter normativo, orientada a disminuir riesgos potenciales de exposición a las radiaciones ionizantes del trabajador, establecidos por la Autoridad Regulatoria Nuclear de la República Argentina, en la Norma AR 10.1.1 Revisión 3 “Normas Básicas de Seguridad Radiológica”, en párrafo 97 en el que se establecen los límites y restricciones de dosis./12./

La segunda, de orden operativo, garantiza el decaimiento de los productos de fisión y de los de activación del material estructural del reactor, de vidas medias cortas (menores a 6 horas) que pudieran perturbar significativamente a la constante de decaimiento del conjunto buscada. /1./2./

Garantizadas éstas condiciones, se colocó una cámara de ionización con sensibilidad a la radiación gamma conocida, en el canal de irradiación y en distintas posiciones a lo largo del mismo, registrándose respectivamente la corriente en cada una de éstas posiciones. Así se evaluó la atenuación espacial de la radiación. /1./3./4./, mientras que las sucesivas lecturas a lo largo del tiempo, permitieron evaluar el decaimiento temporal para cada posición.

4.2 Lugar de trabajo

“Columna Rápida” del reactor RA-1, (figura 1a, se aprecia la posición relativa de la instalación respecto al núcleo del reactor).

En la figura 1b. se detalla la “Columna Rápida”, y la disposición del detector de radiación gamma.

Esta instalación consiste en una perforación en el blindaje del reactor de cerca de 15 cm de diámetro, la cual lo atraviesa en su totalidad, llegando hasta la parte exterior del recipiente mismo del reactor (aproximadamente 170cm. de profundidad), y a la altura media del núcleo. En particular esta instalación es apropiada para trabajar con espectros polienergéticos de neutrones que van desde los 0.025e.v. y hasta los 15 Me.v., cuando el reactor se encuentra en estado de “Marcha”.

Cuando el estado es el de “Mantenimiento”, no se producen fisiones más allá de las espontáneas y despreciables en cantidad frente a los flujos que se obtienen durante la operación de “Marcha”. En este estado, en la instalación perdura un fondo de radiación beta y gamma, proveniente de isótopos de elementos de fisión del combustible y de los de activación de los materiales estructurales del reactor.

4.3 Preparación de dispositivos de medición

En lo referente a este trabajo, se centralizó la atención en la radiación gamma, no siendo de menor importancia realizar una tarea semejante para las radiaciones beta si fuera necesario para considerar el aporte dosimétrico de éstas.

Para las mediciones indirectas diferidas, se procedió a disponer a lo largo de un tubo de P.V.C. de 4 cm. de diámetro, en su parte exterior, los porta detectores TLD cada 10 cm. (Figura 2a, 2b y 2c.).

Estos porta TLD's consisten en recipientes plásticos rectangulares de 5cm por 2cm, que poseen 3 cavidades donde se alojan los detectores en pequeños receptáculos individuales, (Figura 3).

Los porta TLD's, fueron dispuestos regularmente cada 10 cm (figuras 2a y 2b) coincidiendo un extremo con los niveles 0cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm y 60cm y el otro, respectivamente con 5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm, 55cm y 65cm. Siendo la cantidad de TLD's en cada porta TLD de 3 cristales, por consiguiente se obtuvieron 21 lecturas indirectas de dosis integrada a lo largo de los 65 cm que estos ocuparon, durante el tiempo que permanecieron expuestos a la radiación.

Para la medición con cámara de ionización se introdujo otro tubo en la instalación de modo que la cámara pueda deslizarse según una varilla reglada y poder posicionar el extremo del detector gaseoso a las distancias correspondientes en donde se encontraba el extremo de cada porta TLD's.

Se debe aclarar que ha de entenderse por distancia 0 cm. a aquella posición más próxima al recipiente del reactor a la que se puede acceder para realizar cualquier tipo de experiencia.

Esto no significa que necesariamente corresponde a una posición de contacto con dicho recipiente, dado que por razones de seguridad, todo dispositivo que se coloque en esta facilidad de irradiación, se lo hará colocando previamente un porta muestra de aluminio, que consiste en un caño de 12,5 cm de diámetro y de largo igual al espesor de blindaje del reactor, pero en el extremo que se introduce hasta el recipiente del reactor, posee un tope que no permite que las muestras puedan llegar a tocarlo produciendo accidentalmente una perforación del mismo.

En las figuras 4 y 5 se observan la lanza que contiene el detector gaseoso, la cual se introduce en el tubo que posee en su parte exterior los dosímetros TLD.

El tubo que soporta los TLD's y que contiene al detector, se lo envuelve en una bolsa plástica, para evitar posible contaminación al introducirlo en el caño de aluminio de 12,5 cm que posteriormente se aloja en el canal de irradiación.

4.4 Registro de datos y desarrollo de la experiencia

Se tomaron dos series de lecturas en el transcurso del día en que estuvo introducida la configuración de TLD's, numeradas de 1 a 7. No fueron necesarias más, dado que no se registró una atenuación temporal significativa, debido a que el reactor no había funcionado por varios días. Estas se realizaron con una cámara de ionización desarrollada en CNEA y que fuera utilizada para monitorear las corrientes debidas al campo gamma que perturban las lecturas de corrientes correspondientes a neutrones térmicos utilizados en la irradiación de muestras en las experiencias que se desarrollaron para la "Terapia por Captura Neutrónica en Boro- BNCT" en el RA-1, para el tratamiento de determinados tipos de cánceres.

Esta cámara, se conectó a un electrómetro marca Keithley Instrument modelo 610 C, y se energizó con una fuente de alta tensión genérica de corriente continua a una tensión de plateau de 500 volts.

Los promedios de corrientes registradas y sus respectivos errores se volcaron en una plantilla, como muestra la tabla 1.

Los datos de corriente obtenidos con el electrómetro y volcados en la tabla 1 indican, por columna, la atenuación espacial a medida que nos alejamos de la fuente más intensa de radiación, esto es, el núcleo del reactor; mientras que por fila, indican la atenuación temporal por decaimiento radiactivo, con su respectivo error absoluto y porcentual.

La estimación de error, surge de la estadística al tomar en cada posición hasta 11 valores, y del error de apreciación del instrumento.

Es así que pueden establecerse las curvas de atenuación y decaimiento, y buscar independientemente para cada caso las funciones continuas más representativas de cada una de ellas para poder establecer así un método de integración numérica en tiempo y espacio, que permita hallar la dosis integrada en los intervalos de tiempo y espacio requeridos.

Las leyes de decaimiento espacial y temporal están ya bien establecidas por medio de expresiones exponenciales para los casos en que las fuentes emisoras pueden considerarse puntuales y los efectos de reflexión por cercanía de otros medios son inexistentes.

En este caso, esto no es aplicable a priori dada la condición de "fuente emisora extendida", dado que la radiación procede desde distintos puntos, y además se desarrolla a lo largo de un túnel de aire cuyas paredes están constituidas por materiales sobre los que la radiación interactúa en formas diversas, provocando efectos reflectivos.

Por tal motivo se ensayaron métodos de interpolación polinómicas para comparar resultados con el método de interpolación exponencial.

Así se elaboraron rutinas de interpolación polinómica por el método de Lagrange, y por simple cálculo matricial, buscando los coeficientes de un polinomio de grado igual al número de pares de datos menos uno.

Aplicando el método de Lagrange, por medio de la rutina desarrollada "lagrange(X,C(:,1))" /13./, se pasan los valores del vector de posiciones "X", y de alguna de las i-es columnas de corrientes "C(:,i)", traspuesta. El problema de este método radica en la generación punto a punto, de un conjunto de coeficientes del polinomio correspondiente, haciendo el procedimiento de integración muy engorroso. (fig. 9)

Se desarrolló un método de interpolación polinómica, asumiendo en el intervalo establecido por los valores máximo y mínimo del vector "X" un polinomio de grado igual al número de datos menos uno.

La rutina se desarrolla por cálculo matricial.

[A] = poli(X,C(:,1),xv) /13./

Devuelve el conjunto de los coeficientes del polinomio en el vector "A" (3) xv, es un valor particular cualquiera de distancia, entre el máximo y el mínimo. (Fig. 10)

Para el conjunto de valores de la tabla 1 resulta

$$A = [2.8 \cdot 10^{-10} \quad 3.3 \cdot 10^{-12} \quad -2.8607 \cdot 10^{-12} \quad 1.8132 \cdot 10^{-13} \quad -4.9217 \cdot 10^{-15} \quad 6.2792 \cdot 10^{-17} \quad -3.0833 \cdot 10^{-19}] \quad (3)$$

Así el valor de corriente para la posición "x" será:

$$C_x = 28.10^{-10} \text{ Amp/cm} + 3.3 \cdot 10^{-12} \text{ Amp/cm}^2 * x - 2.8610^{-12} \text{ Amp/cm}^3 * x^2 + 1.8110^{-13} \text{ Amp/cm}^4 * x^3 + \dots - 3.0810^{-19} \text{ Amp/cm}^7 * x^6$$

$$[C_x] = \text{Amp/cm}$$

El valor de tasa de dosis correspondiente resultará:

$\dot{D}_x = C_x / \text{eff} [R/(h.cm)]$, con $\text{eff} = 1.86 \cdot 10^{-12} \text{ Amp/(R/h)}$ para el detector utilizado, (sensibilidad del detector).

De manera similar, se realizó una rutina para evaluar los coeficientes correspondientes a un decaimiento exponencial.

Esta rutina devuelve los valores correspondientes al término independiente, coeficiente de atenuación y error porcentual del método, al ingresarle los valores de distancia "X", de corrientes "C(:,i)", y el error de estadística "BERR". El coeficiente "ver" se utiliza para visualizar la gráfica logarítmica. (Fig. 11)

[A0,mu,Eporc]=exponenB(X,C(:,i),BERR,ver) /13./

A0, corresponde al término independiente.

mu, corresponde al coeficiente de atenuación lineal, como es en este caso, o temporal, dado que la rutina permite evaluar a cualquiera de ellos según se busque uno u otro.

En Eporc se almacena el valor de error porcentual del método.

La variable "i", indica la columna a ser tratada.

La expresión exponencial será:

$$y_x = 3.244 \cdot 10^{-10} * \exp(-9.713 \cdot 10^{-2} * x) [\text{Amp/cm}] \quad (4)$$

Para poder decidir cuál método será el más conveniente, se compararon resultados de integración entre estos métodos de interpolación. Para ello se desarrolló una rutina que contempla estos tres métodos de interpolación e integra por el método de los trapecios para el caso de obtener datos punto a punto (polinomio de Lagrange), o por integración definida por regla de Barrow cuando puede establecerse una función continua (exponencial o polinomio).

Para estos dos últimos casos tendremos que las corrientes integradas en el intervalo de espacios x_1 y x_2 son:

$$\bar{C}_{x_1}^{x_2} = \int_{x_1}^{x_2} C_x dx \quad [\text{Amp}] \quad (5), \text{ para el caso del modelo polinómico, y}$$

$$\bar{y}_{x_1}^{x_2} = \int_{x_1}^{x_2} y_x dx; \text{ entonces } \bar{y}_{x_1}^{x_2} = \left. \frac{A0 \cdot e^{-\mu x}}{\mu} \right|_{x_1}^{x_2} \quad [\text{Amp}] \quad (6), \text{ para el caso del modelo}$$

exponencial.

Obteniéndose así la tasa de dosis media entre x_1 y x_2 al dividir el valor de corriente media así calculado por el valor de sensibilidad del detector.

A tal efecto se desarrollo la rutina “informe(X,Y,eff,Xinf,Xsup,tiempo)” /13./
 X, valores de espacio o tiempo según corresponda
 Y, valores de corrientes
 eff, eficiencia del detector
 Xinf, valor mínimo
 Xsup, valor máximo
 tiempo, tiempo de integración.

Utilizando un tiempo de 1 h, se obtuvo, informe(X,C(:,1),eff,0,60,1), generándose el siguiente informe.

Resultados por interpolación polinómica con calculo matricial, integración por Barrow

la exposición integrada en el intervalo y tiempo solicitados es: $2,038 \cdot 10^3$ R

 Resultados de la interpolación exponencial, integración por Barrow

el índice de correlación es de $9,972 \cdot 10^{-1}$
 el error porcentual medio es de: 9,308 %
 Los coeficientes de la recta de regresión son
 pendiente $m = -9,7126 \cdot 10^{-2}$
 ordenada $b = -2,1849 \cdot 10^1$

Siendo $e^{-21,849} = 3,244 \cdot 10^{-10}$
 la expresión exponencial será: $y = 3,244 \cdot 10^{-10} * \exp(-9,713 \cdot 10^{-2} * x)$ Amp/cm
 la tasa de exposición integrada en el intervalo de espacio es: $1,790 \cdot 10^3$ R/h
 la integrada en el tiempo solicitado es: $1,790 \cdot 10^3$ R

 Resultados de la interpolación exponencial e integración por suma de rectángulos

el índice de correlación es de $9,972 \cdot 10^{-1}$
 el error porcentual medio es de: 9,308 %

Los coeficientes de la recta de regresión son
pendiente $m = -9,7126 \cdot 10^{-2}$
ordenada $b = -2,1849 \cdot 10^1$

la expresión exponencial será: $y = 3,244 \cdot 10^{-10} * \exp(-9,713 \cdot 10^{-2} * x)$
la tasa de exposición integrada en el intervalo de espacio es: $1,790 \cdot 10^3$ R/h
la integrada en el tiempo solicitado es: $1,790 \cdot 10^3$ R

Resultados de la interpolación por Lagrange e integración por suma de rectángulos
la exposición integrada en el intervalo y tiempo indicados es: $2,113 \cdot 10^3$ R

FIN DEL INFORME

Los valores de exposición y dosis obtenidos durante una hora, pueden observarse en la tabla 2.

Los valores correspondientes a los errores, que se indican en la tabla, se obtienen reemplazando en la rutina "informe", el vector "Y", por el correspondiente a los errores de estadística "BERR".

Los métodos polinómicos se ajustan muy bien entre el segundo valor registrado y el anteúltimo, pero poseen error considerable en los intervalos correspondientes entre el primer y segundo valor, y entre el anteúltimo y último. (figuras 9 y 10)

Teniendo en cuenta este aspecto particular de las interpolaciones polinómicas, se compararon las integraciones de los tres métodos en intervalos que excluyen a los extremos. Para ello se corrió la rutina de informe para distintos intervalos de integración obteniéndose los resultados que se detallan en la tabla 3.

Puede observarse que los tres métodos ajustan bien entre 20 y 50 cm, pero al considerar el extremo ubicado a 10 cm la discrepancia aún persiste.

Si se integra en el intervalo 15-50 cm, los resultados se detallan en la tabla 4.

De este último resultado y los obtenidos a partir del intervalo 20-50 cm (tabla 3), se observa que la función mayorante entre 15 cm y 50 cm es la función exponencial.

Por tanto:

1. dado que las interpolaciones polinómicas, por su naturaleza introducen un error considerable en los entornos de los extremos, y
2. evaluando que en el resto del recorrido las mismas coinciden favorablemente con la interpolación exponencial, y
3. siendo ésta ligeramente mayorante a las otras dos,

se estarían evaluando los resultados en forma conservativa desde la perspectiva dosimétrica.

Por todo esto se concluye que la ley de atenuación que mejor describe al fenómeno, bajo las condiciones de reflexión descriptas, es la ley exponencial que es la ley natural del decaimiento.

$$y_x = 3.244 \cdot 10^{-10} * \exp(-9.713 \cdot 10^{-2} * x) \text{ [Amp/cm]}$$

Posteriormente la comparación con los resultados obtenidos por el método diferido, reafirmó esta decisión.

Se realizó otra serie de registros de corrientes (tabla 5), posterior al decaimiento de 43hs de los productos de fisión y activación de los elementos estructurales debidos a una irradiación de 4 hs a 40 KW.

Nuevamente utilizando la rutina “exponenB”,
 $[A0, \mu, Eporc] = \text{exponenB}(X, C(:, 1), BERR, 1)$, se obtiene
 $A0 = 7.8545 \cdot 10^{-10} [\text{Amp/cm}]$.
 $\mu = -9.50 \cdot 10^{-2} [1/\text{cm}]$.
 $Eporc = 9.5091\%$ (figura 12)

La expresión exponencial será:

$$y_x = 7.855 \cdot 10^{-10} * \exp(-9.500 \cdot 10^{-2} * x) [\text{Amp/cm}]$$

Con un error porcentual de 9,5% (7)

Puede establecerse la atenuación temporal con una rutina similar a “exponenB”, la cual realiza la misma tarea que esta última, excluyendo el vector de errores “BERR”. Esta rutina se la ha llamado “exponen” y se estructura en forma similar a la ya utilizada.

$[A0, \mu, Eporc] = \text{exponen}(X, C(:, 1), 1) ./ 13 ./$

Reemplazando el vector de distancia “X” por el de tiempos “T”, y considerando una fila determinada para alguna de las posiciones, por ejemplo para $X=0\text{cm}$ (1era. fila de la matriz de datos) (fig. 13)

$[A0, \mu, Eporc] = \text{exponen}(T, C(1, :), 1)$

$A0 = 8.3809 \cdot 10^{-10} [\text{Amp/cm}]$, para el nivel “0 cm”

$\lambda = -2.16 \cdot 10^{-2} [1/\text{h}]$.

$Eporc = 0.2710\%$

Así la expresión exponencial resultó ser:

$$y_t = 8.381 \cdot 10^{-10} * \exp(-2.163 \cdot 10^{-2} * t) [\text{Amp/cm}]$$

Con un error porcentual de 0,3% (8)

Posteriormente a la toma de datos, los porta TLD’s se enviaron al Laboratorio de Dosimetría Externa de la Gerencia de Seguridad Radiológica y Nuclear de la CNEA para su evaluación.

Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 6.

El valor del segundo TLD del porta-TLD’s número 10 no pudo ser registrado debido a la interrupción del suministro de energía eléctrica durante el proceso de lectura, perdiéndose la información.

Con ayuda de la rutina “exponen”, cargando los datos de lectura de los TLD’s correspondientes a los porta-TLD’s numerados del 8 al 14 (fig. 14), se obtiene la función de ajuste exponencial (9):

$$y_x = 1.903 \cdot 10^1 * \exp(-8.806 \cdot 10^{-2} * x) [\text{Gy/cm}] \quad (9)$$

Integrando esta función desde 1 cm y hasta 64 cm con la rutina “integraldef” se obtiene la dosis acumulada durante 6 hs en dicho intervalo de longitud.

Esta función permite integrar en tiempo de exposición y en un intervalo definido de distancia “ $x_{sup}-x_{inf}$ ”, pasando los valores medidos en los vectores “X” y “C” se calculan los valores de los coeficientes “A0” ahora en dosis por unidad de longitud y el de atenuación lineal “mu” de la función exponencial de ajuste $y = A0 * \exp(\mu * x)$.

$\text{integraldef}(X, C, \text{eff}, x_{inf}, x_{sup}, \text{tiempo})$

eff= eficiencia del detector

tiempo= tiempo de exposición

Para este caso, donde solo se integrará la función de ajuste de los valores de dosis, se toma a $eff=1$, y dado que los valores registrados de dosis, están integrados al tiempo en que permanecieron en el canal de irradiación, se toma a la variable “tiempo” igual a 1. “Integraldef” se desarrollo bajo el principio de integración definida, aplicando la regla de Barrow.

Así la dosis integrada en el intervalo de espacio resulta ser, $1.972 \cdot 10^2 \text{Gy}$

Realizando los cálculos de dosis integradas en 6 horas y desde 1cm y hasta 64 cm, considerando los valores registrados de corriente, correspondientes a las mediciones realizadas cuando se hallaban colocados los pota-TLD's números 8 al 14, se podrá comparar la efectividad del método.

Para ello se utilizó la rutina de cálculo “calculo”, la cual utiliza las subrutinas “dosis” y “atenuaespaciotiempo2” /13./

$[A, \mu, \text{mul}, \text{mulmed}] = \text{atenuaespaciotiempo2}(X, T, C, \text{eff});$

Ingresando los valores de distancia ”X”, tiempos “T”, lecturas de corrientes “C”, y eficiencia del detector “eff”, retorna el valor del coeficiente independiente ”A” en [Amp/cm], la atenuación temporal “mu” que representa el valor medio de la constante de desintegración radiactiva λ en [1/h], la atenuación lineal “mul” en [1/cm], y la media de todos los coeficientes de atenuación lineal generados al considerar todas las series de valores de corrientes “mulmed” en [1/cm].

$[DR] = \text{dosis}(X, T, C, \text{eff}, \text{tmi}, \text{tmf}, \text{pos1}, \text{pos2})$

Esta rutina devuelve los valores de dosis calculados en Gray y en Roentgen, hallados por integración definida, utilizando los parámetros de salida de “atenuaespaciotiempo2”.

X, T, C, eff, los valores ya comentados

tmi= tiempo transcurrido entre la primer medición con el detector y la colocación de la muestra en horas.

tmf= tiempo transcurrido desde la primer medición con el detector y la extracción de la muestra en horas.

pos1= la distancia entre la pared externa del reactor y el extremo más cercano a este de la muestra en cm.

pos2= la distancia entre la pared externa del reactor y el extremo más lejano a este de la muestra en cm.

El cálculo que resuelve es el siguiente.

$$D = \iint_{x,t} \frac{A0}{eff} \cdot e^{-(\mu x + \lambda t)} \delta x \delta t \quad (10a);$$

con lo cual,

$$D = \frac{A0 \cdot e^{-(\mu x)} \Big|_{x1}^{x2} \cdot e^{-(\lambda t)} \Big|_{t1}^{t2}}{\mu \cdot \lambda \cdot eff} \cdot 8.76 \cdot 10^{-3} [\text{Gy}], \quad (10b)$$

La exposición integrada es $2.394 \cdot 10^4 \text{R}$

desde 1 cm hasta 64 cm en el intervalo de tiempo 6.02 hs.

La dosis integrada es $2.10 \cdot 10^2 \text{Gy}$

La diferencia absoluta entre la dosis medida con TLD's (197,2 Gy), y la calculada (210 Gy), es de 12,8 Gy, esto es menor al 7% respecto de los valores registrados con TLD's.

Considerando que los métodos de lectura de TLD's no garantizan un error menor al 10%, la evaluación de dosis por calculo aquí desarrollada está dentro de este margen de error.

Repitiendo la operación para los porta-TLD's numerados del 1 al 7, y considerando los respectivos valores de corrientes registrados en esa instancia, se obtiene.

Para los valores registrados por los TLD's durante 2hs 3min:
la expresión exponencial será: $y = 2.130 * \exp(-8.284 10^{-2} * x)$ [Gy/cm]
la dosis integrada en el intervalo de espacio es: $2.354 10^1$ [Gy]
Integrando los valores según las mediciones de corrientes:
La exposición integrada es $2.881 10^3$ R
desde 1 cm hasta 64 cm en el intervalo de tiempo 2.05 hs.
La dosis integrada es $2.527 10^1$ Gy.

El error cometido al considerar la integración de corrientes (25.27 Gy), respecto de la integración de medidas registradas por los TLD's (23,56 Gy), es de 7,4%, nuevamente menor al error de lectura de los TLD's.

Los valores registrados correspondientes a esta serie se muestran graficados en la figura 15, en la misma puede observarse que la ley exponencial se ajusta convenientemente.

La evaluación efectuada con los datos diferidos aplicando la interpolación exponencial ajustan satisfactoriamente, lo cual indica que la elección de trabajar con este método de ajuste es apropiado, no siendo necesario recurrir a los tipo de interpolación polinómica ensayados.

5 Discusión

La actividad gamma que se registra en el canal de irradiación "Columna Rápida", cuando el reactor se encuentra en el estado de "Mantenimiento", esto es sin ninguna actividad neutrónica, salvo las debidas a fisiones espontáneas o emisiones por desintegración radiactiva, es el resultado de los productos de fisión del combustible y activación de los componentes estructurales del mismo, que en el proceso de decaimiento radiactivo, emiten entre otras formas de desintegración, radiaciones electromagnéticas.

La distribución de los productos de fisión, junto con el historial de potencia y horas de irradiación, son un antecedente para poder evaluar el inventario radiactivo del núcleo, mientras que el conocimiento de la distribución de los distintos elementos estructurales y su pureza, permiten establecer la activación de los mismos, y por ende, y a través de métodos de de cálculo basados en modelos teóricos y contrastados con situaciones reales, se logran evaluar los campos de radiación de distintos tipos. /1./2./

Estos códigos, se pueden adaptar a distintas geometrías y configuraciones de las instalaciones, pero para los casos particulares, como el de la "Columna Rápida", solo pueden hacerse estimaciones no siempre muy adecuadas.

La medición "in situ" de los campos de radiación, resulta ser la única forma de establecer con márgenes de error aceptables, los parámetros necesarios para evaluarlos.

La actividad a lo largo del canal de irradiación, no es solo el resultado de los productos de fisión del combustible y la activación del material estructural del núcleo del reactor, además contribuye la activación de todos los materiales que rodean al canal de irradiación a lo largo del mismo.

Para un análisis a priori que permita establecer una simplificación de esta distribución espacial de múltiples fuentes se supondrá el caso de una fuente puntual despreciando aspectos de retroalimentación por reflexión o aportes de radiación electromagnética por aniquilamiento de antipartículas o frenamiento radiactivo “Bremsstrahlung”, resultando la expresión de actividad: en un tiempo “t” y a la distancia “x”:

$$A_{(t,x)} = \sum_i A_{oi} \cdot e^{-(\lambda_i t + \mu_i x)} ; \quad (11)$$

donde $A_{(t,x)}$ es la actividad total registrada durante un tiempo “t” y a la distancia “x” de la fuente emisora, siendo correspondientemente “ λ ” la constante de desintegración radiactiva y “ μ ” el coeficiente de atenuación lineal.

La sumatoria considera el aporte de actividad debido a todos los elementos “i” activos al momento inicial afectados por sus respectivos factores de atenuación temporal y espacial correspondientes.

Relacionando las expresiones (1) y (2), puede establecerse la proporcionalidad entre la corriente registrada y la actividad,

$$A[Bq] = \frac{I[Amp] \cdot r^2 [m^2]}{\varepsilon[Amp/(R/h)] \cdot k_1[(Rm^2)/(h.Bq)]} \quad (12)$$

siendo “ ε ” la eficiencia del detector, “r” la distancia a la fuente y “ k_1 ” la constante de proporcionalidad entre la tasa de exposición y la actividad de la fuente.

Esta constante es dependiente de la geometría considerada para la fuente radiactiva en estudio, de su espectro energético y sus respectivos coeficientes energético másico.

Para el caso de una fuente puntual tenemos de (2)

$$k_1 = \frac{k_0}{4\pi} \sum_E E \cdot \xi_E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_E$$

por tanto, $k_1 \left[\frac{R \cdot m^2}{h \cdot Bq} \right] = 5,263 \cdot 10^{-9} \left[\frac{R \cdot Kg}{h \cdot Mev \cdot Bq} \right] \cdot \sum_E E \cdot \xi_E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_E \left[\frac{Mev \cdot m^2}{Kg} \right],$

En el caso de tratarse de una fuente puntual correspondiente a un radioisótopo particular, esta constante recibe el nombre de “constante específica gamma” (Γ) del radionucleido involucrado, y represente la tasa de exposición proporcionada por la misma a una distancia de un metro y por unidad de actividad en Bequerelios.

Experimentalmente, se han podido establecer los coeficientes de atenuación espacial y temporal y las respectivas expresiones que permiten evaluar la corriente por unidad de longitud dentro del canal de irradiación. (7) y (8). De estas dos expresiones, podemos considerar que la corriente a tiempo inicial y a distancia 0 cm es la registrada por el detector, próxima en valor a la calculada por los medios de interpolación.

Corriente	Medida a distancia 0 cm (según Tabla 5 y expresión 7)	Calculada a distancia 0 cm (según expresión 8)
A0	$(8,381 \pm 0,34) \cdot 10^{-10}$ Amp/cm	$(7,855 \pm 0,75) 10^{-10}$ Amp/cm

Así la corriente integrada en tiempo y espacio será

$$I[Amp.h] = \iint_{(t,x)} 8,381 \cdot 10^{-10} [Amp/cm] \cdot e^{-(0,02163 \cdot t[1/h] + 0,095 \cdot x[1/cm])} \partial x \partial t$$

(13)

De esta manera se tendrá que la exposición resultante de considerar un determinado intervalo de espacio y en un determinado tiempo:

$$\iint_{(t,x)} \dot{X}[R/h] = \iint_{(t,x)} \frac{8,381 \cdot 10^{-10} [Amp/cm] \cdot e^{-(0,02163 \cdot t[1/h] + 0,095 \cdot x[1/cm])}}{\epsilon[Amp/(R/h)]} \partial x \partial t$$

Por tanto la exposición integrada en el tiempo y en una determinada región del espacio es, $X[R] = \frac{I[Amp.h]}{\epsilon[Amp/(R/h)]}$.

Debe cuestionarse si la expresión (13) tiene sentido para cualquier intervalo de tiempo. Una manera práctica de verificar que esto no es así es considerar valores de tiempo en forma aleatoria y contrastar si el valor de corriente por unidad de longitud obtenido es inferior al que corresponde al fondo registrado en la expresión (4).

Así, por ejemplo, para un tiempo igual a 300 hs. posteriores a las 43 hs. de haberse apagado el reactor, aplicadas en la expresión (8), resulta que el valor de corriente para la posición $x = 0$ cm. será de $1,27 \cdot 10^{-12}$ Amp/cm, mucho menor que el correspondiente al medido en esa posición tras 1340 hs. posteriores a la extinción de las fisiones, que era de $3,24 \cdot 10^{-10}$ Amp/cm, según se calculó en la expresión (4).

Esto muestra que las expresiones (8) y (13) poseen un intervalo de tiempo en el cual pueden aplicarse sin incurrir en error. Es importante entonces determinar dicho intervalo de tiempo, y establecer el procedimiento a seguir, si el mismo se supera, para obtener valores de exposición confiables.

Para ello, a priori, podrían establecerse grupos de radionucleidos en función a sus vidas medias o constantes de desintegración radiactivas. Así una forma podría ser considerar tres grupos, uno el de los elementos de vida media corta, tal que en un tiempo superior a 40 hs., se pueda considerar despreciable su actividad, esto es menor al 1% de la actividad total, otro grupo, el de las vidas medias "medias", donde la actividad registrada entre las 40hs., y hasta 6 días, sea superior al 1% de la actividad total, y por último, los de vida media larga, los cuales por poseer constantes de desintegración radiactivas pequeñas, pueden ser sus actividades consideradas constantes en el tiempo en que se desarrollan las mediciones o se someten las muestras a la acción de las radiaciones.

Por tanto

$$A_{(t,x)} = \sum_i [A_{oi(cortos)} \cdot e^{-(\lambda_{i(cortos)}t + \mu_i x)} + A_{oi(medios)} \cdot e^{-(\lambda_{i(medios)}t + \mu_i x)} + A_{oi(largos)} \cdot e^{-(\lambda_{i(largos)}t + \mu_i x)}]$$

(14)

Como puede verse en las medidas realizadas cuando se colocaron los TLD's numerados de 1 a 7, (tabla 1), en donde el reactor había estado fuera de operación por varias semanas, los dos primeros sumandos dentro de la sumatoria, considerando la subdivisión establecida, se habrían anulado, mientras que el último, no presento variaciones temporales significativas, por tanto, se lo considera constante, es decir, sin decaimiento temporal ($\lambda_i=0$), quedando solo el decaimiento espacial a ser evaluado.

En cambio, para la serie 8 a 14 (tabla 5), donde 43 hs antes de comenzar con la primer toma de datos, el reactor había estado funcionando, solo se podría despreciar el primer sumando de (14), mientras que los valores obtenidos, son una media de los correspondientes a la sumatoria evaluada sobre los otros dos sumandos restantes.

Por tanto, los valores obtenidos para la expresión en este caso, resultan ser una media ponderada entre todas las posibles actividades significativas de todos los radionucleidos involucrados.

Para la propuesta simplificada, considerando una fuente puntual, y relacionando las expresiones (12) en la que se establece la equivalencia entre corriente y actividad radiactiva, y la expresión (14), tenemos que:

$$A_{(t,x)} [Bq] = \frac{8,381.10^{-10} [\text{Amp/cm}] \cdot e^{-(0,02163.t [1/h] + 0,095.x [1/cm])} \cdot r^2 [m^2]}{\epsilon [\text{Amp/(R/h)}] \cdot k_1 [(R \cdot m^2 / (h \cdot Bq))]} =$$

$$= \sum [A_{oi(\text{medios})} \cdot e^{-(\lambda_{i(\text{medios})}t + \mu_i x)} + A_{oi(\text{largos})} \cdot e^{-(\lambda_{i(\text{largos})}t + \mu_i x)}] [Bq] \quad (15)$$

De igual manera, para el caso en que sean también despreciables las actividades de los radionucleidos de vida media "media", y el decaimiento temporal pueda despreciarse, como muestran los registros de la tabla 1 y, según la expresión (4) con coeficiente temporal nulo, se establece sólo la equivalencia entre actividad y corriente para los de vida media larga. Así resulta que:

$$\sum [A_{oi(\text{largos})} \cdot e^{-(\mu_i x)}] \equiv 3,244 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-(0,0971 [1/cm] \cdot x)} [Amp / cm] \quad (16)$$

Comparando las equivalencias (15) y (16) y posicionándonos en un punto particular cualquiera, como por ejemplo en $x = 0$ cm, puede plantearse que:

$$8,381.10^{-10} \cdot e^{-(0,02163 [1/h] \cdot t)} [Amp / cm] = (I \cdot e^{-\lambda_m t} + 3,244.10^{-10}) [Amp / cm] \quad (17)$$

siendo "I" la corriente correspondiente a la actividad media de los radionucleidos de vida media "media", y λ_m la constante de decaimiento media correspondiente.

Para hallar los valores de I y λ_m correspondientes, se consideraron las siguientes condiciones de entorno; en $t = 0$ hs. tendremos en (17)

$$8,381 \cdot 10^{-10} [\text{Amp} / \text{cm}] = (I + 3,244 \cdot 10^{-10}) [\text{Amp} / \text{cm}],$$

Por tanto $I = 5,137 \cdot 10^{-10} [\text{Amp/cm}]$ (18),

Se debe tener en cuenta que a partir de un cierto valor de t , al que llamaremos “ t límite”, el término

$5,137 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-\lambda_m \cdot t \text{ límite}} [\text{Amp} / \text{cm}] = 3,244 \cdot 10^{-10} [\text{Amp} / \text{cm}]$, esto es alcanza al valor del fondo de radiación constante, por tanto la otra condición de entorno queda establecida por este valor de “ t límite”, en el cual se cumplirá al menos que:

$$8,381 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-0,02163 \cdot t \text{ límite}} [\text{Amp} / \text{cm}] = 2 * 3,244 \cdot 10^{-10} [\text{Amp} / \text{cm}],$$

Así “ t límite” = 11,8 hs.

Despejando de la expresión (17) el valor de λ_m utilizando el valor de I encontrado (18) y en $t = 11,8$ hs., se tiene que $\lambda_m = 0,0388 \text{hs}^{-1}$.

Por tanto, en $x = 0$ cm.

$$\begin{aligned} 8,381 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-(0,02163 \cdot t[1/h])} [\text{Amp} / \text{cm}] = \\ = (5,137 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-0,0388 t[1/h]} + 3,244 \cdot 10^{-10}) [\text{Amp} / \text{cm}] \end{aligned} \quad (19)$$

Comparando las expresiones de cálculo de corrientes según la expresión (8) $y(t, x = 0) = 8,381 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-(0,02163 \cdot t[1/h])} [\text{Amp} / \text{cm}]$ en $x = 0$ cm con la (19), puede verse en la tabla 7, que se corresponden sin diferencias significativas para tiempos menores a 11,8 hs. (fig. 16)

En casos en que las exposiciones en esta instalación, deban superar el tiempo límite, se recomendará ajustar los cálculos, siguiendo el procedimiento establecido para llegar hasta la expresión (19), y recalculer así los valores de dosis correspondientes.

De lo visto hasta aquí, para poder calcular la exposición en el canal de irradiación de interés en este trabajo, en el intervalo de tiempo posterior a la extinción del reactor, comprendido entre las 40 hs y las (40 + 11,8)hs. puede utilizarse la forma simplificada .

Con la expresión (8), el cálculo de exposición integrada en tiempo y espacio resultaba:

$$\iint_{(t,x)} \dot{X}[R/h] = \iint_{(t,x)} \frac{8,381 \cdot 10^{-10} [\text{Amp/cm}] \cdot e^{-(0,02163 \cdot t[1/h] + 0,095 \cdot x[1/cm])}}{\varepsilon [\text{Amp}/(R/h)]} dx dt$$

(20)

Si se supera el tiempo límite calculado para la instalación de interés, como es el caso del RA-1, el cual es de 51.8hs. de extinguido el reactor, deberá aplicarse la expresión que contempla el aporte del fondo debido a los radionucleidos de vida media larga, y el aporte los radionucleidos de vida media “media”. Para este caso particular resulta:

$$\iint_{(t,x)} \dot{X}[R/h] = \iint_{(t,x)} \frac{(5,137 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-0,0388t[1/h]} + 3,244 \cdot 10^{-10})[Amp/cm] e^{-(0,095 \cdot x[1/cm])}}{\varepsilon[Amp/(R/h)]} dx dt \quad (21)$$

Igualmente, esta última expresión puede ser utilizada desde las 40 hs. posteriores al apagado del reactor.

Por tanto, el cálculo de dosis absorbida en aire resultará, para tiempos menores a la suma del “tiempo límite” calculado, y el transcurrido entre la primera medición y la extinción del reactor, (para el caso del RA-1, 51.8hs):

$$D[Gy] = \iint_{(t,x)} \frac{8,381 \cdot 10^{-10} [Amp/cm] \cdot e^{-(0,02163 \cdot t [1/h] + 0,095 \cdot x [1/cm])}}{\varepsilon[Amp/(R/h)] \cdot 114 [R/Gy]} dx dt \quad (22)$$

O bien, para tiempos mayores:

$$D[Gy] = \iint_{(t,x)} \frac{(5,137 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-0,0388 t [1/h]} + 3,244 \cdot 10^{-10}) [Amp/cm] e^{-(0,095 \cdot x [1/cm])}}{\varepsilon[Amp/(R/h)] \cdot 114 [R/Gy]} dx dt \quad (23)$$

6 Conclusiones

En el presente trabajo, ha quedado establecido que:

- La metodología de evaluación de dosis con cámara de ionización es posible de realizar en esta instalación particular, pero por lo sencillo del procedimiento, es aplicable a cualquier otra de características similares.
- Los valores de corrientes obtenidos con cámara de ionización, y su evaluación con las rutinas desarrolladas, permiten obtener “in situ”, las dosis acumuladas a lo largo de un eje longitudinal y en un tiempo especificado, correspondiéndose estos valores, con los obtenidos con detectores de lectura diferida.
- La evaluación “in situ”, permite al experimentador poder decidir tiempos y posiciones para las muestras a irradiar en el campo gamma.

e) Dado que la evaluación del campo de radiación es casi inmediata y pudiendo con este método predecir su comportamiento en tiempo y espacio, se disminuirá la posibilidad de sobreexposición, o por el contrario, de subexposición que pudiera alterar los objetivos de la experiencia en curso con la consecuente pérdida de tiempo, trabajo y material de ensayo, lo que trae aparejado un aumento en la posibilidad de exposición del personal, al tener que repetir la misma.

f) Las consideraciones precedentes que permitieron llegar a la expresión (19), constituyen una metodología de evaluación de tiempo que permite decidir si es necesario ajustar las ecuaciones a integrar, para obtener la exposición y posteriormente la dosis absorbida (expresiones 20, 21, 22 y 23).

Por todo esto, se ve que este método desarrollado, no solo es una manera práctica de evaluar la dosis en una región y en un cierto tiempo en una instalación dada, sino que redundará en una mejor calidad de trabajo por lo expuesto en el punto e).

7 Futuras líneas de investigación

La posibilidad de poder caracterizar el campo de radiación gamma estableciendo la dosis integrada en tiempo y espacio con una precisión aceptable a los fines prácticos, sugiere la posibilidad de contrastar los dispositivos de evaluación diferida, así poder establecer su efectividad o bien establecer su calibración.

La metodología que se ha aplicado para la evaluación del campo gamma, puede perfectamente ajustarse para otros campos simples o mixtos de radiación, con el correspondiente dispositivo de detección.

Así podrán establecerse rutinas de cálculo para el caso de dosimetría neutrónica, neutrónica más gamma, dosimetría de electrones, electrones más gamma, etc.

8 Rutinas desarrolladas

8.1 Arreglo de datos

X = vector de valores de distancias en centímetros, tomados desde el extremo más cercano al recipiente del reactor hacia el más lejano, ($x_0 = 0\text{cm}$).

T = vector de registro de tiempos transcurridos en horas.

C = matriz de valores de corrientes en amperes registrados. Las columnas corresponden a un mismo tiempo, mientras que las filas corresponden a cada posición.

eff = eficiencia del detector en Amp/R/h.

8.2 Funciones y rutinas de cálculo

Las funciones y rutinas de cálculo se encuentran disponibles en el informe IN-IDB003 del Instituto de Tecnología Nuclear "Dan Beninson".

9 Bibliografía

1. Glaston, S. & Sesonske, (1994), "Nuclear Reactor Engineering" Volumen 1, Chapman & Hall Publishing, United State of America.
2. Lamarsh, John R. and Baratta, Anthony J. (2001), "Introduction to Nuclear Engineering - Addison-Wesley Series in Nuclear Science and Engineering", Prentice Hall, Canada.

3. Knoll, Glenn F., (1999), "Radiation Detection And Measurement", John Wiley & Sons Inc. Publishing, United State of America.
4. Hubbell, J. H., (1982), "Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 Kev to 20 Mev", INT J APPL RADIAT IS, V33, P1269, Pergamon Press Ltd., Great Britain.
5. González H.C., A.M. Fortis y G.D.H. Cocoz. J. (2000), "High-dose irradiation growth kinetics at 448 K in a zirconium alloy", of Nucl. Mater, Vol 279/2-3, p. 360.
6. Thomas, V.G., Srivastava, S.B. y Karkhanavala, M.D., (1978), "Effect of Cobalt-60 Gamma Radiation on Certain Physical Properties of Some Lubricants and Oils". Ind. J. Tech. 16, 326-329.
7. Shapiro, Jacob (1990), "Radiation Protection – A Guide for Scientists and Physicians", Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
8. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 47 (1992), "Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations", International Commission on Radiation Units and Measurements, United State of America.
9. Shultis, J. Kenneth and Faw, Richard E. (2002), "Fundamentals of Nuclear Science and Engineering", Marcel Dekker, Inc., New York . Basel.
10. Autoridad Regulatoria Nuclear, "Manual para Curso de Protección Radiológica Nivel Técnico", Capítulo 5, 2007
11. Annals of The International Commission on Radiological Protection (ICRP), Publication 103 (2007), "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", J. Valentine Editor, Published for The International Commission on Radiological Protection by Elsevier Ltd., London.
12. "Normas Básicas de Seguridad Radiológica", Norma AR 10.1.1 Revisión 3, Autoridad Regulatoria Nuclear de la República Argentina, Resolución N° 22/01 (Boletín Oficial 20/11/01).
13. "Rutinas. Funciones y rutinas de cálculo" Informe IDB-003 versión 0 del Instituto de Tecnología Nuclear "Dan Beninson", 23/10/09

ANEXO I - "Figuras"

Corte Transversal del Reactor RA-1

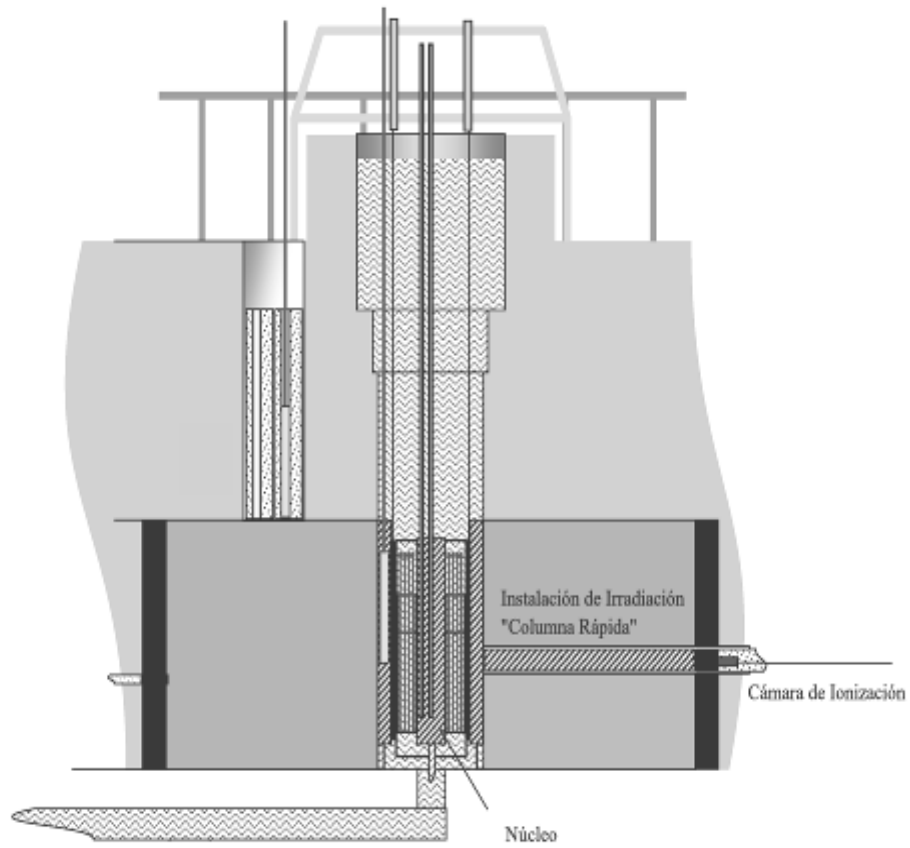


Figura 1a. Corte transversal del RA-1

Detalle de Instalación de Irradiación

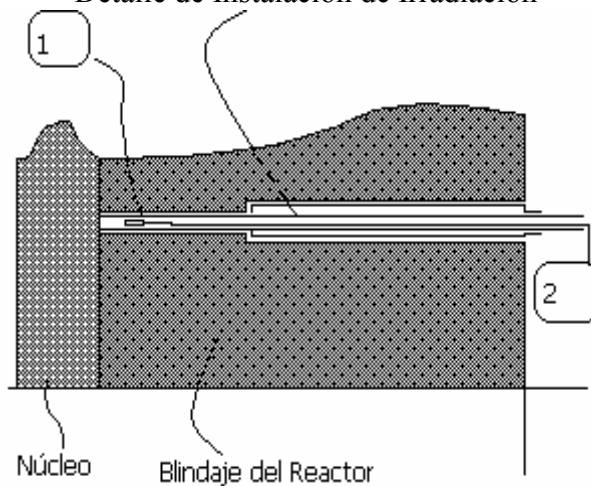


Figura 1b: Esquema de disposición del detector en una instalación de irradiación.
1) detector, "Cámara de Ionización", 2) Señal de salida

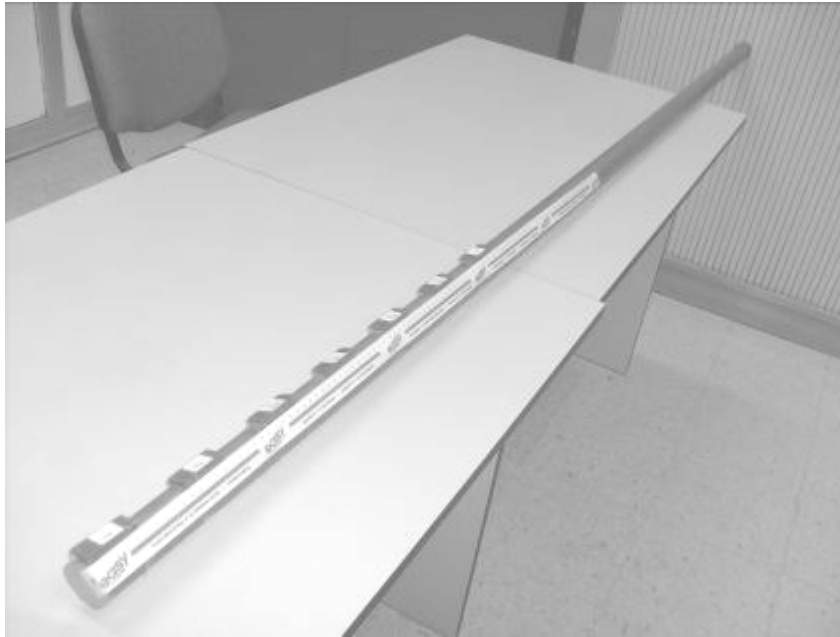


Figura 2a. Porta-detectores dispuestos sobre tubo de PVC

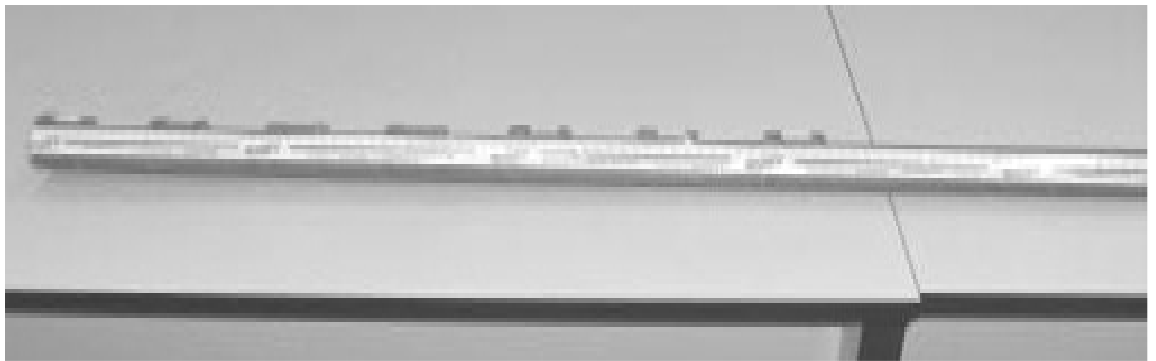


Figura 2b. Porta-detectores dispuestos sobre tubo de PVC, vista lateral



Figura 2c. Detalle de porta-detector dispuesto sobre tubo de PVC



Figura 3. Anverso y reverso de porta TLD's, se observan las cavidades donde se alojan los receptáculos que contienen los detectores. Uno de ellos se muestra en el ángulo inferior derecho.

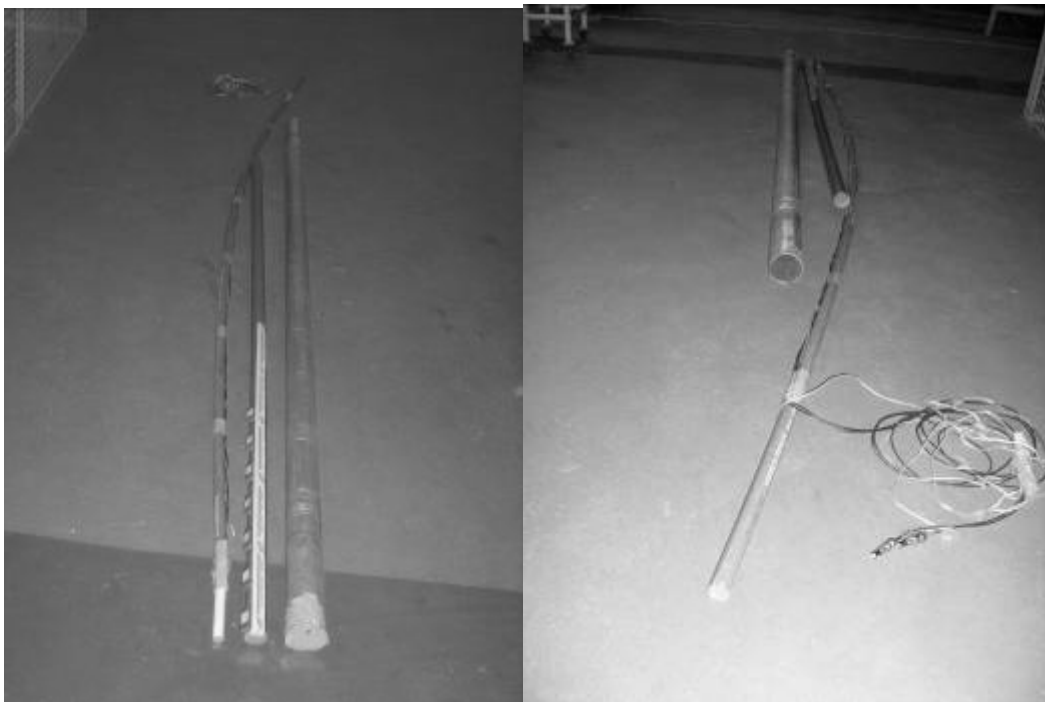


Figura 4 Lanza con detector sujeto en un extremo, tubo con porta TLD's y caño de aluminio donde se colocan los dispositivos para ser alojados posteriormente en la instalación de columna rápida del reactor.



Figura 5. Detalle de los tres dispositivos, Tubo de Al, Caño porta TLD's, y lanza con detector



Figura 6. El conjunto formado por el caño de Al, tubo porta TLD's y la lanza con detector, colocados en la instalación

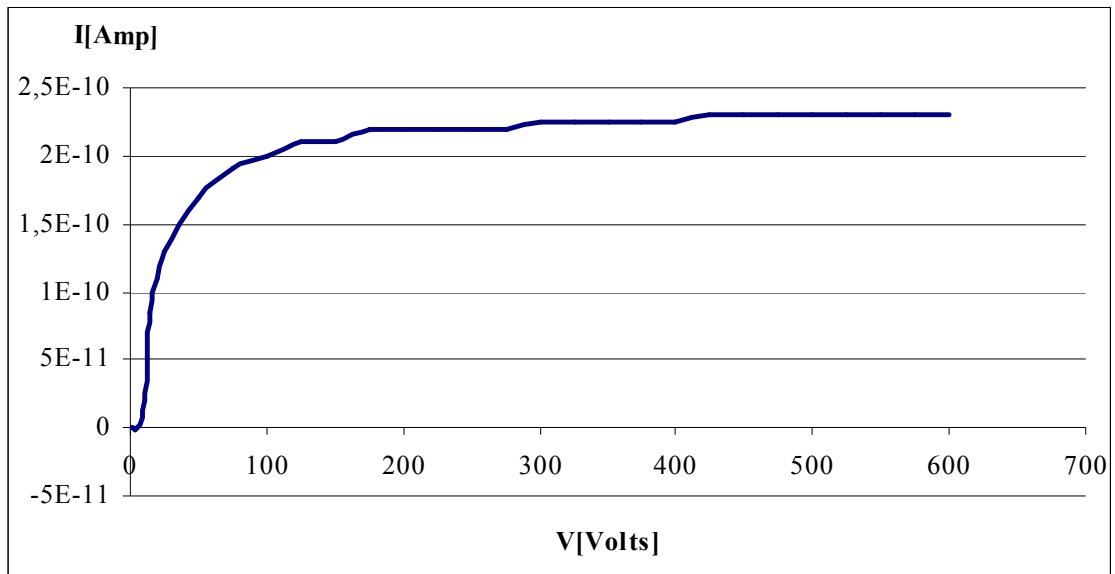


Figura 7. Plateau de cámara de ionización



Figura 8. Electrómetro Keithley Instrument modelo 610 C, fuente de alta tensión Camberra

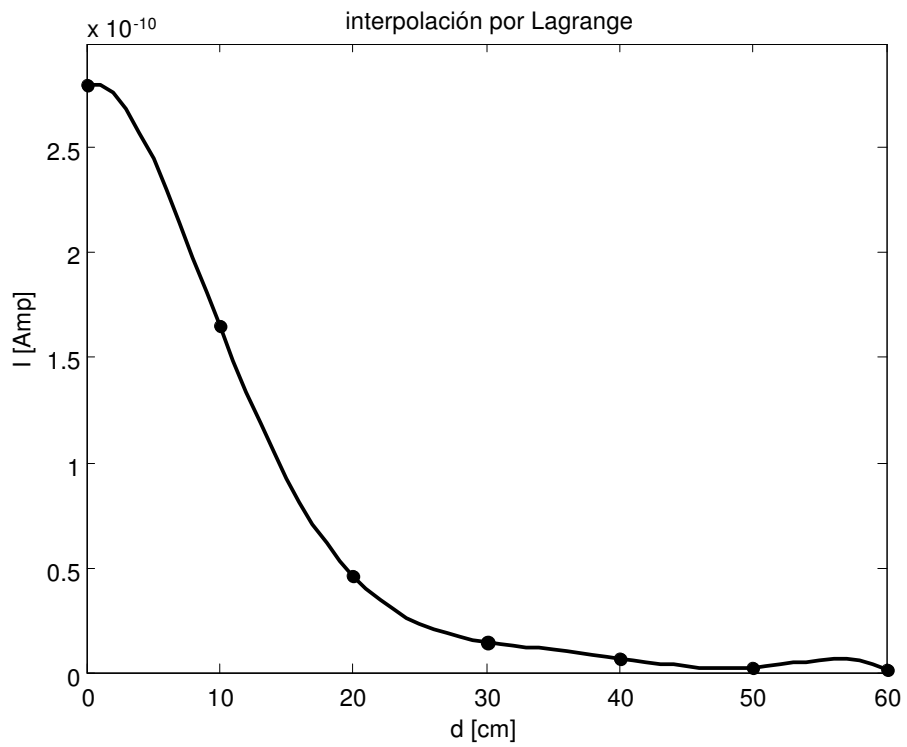


Figura 9. Gráfico de interpolación por el método de Lagrange aplicando la rutina “lagrange(X,C)”

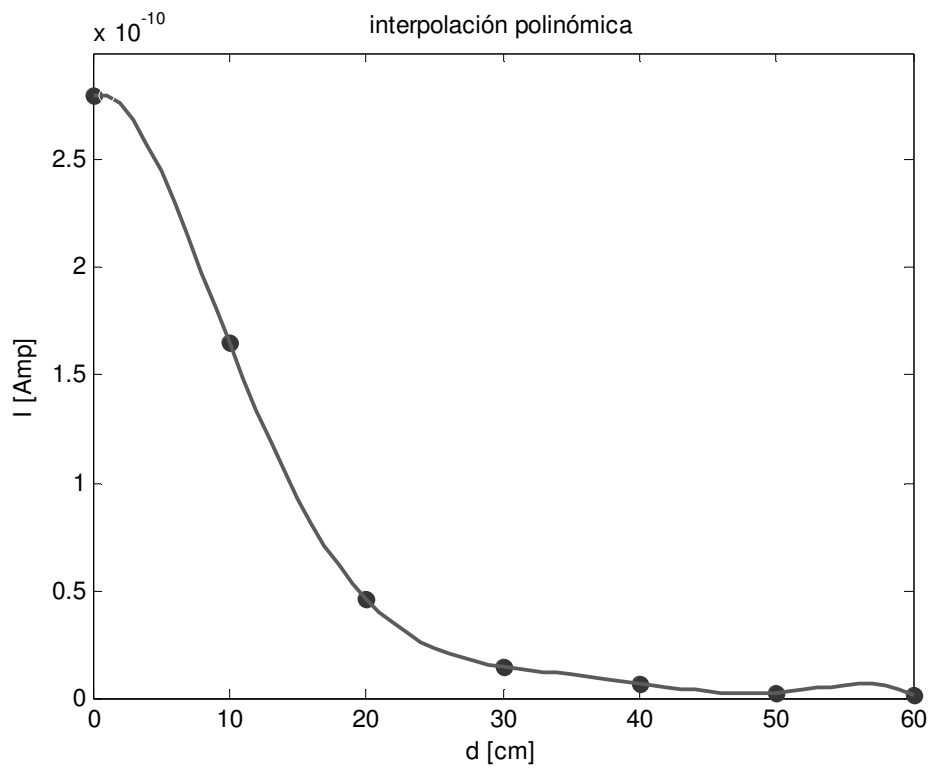


Figura 10. Gráfico de interpolación polinómica aplicando la rutina “poli(X,C,xv)”

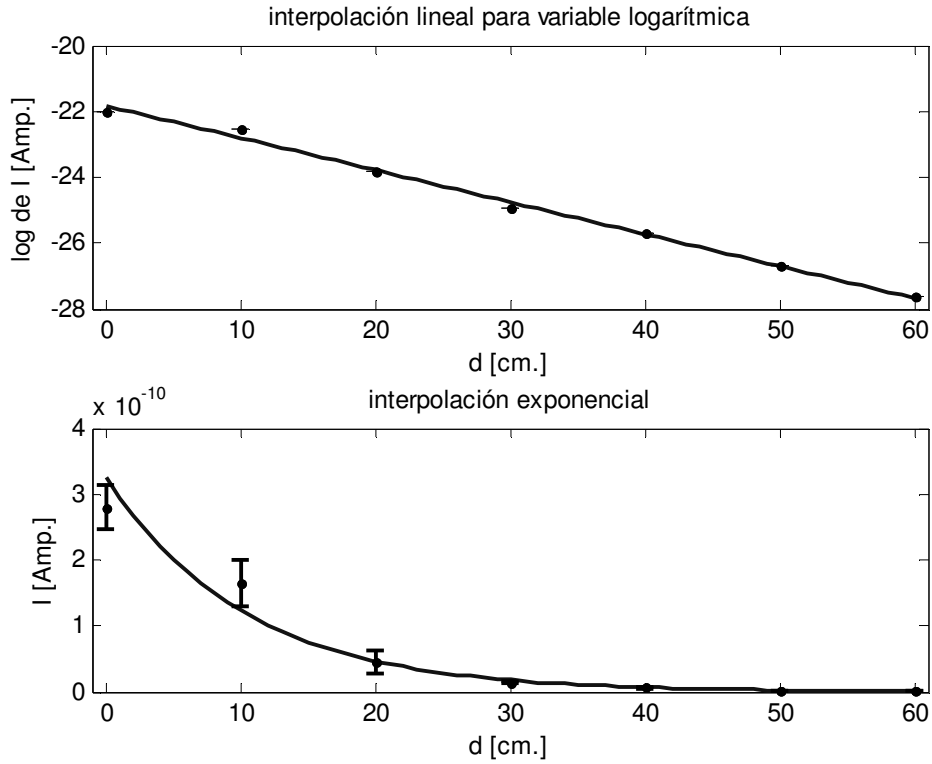


Figura 11 Gráfico de interpolación exponencial aplicando la rutina “`exponenB(X,C(:,i),BERR,ver)`”

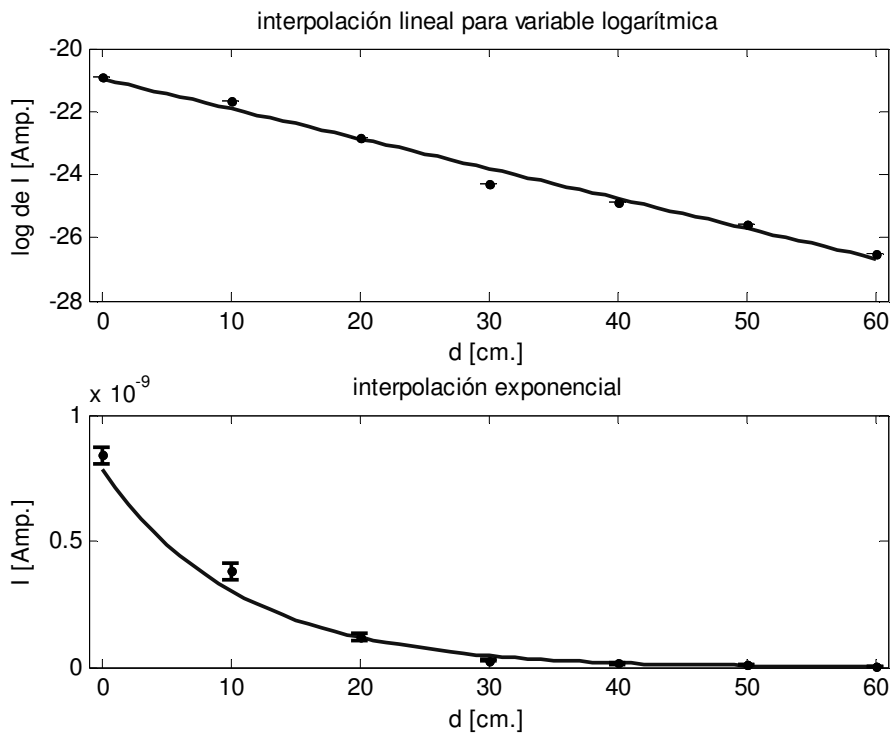


Figura 12. Gráfico de interpolación exponencial aplicando la rutina “`exponenB(X,C(:,i),BERR,ver)`”, con los valores de la tabla 3, evaluando la atenuación lineal.

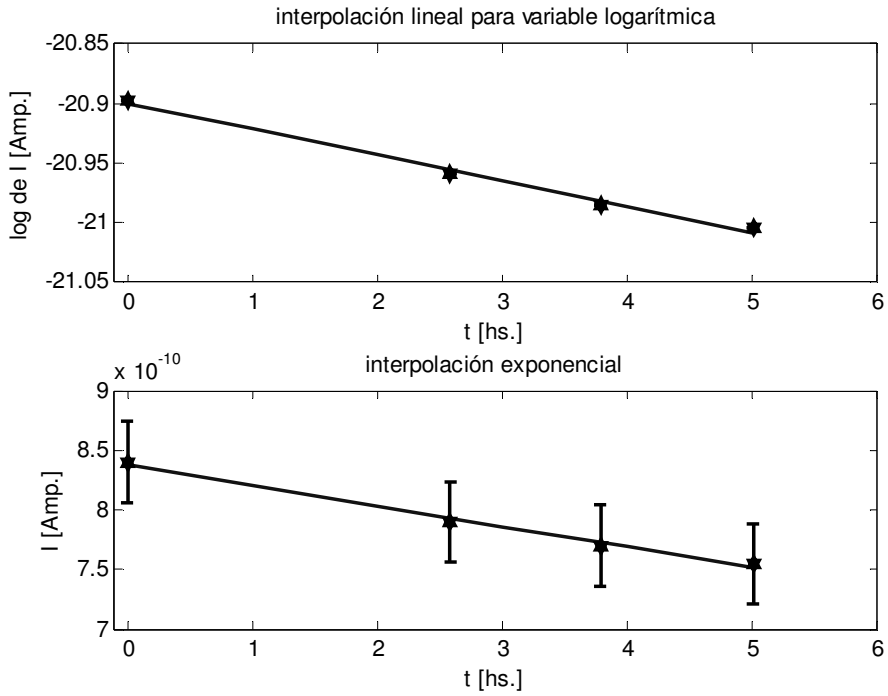


Figura 13. Grafico de interpolación exponencial aplicando la rutina “exponen(T,C(:,i),ver)”, con los valores de la tabla 3, evaluando la atenuación temporal

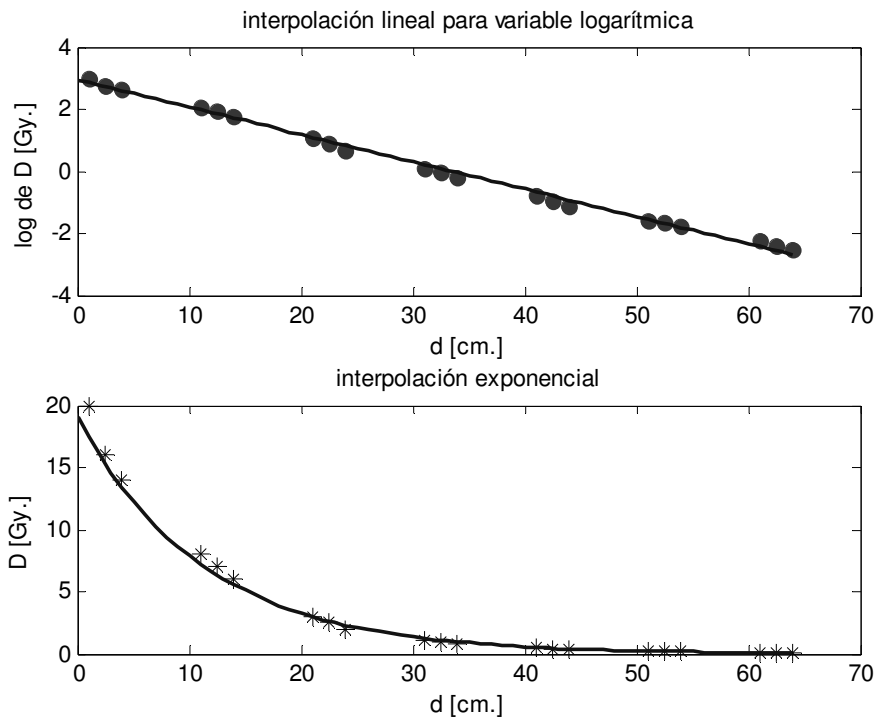


Figura 14. Ajuste realizado con la rutina “exponen(X,C(:,i),ver)”, con los datos registrados con los TLD’s de los porta-TLD numerados del 8 al 14

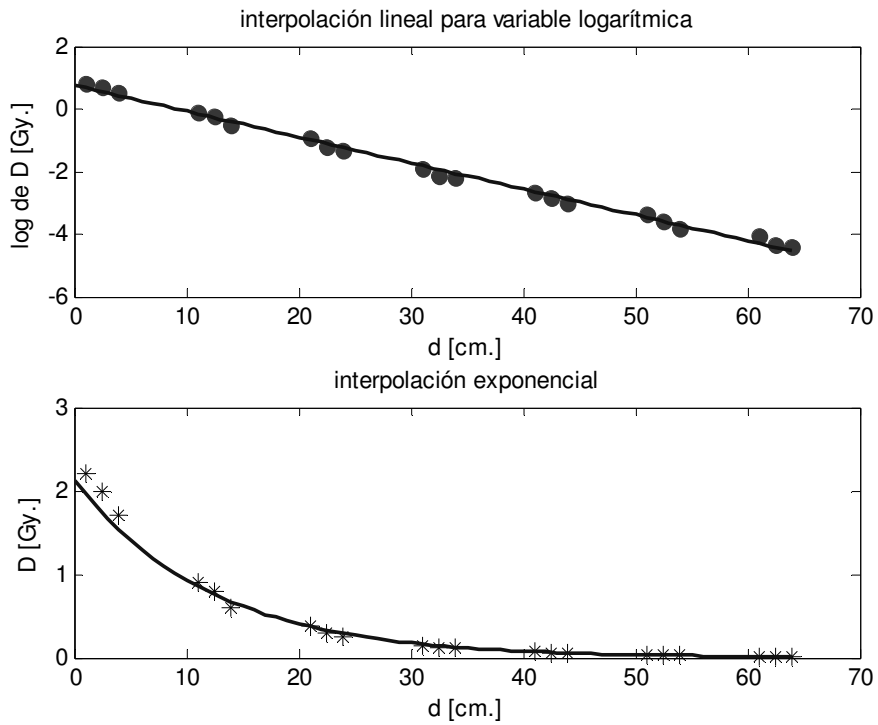


Figura 15. Ajuste realizado con la rutina "exponen(X,C(:,i)',ver)", con los datos registrados con los TLD's de los porta-TLD numerados del 1 al 7

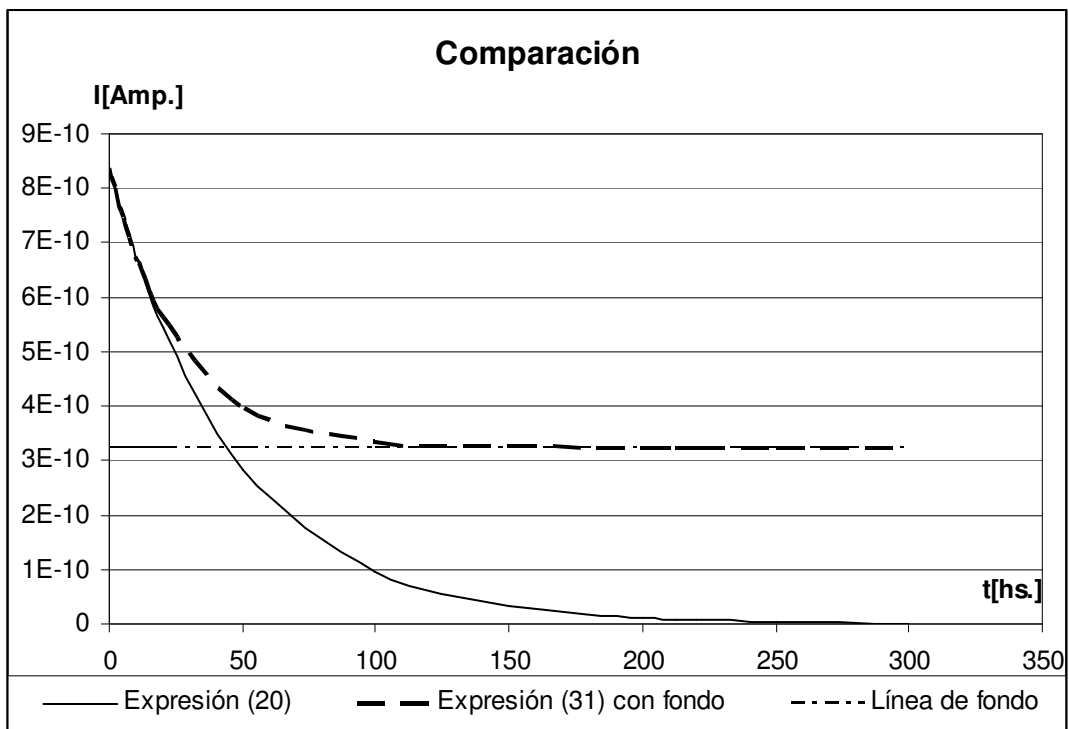


Figura 16. Comparación gráfica de los valores de la tabla 7.

ANEXO II - "Tablas"

Seguimiento del decaimiento gamma en Columna Rápida del RA-1 Tiempo de parada 1340 horas						
fecha	12/02/2009		TLD'S Números 1 a 7		Hora de retiro de los TLD's = 17:00	
Hora de introducción de los TLD's = 14:57 hs			hs.			
Hora de toma de cada medición						
	15:47			16:17		
tiempo entre mediciones	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:30:00	00:30:00	00:30:00
Distancia [cm]	Corrientes [Amp]	Error Abs. [Amp]	Error Porc. %	Corrientes [Amp]	Error Abs. [Amp]	Error Porc. %
0 cm.	$2.80 \cdot 10^{-10}$	$0.34 \cdot 10^{-10}$	12	$2.80 \cdot 10^{-10}$	$0.34 \cdot 10^{-10}$	12
10 cm.	$1.65 \cdot 10^{-10}$	$0.17 \cdot 10^{-10}$	10	$1.65 \cdot 10^{-10}$	$0.17 \cdot 10^{-10}$	10
20 cm.	$0,46 \cdot 10^{-10}$	$0.34 \cdot 10^{-11}$	7	$0,44 \cdot 10^{-10}$	$0.34 \cdot 10^{-11}$	8
30 cm.	$1.45 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-11}$	12	$1.30 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-11}$	13
40 cm.	$0,68 \cdot 10^{-11}$	$0.34 \cdot 10^{-12}$	5	$0,70 \cdot 10^{-11}$	$0.34 \cdot 10^{-12}$	5
50 cm.	$0,25 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-12}$	7	$0,27 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-12}$	6
60 cm.	$0,10 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-12}$	17	$0,08 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-12}$	21

Tabla 1. Valores de corrientes registrados con cámara de ionización y electrómetro

Método	Exposición integrada a lo largo de los 60 cm y en 1 hora	Dosis integrada a lo largo de los 60 cm y en 1 hora
Polinomio	2038 R \pm 218 R	17,88 Gy \pm 1,9 Gy
Exponencial	1790 R \pm 170 R	15,70 Gy \pm 1,5 Gy
Lagrange	2113 R \pm 227 R	18,54Gy \pm 2,0 Gy

Tabla 2. Comparación de resultados

Intervalos de medición	Polinomio por matrices	Exponencial	Polinomio de Lagrange
10-50 cm	6,45 Gy \pm 0,56 Gy	5,84 Gy \pm 0,55 Gy	6,85 Gy \pm 0,60 Gy
20-50 cm	1,87 Gy \pm 0,15 Gy	2,14 Gy \pm 0,20 Gy	1,99 Gy \pm 0,16 Gy
30-50 cm	0,67 Gy \pm 0,05 Gy	0,73 Gy \pm 0,07 Gy	0,71 Gy \pm 0,05 Gy
40-50 cm	0,17 Gy \pm 0,01 Gy	0,20 Gy \pm 0,02 Gy	0,19 Gy \pm 0,01 Gy

Tabla 3. Comparación de dosis integrada por los tres métodos propuestos, para distintos intervalos de distancia

Método	Exposición integrada a lo largo del intervalo 15-50 cm y en 1 hora	Dosis integrada a lo largo del intervalo 15-50 cm y en 1 hora
Polinomio	393,8 R ± 31,5 R	3,45 Gy ± 0,28 Gy
Exponencial	404,3 R ± 38,0 R	3,54 Gy ± 0,33 Gy
Lagrange	420,0 R ± 33,8 R	3,68 Gy ± 0,30 Gy

Tabla 4. Comparación de resultados

Seguimiento del decaimiento gamma en Columna Rápida del RA-1 Tiempo de parada 43 horas						
fecha	27/02/2009		TLD'S Números 8 a 14		Hora de retiro de los TLD's =	
	Hora de introducción de los TLD's = 10:04 hs		16:05 hs			
	Hora de toma de cada medición					
	10:20	12:55	14:07	15:24		
tiempo entre mediciones	00:00:00	02:35:00	03:47:00	05:04:00	00:00:00	00:00:00
Distancia [cm]	Corrientes [Amp]	Corrientes [Amp]	Corrientes [Amp]	Corrientes [Amp]	Error Abs. [Amp]	-----
0 cm.	$8.40 \cdot 10^{-10}$	$7.90 \cdot 10^{-10}$	$7.75 \cdot 10^{-10}$	$7.80 \cdot 10^{-10}$	$0.34 \cdot 10^{-10}$	-----
10 cm.	$3.80 \cdot 10^{-10}$	$3.55 \cdot 10^{-10}$	$3.50 \cdot 10^{-10}$	$3.50 \cdot 10^{-10}$	$0.34 \cdot 10^{-10}$	-----
20 cm.	$1.20 \cdot 10^{-10}$	$1.10 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$0.17 \cdot 10^{-10}$	-----
30 cm.	$2.75 \cdot 10^{-11}$	$2.55 \cdot 10^{-11}$	$2.40 \cdot 10^{-11}$	$2.20 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-11}$	-----
40 cm.	$1.55 \cdot 10^{-11}$	$1.15 \cdot 10^{-11}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$	$0.17 \cdot 10^{-11}$	-----
50 cm.	$0.79 \cdot 10^{-11}$	$0.63 \cdot 10^{-11}$	$0.60 \cdot 10^{-11}$	$0.51 \cdot 10^{-11}$	$0.34 \cdot 10^{-12}$	-----
60 cm.	$0.31 \cdot 10^{-11}$	$0.26 \cdot 10^{-11}$	$2.05 \cdot 10^{-12}$	$1.95 \cdot 10^{-12}$	$0.34 \cdot 10^{-12}$	-----

Tabla 5. Valores de corrientes registrados con cámara de ionización y electrómetro

Valores Informados por el Laboratorio de Dosimetría Externa				
Distancia	Porta dosím	Dosis [Gy]	Porta dosím	Dosis [Gy]
0 a 5 cm	1	2,2	8	20
		2		16
		1,7		14
10 a 15 cm	2	0,9	9	8
		0,8		7
		0,6		6
20 a 25 cm	3	0,39	10	3
		0,3		Error lect.
		0,26		2
30 a 35 cm	4	0,15	11	1,1
		0,12		1
		0,11		0,8
40 a 45 cm	5	0,07	12	0,45
		0,06		0,39
		0,05		0,33
50 a 55 cm	6	0,034	13	0,2
		0,027		0,19
		0,022		0,17
60 a 65 cm	7	0,017	14	0,11
		0,013		0,09
		0,012		0,08

Tabla 6. Valores de dosis registrados con los TLD's

t en hs.	Expresión (8) en Amp/cm	Expresión (19) en Amp/cm
0	8,38E-10	8,38E-10
1	8,20E-10	8,19E-10
2	8,03E-10	8,00E-10
3	7,85E-10	7,82E-10
4	7,69E-10	7,64E-10
5	7,52E-10	7,47E-10
10	6,75E-10	6,73E-10
11,8	6,49E-10	6,49E-10
15	6,06E-10	6,11E-10
20	5,44E-10	5,61E-10
25	4,88E-10	5,19E-10
30	4,38E-10	4,85E-10
35	3,93E-10	4,56E-10
40	3,53E-10	4,33E-10
43,88	3,24E-10	4,18E-10
50	2,84E-10	3,98E-10
75	1,65E-10	3,52E-10
100	9,64E-11	3,35E-10
200	1,11E-11	3,25E-10
300	1,27E-12	3,24E-10

Tabla 7. Valores obtenidos para distintos tiempos, aplicando la expresión exponencial de la interpolación $y_t = 8,381.10^{-10} \cdot e^{-(0,02163.t[1/h])}$ [Amp/cm] (columna 2), y la expresión que involucra la discriminación de fondo $y_t = (5,137.10^{-10} \cdot e^{-0,0388t[1/h]} + 3,244.10^{-10})$ [Amp/cm] (columna 3).