

# MODELO para la DOSIS ABSORBIDA en un LÍQUIDO que CIRCULA ALREDEDOR de un IRRADIADOR con Co-60

Mangussi, J.

FACET - UNT. Av. Independencia 1800- (4000) San Miguel de Tucumán  
jmangussi@herrera.unt.edu.ar

## Resumen

Se presenta un modelo que calcula la distribución de la dosis absorbida en un volumen de líquido que circula por un tanque que contiene un irradiador con cobalto-60. Se modela la tasa de dosis absorbida, el proceso de mezcla y la recirculación del líquido por el tanque activo. Se calculan las dosis absorbidas por diferentes fracciones del volumen. Se evalúan los tiempos de irradiación necesarios para obtener la dosis absorbida requerida.

**Palabras clave:** irradiación gamma – dosis absorbida – líquido en movimiento – modelo computacional

## I. El proceso de irradiación

La irradiación de un volumen no despreciable de un líquido tiene como objetivo lograr que un porcentaje prefijado del volumen irradiado resulte con una dosis absorbida ( $D$ ) mayor o igual que la dosis absorbida requerida. El proceso de irradiación se realiza dentro de un tanque activo que contiene un arreglo con simetría cilíndrica de fuentes radiactivas de cobalto-60; el líquido pasa por el tanque activo tantas veces como sea necesario para conseguir la dosis absorbida deseada. La zona del tanque activo en la cual la irradiación es relevante determina el volumen de un lote de líquido. Un esquema simplificado del proceso se muestra en la figura 1.

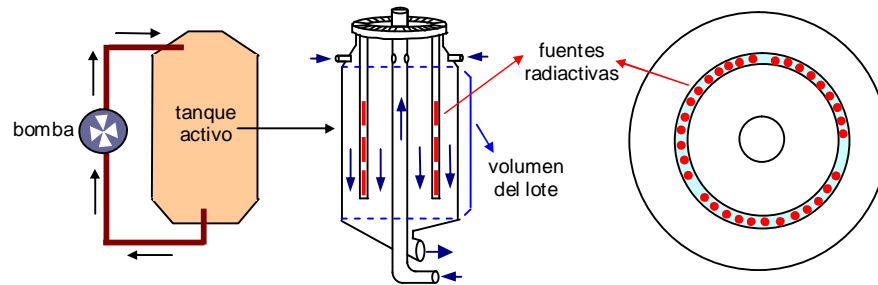


Figura 1 – A la izquierda, el esquema del proceso de irradiación. En el centro, el tanque activo. A la derecha, la ubicación de las fuentes radiactivas.

Un primer modelo simplificado del proceso de irradiación ha sido presentado en una publicación anterior. (Mangussi y Graiño, 1997). El líquido entra al tanque activo por los costados y por el tubo central, baja sin mezclarse, sale, se mezcla y vuelve a entrar. El lote se irradia en las zonas del tanque alrededor de las fuentes radiactivas, en el tubo central al subir y en la base donde se reúne el líquido. El paso de un lote por el tanque activo se denomina “pasada” y demora un tiempo  $t_p$ .

## II. El cálculo de la tasa de dosis absorbida

El volumen del lote se divide en celdas y en cada una de ellas se calcula la tasa de dosis absorbida,  $D'$ , (en kGy/h) con los modelos presentados en una publicación anterior (Mangussi, 2012); se incluyen los efectos de atenuación de: (i) el líquido que se desea

irradiar; (ii) el líquido de refrigeración de las fuentes radiactivas; (iii) las partes metálicas tales como las paredes, el portafuentes, el encapsulado y otros. En la figura 2 se muestra la ubicación de una celda en las distintas regiones de cálculo dentro del tanque activo.

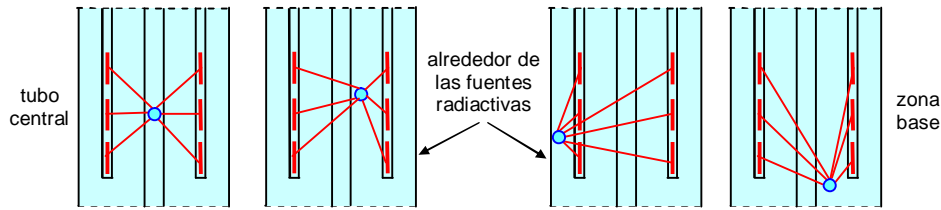


Figura 2 – Las celdas ubicadas en las distintas regiones del cálculo de la tasa de dosis absorbida.

A cada celda le corresponden a las coordenadas  $(x, y, z)$ , está fija en el espacio y es ocupada por un elemento de volumen del líquido. Como el líquido baja sin mezclarse, las tasas de dosis en un elemento que desciende por una columna pueden sumarse sobre la coordenada  $z$  y obtener la tasa de dosis absorbida de una celda en plano horizontal. En la figura 3 se muestran: el volumen del lote formado por las columnas, la sección del lote en el plano  $(x, y)$  y el mapa de la tasa de dosis absorbida en el plano horizontal calculado con celdas de dimensión característica = 0,010 m.

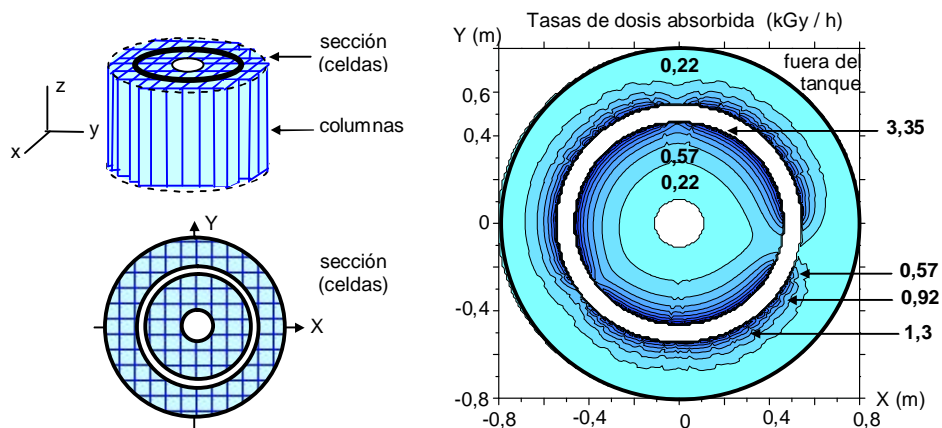


Figura 3 – A la izquierda, el volumen y la sección del lote. A la derecha, el mapa de la tasa de dosis en el plano horizontal para celdas de dimensión característica = 0,010 m.

Las isolíneas de tasa de dosis absorbida están dibujadas como curvas continuas. Se observa la correspondencia de la tasa de dosis absorbida con la distribución de las fuentes radiactivas en el portafuentes descrita en la figura 1.

El conjunto de las tasas de dosis absorbidas con las que se construye el mapa se ordena de menor a mayor y las tasa de dosis se agrupan en intervalos iguales. El número de celdas en cada intervalo dividido en el número total de celdas en el plano horizontal representa una fracción del volumen del lote y se interpreta como una frecuencia o una probabilidad discreta.

Un esquema de los pasos para obtener la probabilidad en función de la tasa de dosis absorbida, a partir del volumen irradiado y la probabilidad discreta se muestran en la figura 4.

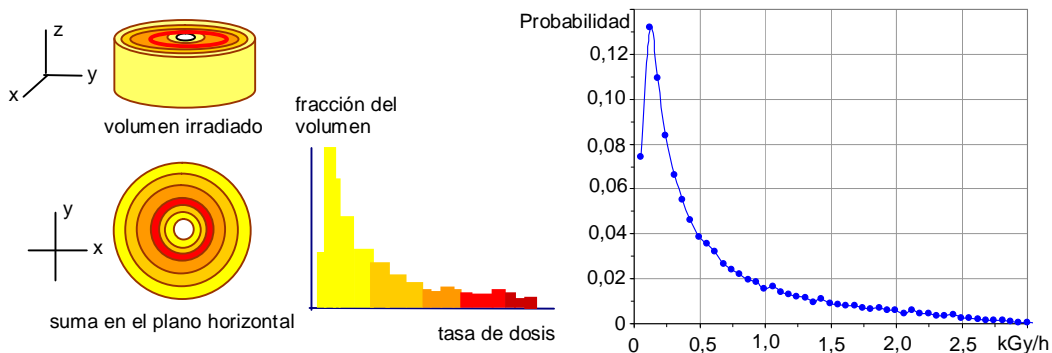


Figura 4 – A la izquierda, el volumen irradiado, la suma de la tasa de dosis en el plano horizontal y su distribución en el volumen. A la derecha, la probabilidad dibujada como una función continua.

### III – La mezcla y las pasadas sucesivas por el tanque activo

A medida que el líquido sale del tanque activo es impulsado por una bomba, se mezcla y vuelve a entrar al tanque activo para realizar otra pasada. La cantidad de pasadas  $N_P$  del lote está determinada por la dosis absorbida mínima requerida. Un esquema simplificado de los efectos de la mezcla se muestra en la figura 5, donde el recuadro con varios colores representa la distribución de la tasa de dosis absorbida en el lote.

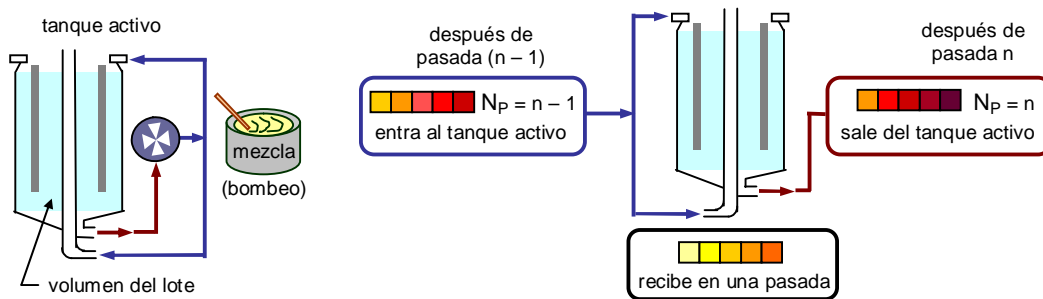


Figura 5 – A la izquierda, la mezcla del líquido entre dos pasadas. A la derecha, efectos de una pasada posterior y la mezcla en la distribución de la tasa de dosis absorbida.

Al mezclarse y volver a pasar por el tanque activo, la distribución de tasas de dosis en el volumen del lote se comporta como una variable aleatoria. El resultado de dos pasadas sucesivas corresponde a otra variable aleatoria con densidad de probabilidad que depende de la distribución de tasa de dosis después de la pasada anterior y de la distribución de tasa de dosis en una pasada.

En el modelo para la irradiación del lote, a una pasada le corresponde el conjunto discreto (tasa de dosis, probabilidad) con  $N_P = 1$ ; a la pasada  $(n - 1)$  le corresponde el conjunto discreto (tasa de dosis, probabilidad) para  $N_P = n - 1$ . Después de  $n$  pasadas, el conjunto discreto (tasa de dosis, probabilidad) correspondiente a  $N_P = n$  se calcula con los algoritmos correspondientes a variables aleatorias expresados en forma discreta. (Crámer, 1968). Para realizar comparaciones posteriores, las tasas de dosis obtenidas se reagrupan en un número fijo de intervalos y las probabilidades se normalizan.

Se realizan cálculos discretos correspondientes a un lote para  $N_P$  desde 2 hasta 55. Las probabilidades en función de la tasa de dosis para los distintos valores de  $N_P$  se

muestran en la figura 6; son probabilidades discretas pero se dibujan como curvas continuas por razones de claridad.

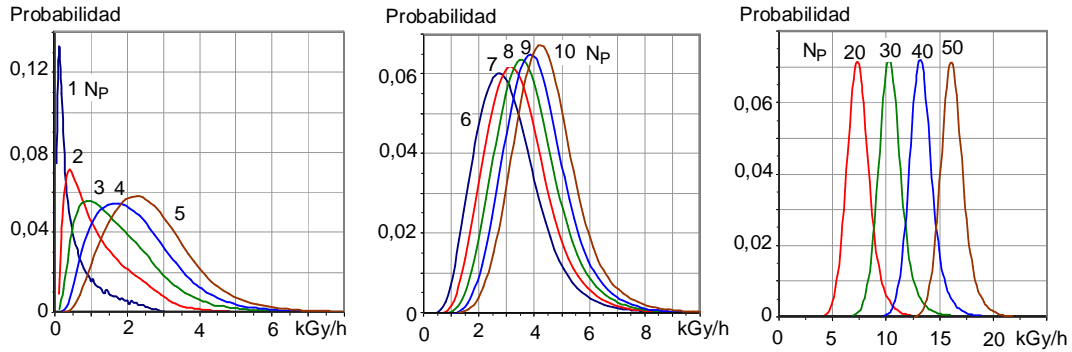


Figura 6 – La probabilidad discreta en función de la tasa de dosis para varias pasadas ( $N_P$ ).

En la figura 6 se observa que: (i) A medida que aumenta el número de pasadas la tasa de dosis aumenta. (ii) Se forma un pico central en las primeras 5 pasadas. (iii) En las 5 pasadas siguientes el pico se afina y a partir de  $N_P = 10$ , los cambios en la forma del pico son mínimos y aumenta levemente la probabilidad del máximo del pico.

La curva calculada modela la mezcla aleatoria entre las pasadas sucesivas del volumen por el tanque activo. Cada pasada por el tanque activo tiene una distribución de probabilidad con una asimetría muy pronunciada (caso  $N_P = 1$ ). Para un número grande de pasadas,  $N_P > 10$ , se calcula la densidad de probabilidad y se observa que tiene una similitud muy marcada con la correspondiente a la de una distribución normal; este hecho permite aceptar que el modelado del proceso de mezcla entre las sucesivas pasadas es bueno.

#### IV – La dosis en el volumen del lote

El tiempo total de irradiación de un lote es igual al tiempo de una pasada por el número de pasadas:  $T_{ir} = t_p \times N_P$ . La dosis absorbida es:  $D = D' \times T_{ir}$ . En la distribución de la dosis absorbida en el lote (% volumen en función de  $D$ ) es conveniente definir:

- (i)  $D_P$  que es la dosis absorbida con mayor probabilidad y corresponde al pico.
- (ii)  $D_{999}$  que indica que el 99,99 % del volumen del lote tiene  $D \geq D_{999}$ .
- (iii)  $D_{01}$  que indica que el 1,0 % del volumen del lote tiene  $D \geq D_{01}$ .

Las dosis  $D_P$ ,  $D_{999}$  y  $D_{01}$  se muestran en la figura 7.

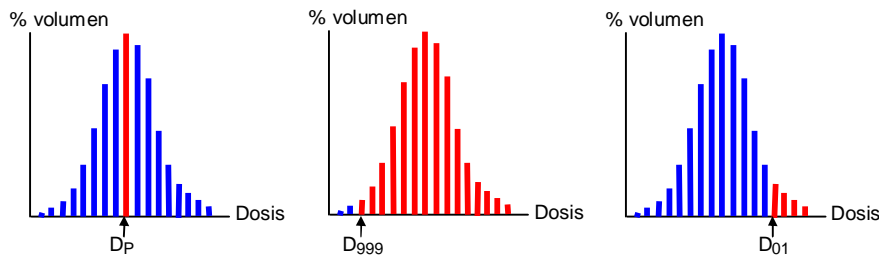


Figura 7 – Las dosis  $D_P$ ,  $D_{999}$  y  $D_{01}$  en el gráfico (fracción de volumen, dosis).

El tiempo  $T_{ir}$  y las dosis  $D_P$ ,  $D_{999}$  y  $D_{01}$  calculadas para dos números de pasadas,  $N_P = 35$  y  $N_P = 40$  se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 – Tiempos de irradiación y dosis de interés para  $N_P = 35$  y  $N_P = 40$ .

| $N_P$ | $T_{ir}$ (h) | $D_P$ (kGy) | $D_{999}$ (kGy) | $D_{01}$ (kGy) |
|-------|--------------|-------------|-----------------|----------------|
| 35    | 0,273        | 3,182       | 2,369           | 4,142          |
| 40    | 0,312        | 4,136       | 3,160           | 5,185          |

La fracción del volumen del lote en función de la dosis para  $N_P = 35$  y  $N_P = 40$  se muestran en la figura 8.

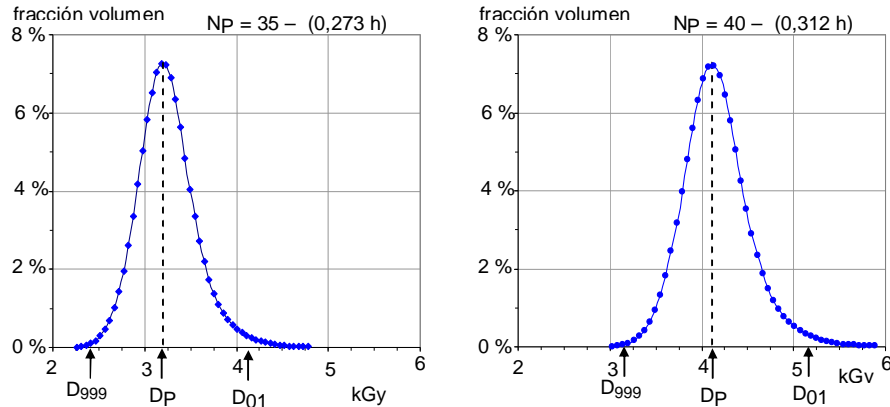


Figura 8 – La distribución de dosis y las dosis de interés para  $N_P = 35$  y  $N_P = 40$ .

De los gráficos de la figura 6, se obtiene el ajuste numérico para la tasa de dosis de interés:  $D'_{999} = 0,288 \text{ kGy/h} \times N_P - 1,3687 \text{ kGy/h}$ . Este ajuste junto con las ecuaciones  $T_{ir} = t_p \times N_P$  y  $D = D' \times T_{ir}$  permiten elegir los valores de  $T_{ir}$  (y  $N_P$ ) para el proceso caracterizado por una dosis absorbida requerida y un porcentaje prefijado del volumen.

## V. Discusión y conclusiones

- Los resultados presentados se obtuvieron con 99 fuentes radiactivas iguales distribuidas en forma uniforme en el irradiador, lo que representa una situación ideal. Se considera conveniente repetir los cálculos con una distribución no uniforme de la actividad en el irradiador y comparar con los resultados de la distribución uniforme.
- El modelo permite elegir los parámetros básicos para el proceso de irradiación como se comentó en el último párrafo del apartado anterior.
- La extensión hacia las dosis altas de la distribución en las fracciones de volumen puede conducir a una sobredosis si hay un límite para la dosis absorbida máxima por el lote.
- La extensión hacia las dosis bajas implica mayores tiempos de irradiación para alcanzar la condición de que un porcentaje prefijado del volumen del lote reciba una dosis absorbida mayor o igual que la dosis absorbida requerida. Un mayor tiempo de irradiación también genera dosis más altas en el resto del volumen del lote.

## Soporte Institucional

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto de investigación 26/E475 “Modelos macroscópicos y microscópicos de la tasa de dosis para una planta de irradiación gamma. Ajuste a casos particulares”, aprobado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán. (2011 – 2013).

## **Referencias**

Crámer, H. 1968. “Elementos de la teoría de probabilidades y sus aplicaciones”. Aguilar.

Mangussi, J. y Graiño, J. 1997. “Absorbed dose and operation time as parameters of the P.I.Ba. operation”. IV ENAN 4th Meeting on Nuclear Applications. Poços de Caldas (Brasil).

Mangussi, J. 2012. “Modelos para la tasa de dosis en la irradiación gamma”, capítulo 1 – “Modelos para la tasa de dosis absorbida”.

<https://sites.google.com/site/temasdefisicanuclearymoderna/home/irradiacion-gamma>

ABSORBED DOSE MODELED FOR A LIQUID CIRCULATING AROUND A Co-60 IRRADIATOR

Mangussi, J.

FACET - UNT. Av. Independencia 1800- (4000) San Miguel de Tucumán  
jmangussi@herrera.unt.edu.ar

A model for the distribution of the absorbed dose in a volume of liquid circulating into an active tank containing a Co-60 irradiator is presented. The absorbed dose, the stir process and the liquid recirculation into the active tank are modeled. The absorbed dose for different fractions of the volume is calculated. The necessary irradiation times for the achievement of the required absorbed dose are evaluated.