

Determinación del tiempo muerto de la cadena de arranque de un reactor nuclear

Agustín Zúñiga*, Emilio Veramendi, Arturo Ramón, Edgar Ovalle, Fernando Ramos,
Pedro Canaza
Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Resumen

En el trabajo presentamos la medición del tiempo muerto de las cadenas de arranque de los reactores nucleares RP-0 y RP-10, los cuales disponen en el régimen de arranque detectores proporcionales de neutrones BF3 y cámaras de ionización de fisión (CF) respectivamente. Su determinación se basó en el modelo no paralizante del detector. Se utilizó como fuente de neutrones al reactor que varía en el tiempo de manera exponencial luego de una pequeña inserción de reactividad positiva. El ajuste no lineal al modelo permitió la determinación de los tiempos muertos mediante la minimización de la función Chicuadrado. Los valores obtenidos fueron, BF3: $19,96 \times 10^{-6} \text{ s} \pm 0,02 \times 10^{-6} \text{ (s)}$ y CF: $2,52 \times 10^{-6} \text{ s} \pm 0,01 \times 10^{-6} \text{ s}$.

Abstract

In this work the measurement of the dead time of the neutron detection initiation chains of the RP-0 and RP-10 nuclear reactors is presented. Those reactors have proportional detector (BF3) and ionization chamber fission (CF) respectively. The determination is based on the model non-paralizable detector. The reactor varies on time in an exponential way right after a little insertion of positive reactivity and it was used like a source of neutrons. The nonlinear adjustment to the model allowed the determination of the dead time through minimization of the Chi square. The obtained values were BF3: $19.96 \times 10^{-6} \text{ s} \pm 0.02 \times 10^{-6} \text{ s}$ and CF: $2.52 \times 10^{-6} \text{ s} \pm 0.01 \times 10^{-6} \text{ s}$.

1. Introducción

El control de la operación de un reactor nuclear se realiza desde una consola mediante cadenas nucleares que observan la evolución de la población neutrónica y la limitan mediante las barras de control. El “ojo” electrónico que “ve” la población neutrónica la constituyen los detectores, que mediante reacciones nucleares, nos dicen de la presencia y cantidad de neutrones en el medio, o en el núcleo. La población neutrónica registrada por el escalímetro de las cadenas de arranque, en algunos experimentos es un dato importante. Entonces, es necesario conocer el tiempo muerto de los detectores correspondientes. En este trabajo se mide los tiempos muertos para las cadenas de arranque en los reactores RP-0 y RP-10, mediante el modelo no paralizante de detectores y metodologías de ajuste a funciones no lineales en los parámetros. Estas metodologías son un tanto experiencia y arte.

2. Marco Teórico

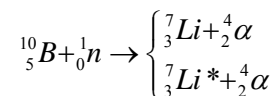
2.1 Detección de neutrones

Los neutrones en un reactor nuclear se suelen clasificar según su energía, en térmicos

menores que 0,1 eV, rápidos mayores que 1 MeV y los intermedios entre estas dos cotas.

En reactores como el RP-0 y RP-10, la mayor cantidad de fisiones se producen con neutrones térmicos; por esa razón, los detectores deben estar orientados a su vigilancia, se les denominan detectores de bajas energías [2].

Como los neutrones no poseen carga, su detección es indirecta, a través de reacciones nucleares, las cuales pueden generar subproductos como partículas cargadas (electrones, alfas, fragmentos de fisión). Las reacciones más usadas en este rango de energías son las correspondientes al Boro, Helio y Uranio. Que luego se convierten en los detectores de BF3 (trifloruro de boro, utilizado en el reactor RP-0), Helio 3 (utilizado en experimentos) y cámaras de fisión (utilizado en el reactor RP-10). Para el caso de la cadena de arranque del RP-0, la reacción nuclear empleada es:



* Correspondencia autor: azuniga@ipen.gob.pe

La primera deja la reacción en el estado fundamental con $Q=2,792$ MeV y la segunda en algún estado excitado con $Q=2,310$ MeV.

Para el caso de los neutrones térmicos, el 94 % conducen reacciones de estado excitado y solo el 6 % al estado fundamental. La sección transversal para estos neutrones es de 3840 barns, su uso se sustenta en la facilidad de disponer B10 altamente enriquecido. En la naturaleza solo hay 19.8 %.

2.2 Tiempo muerto

Los detectores pueden ser de dos tipos, en función a como tratan el tren de radiaciones que les llega, el paralizable y no paralizable, para el caso del RP-0, se sigue el segundo comportamiento. Durante intervalo de tiempo el detector está procesando la información recibida cualquier radiación que llegue en ese lapso, no va a ser colectada (detectada) por lo que se considera perdida. Este tiempo denominado tiempo muerto, debe ser determinado para recuperar el número de radiaciones reales que están llegando al detector. Esa pérdida debe ser añadida al valor leído (m) y con ello se puede corregir y determinar el valor real (n). La relación básica para estos detectores es:

$$m(t) = \frac{n(t)}{1+n\tau}$$

Donde:

n : número de partículas que ingresan al detector por unidad de tiempo. (s^{-1})

m : número de cuentas leído en el Escalímetro por unidad de tiempo. (s^{-1})

τ : tiempo muerto del detector. (s)

2.3 Fuente de neutrones

La fuente de neutrones cuya intensidad permite observar el efecto del tiempo muerto en el detector fueron los reactores RP-0 y RP-10, que estando en el nivel crítico, súbitamente los hacemos crecer, mediante la extracción de una pequeña porción de barra de control, con lo que la población neutrónica evolucionará de forma exponencial, con una constante de crecimiento, α , con lo que la expresión que corresponde al número de partículas incidentes reales sobre el detector tendrá la forma:

$$n(t) = n_0 e^{\alpha t}$$

Donde, n_0 , representa el valor de la población neutrónica en el estado crítico. Con esta

expresión el modelo para los contajes medidos es:

$$m(t) = \frac{n_0 e^{\alpha t}}{1+n_0 e^{\alpha t} \tau}$$

Para la determinación del tiempo muerto, el método se reduce a utilizar los datos medidos y a partir de ellos ajustar a la función no lineal expuesta y obtener los parámetros incorporados.

Es lógico que queden pendientes algunos parámetros como la eficiencia del detector. También es probable que durante la operación no podamos mantener la evolución exponencial para una sola inserción de reactividad, por lo que se tendrá que intentar mantener esta forma mediante pulsos de inserción de reactividad positiva.

3. Desarrollo Experimental

Los dispositivos electrónicos que constituyen la cadena de arranque son: el detector, el alta tensión, preamplificador, amplificador – conformador, discriminador, Impulsímetro, Escalímetro (Figura 1).



Figura 1. Módulos de la cadena de arranque del reactor RP-0 desde mesa de control.

El procedimiento seguido en el experimento fue el siguiente:

- Se asegura que la cadena nuclear del reactor para el arranque esté en condiciones óptimas de operatividad.
- El reactor se pone a crítico para una población neutrónica no superior a 10 000 cuentas por segundo. Se recomienda 3000 cuentas.
- Se registran todas las condiciones de operación (posición de barras de control, tiempo de inicio).
- Se toman datos de la población neutrónica de inicio (crítico).
- Para facilitar la toma de datos se incrementa en el escalímetro el intervalo de

tiempo de colección estableciéndose 2 segundos.

f) Se inserta una pequeña reactividad positiva correspondiente a un período positivo de unos 100 segundos, o un valor de 10 pcm.

g) Se inicia la colección del contejo cada 2 segundos hasta un valor aproximado de 90 000 cuentas por segundo.

h) Se grafican los resultados, de contejos registrados versus tiempo, para luego realizar el análisis de datos correspondiente.

Nota:

Si el reactor no puede mantenerse evolucionando después de esa inserción de reactividad entonces se debe pulsar la barra de manera que esta no decaiga.

4. Resultados

4.1 Visualización de datos

Los datos se obtuvieron por cada dos segundos, los que para el análisis se llevaron a un segundo (por división simple) y el error correspondiente para cada dato se determinó a través de la estadística de Poisson (raíz cuadrada de cada valor). En las Figuras 2 y 3 (para el RP-0), 4 y 5 (para el RP-10) se representan los datos obtenidos a escala lineal y logarítmica, respectivamente, a fin de ver el comportamiento de dicha población con el tiempo, particularmente lineal para tiempos iniciales.

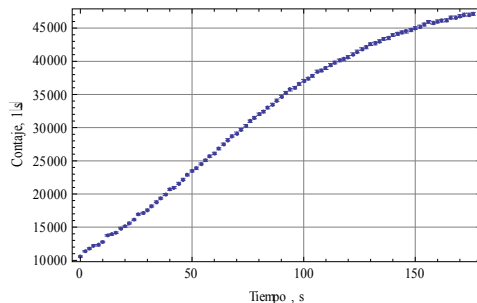


Figura 2. Datos obtenidos durante el experimento, para el caso del detector BF3 (RP-0), las lecturas provienen del Escalímetro en intervalos de 1 segundo.

4.2 Análisis de datos

Para realizar la búsqueda de los mejores valores de los parámetros (n_0, α, τ) , emplearemos el principio de máxima verosimilitud, que conduce a la minimización de la función Chicuadrado, dada por:

$$\chi^2(n_0, \alpha, \tau, t) = \sum_{i=1}^N \frac{(m(t_i) - \frac{n_0 e^{\alpha t_i}}{1 + n_0 e^{\alpha t_i} \tau})^2}{\sigma_i^2}$$

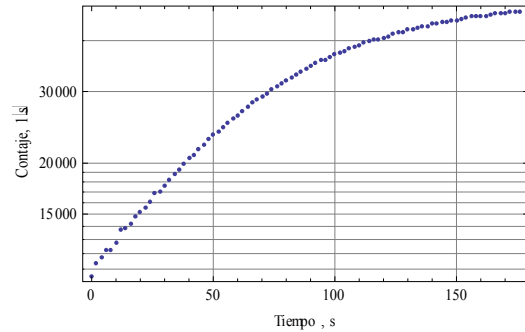


Figura 3. Datos en escala semilogarítmica correspondiente al BF3 (RP-0).

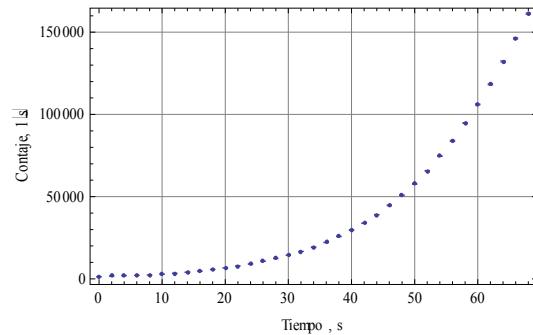


Figura 4. Datos obtenidos durante el experimento, para el caso de la cámara CF1 (RP-10), las lecturas provienen del Escalímetro en intervalos de 1 segundo.

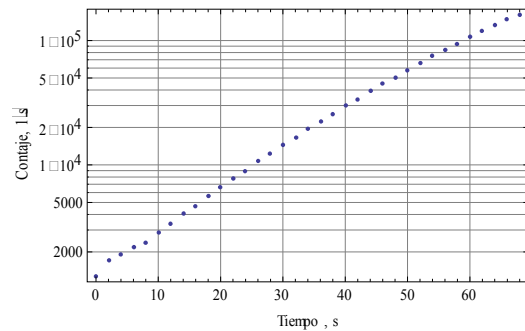


Figura 5. Datos en escala semilogarítmica correspondiente a la CF1 (RP-10).

Para determinar el error de cada parámetro se utiliza la propiedad cuadrática de la función Chicuadrado alrededor del valor del parámetro que minimiza dicha función.

$$\chi^2(a_j) = \frac{(a_j - a_j')^2}{\sigma_j^2} + C$$

Dónde el mínimo ocurre en a_j' . Esta propiedad en términos operativos nos dice que si logramos identificar el valor que minimiza la función chicuadrado, y hacemos variar el parámetro en una unidad, entonces la magnitud de la separación será justamente, el error del parámetro, σ_j .

La otra propiedad que utilizamos es la obtención de una parábola dado tres puntos separados la misma distancia, esto es: un valor mayor (χ_1), el siguiente menor (χ_2), y el siguiente mayor (χ_3), para tres valores del parámetro, con ello aseguramos que el mínimo local está entre ellos. Las relaciones básicas del mínimo y el error son:

$$a_j' = a_{j3} - \Delta a_j \left[\frac{\chi_3^2 - \chi_2^2}{\chi_1^2 - 2\chi_2^2 + \chi_3^2} + \frac{1}{2} \right]$$

$$\sigma_j = \Delta a_j \sqrt{2(\chi_1^2 - 2\chi_2^2 + \chi_3^2)^{-1}}$$

Igualmente, la incertidumbre puede determinarse a partir de la segunda derivada de la relación cuadrática, antes presentada:

$$\sigma_j^2 = 2 \left(\frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_j^2} \right)^{-1}$$

En las tablas del Chicuadrado se acostumbra presentar en valores del Chicuadrado reducido, definido como:

$$\chi_v^2 = \frac{\chi^2}{v}$$

Donde:

$v = (N-p)$ grados de libertad.

N : número de puntos.

p : número de parámetros.

4.3 Búsqueda de parámetros

El esquema de trabajo será el siguiente:

- P1) Se dan valores iniciales a los parámetros.
- P2) Se determina el valor de Chicuadrado.
- P3) Se escoge a uno de los parámetros como variable y los otros dos se mantienen constantes.
- P4) Se incrementa el valor del parámetro variable.
- P5) Se determina el valor del Chicuadrado.
- P6) Se compara con el valor anterior (P2 – P5).
- P7) Si el valor es positivo se hace un nuevo incremento y se continúa como el paso P4.
- P8) Si el valor es negativo, entonces se para.
- P9) Se fija este parámetro.
- P10) Se escoge un nuevo parámetro como variable y se reinicia desde el paso P3.
- P11) Siguiendo los pasos anteriores se logra determinar los tres valores que minimizan Chicuadrado.

P12) Para cada valor del parámetro óptimo se escogen tres valores espaciados similarmente que son mayor (χ_1), menor (χ_2) y mayor (χ_3).

P13) Se determina el mínimo del parámetro.

P14) Se determina el valor del Chicuadrado en el mínimo.

P15) Se determina el valor del parámetro que incrementa el Chicuadrado en 1.

P16) Se hace la diferencia del valor de Chicuadrado del paso P13 del P15.

P17) Se determina el error del parámetro.

Para estimar los valores de inicio en la búsqueda de la minimización, se comienza asumiendo que para los tiempos cercanos al inicio del experimento los datos suben exponencialmente, se considera así los primeros puntos (14 a los 38 segundos). En un gráfico semilogarítmico se comportan de manera lineal (Figura 6) para el caso del RP0. Igual, procedimiento se realiza para el RP10. Luego de un ajuste lineal la población neutrónica evoluciona según las expresiones siguientes (BF3:RP0 y CF1: RP10):

$$\text{BF3: } 9.32515 + 0.151792 t$$

$$\text{CF1: } 7.25075 + 0.07707 t$$

El intercepto en escala lineal podría representar el valor inicial de n_0 ($=E^{9.32515} = 11216.6$ y $E^{7.25075} = 1409.16$), y la pendiente el parámetro α ($=0.0151792$ y 0.07707). Y como valor de inicio del tercer parámetro, τ , asumimos ($=0.000001$ s).

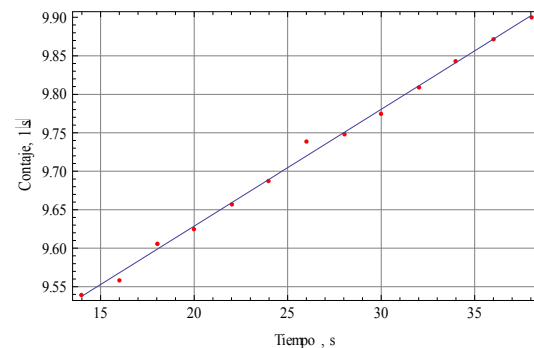


Figura 6. Variación de los datos exponencial al inicio de la evolución, para el BF3. Cuando se grafican sus logaritmos, entonces la respuesta es una recta.

Para facilitar el trabajo se construye una función del Chicuadrado en función de los parámetros, con ella se irá variando los valores de alguno de ellos y la respuesta se comparará con las anteriores:

$$\chi^2(a1_ , a2_ , a3_) = \sum_{i=1}^N \frac{(m(t_i) - \frac{a1 e^{a2 t_i}}{1 + n a1 e^{a2 t_i} a3})^2}{\sigma_i^2}$$

Con esta función y los valores iniciales de los parámetros el valor del Chicuadrado inicial resulta:

$$\chi^2[11216.1, 0.0151792, 0.000001] = 2.18227 \times 10^6$$

$$\chi^2[1409.16, 0.07707, 0.000001] = 48044.3$$

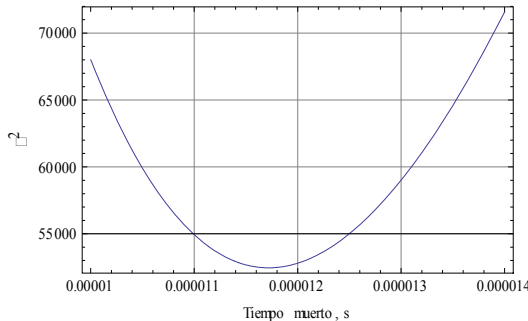


Figura 7. Determinación del parámetro variable, τ , que minimiza la función χ^2 , mientras que los otros parámetros se mantienen fijos. Para el caso BF3.

Como era de esperarse son valores extremadamente grandes, por lo que con la variación de los parámetros buscaremos minimizarla. Comenzamos la minimización escogiendo arbitrariamente como variable al parámetro a3 (tiempo muerto), mientras que los otros parámetros (a1 y a2) se mantienen fijos.

Luego procedemos a incrementar el valor del parámetro a3, que reducen el valor del χ^2 hasta un mínimo, como se observa en la Figura 7.

Valor del parámetro a3* que minimiza χ^2

Para determinar el valor del parámetro, a3*, que minimiza χ^2 , procedemos a determinar tres valores que cumplan la condición del método (uno mayor, otro menor y el siguiente mayor), separados en pasos iguales, $\Delta a3$:

BF3:

$$\chi^2_{31} = \chi^2[0.0000116] = 52524.8$$

$$\chi^2_{32} = \chi^2[0.0000118] = 52489.3$$

$$\chi^2_{33} = \chi^2[0.0000120] = 52803.4$$

CF1:

$$x1 = \chi^2[0.00000251] = 274.077$$

$$x2 = \chi^2[0.00000252] = 272.287$$

$$x3 = \chi^2[0.00000253] = 273.554$$

Considerando que ellas siguen una función cuadrática alrededor del mínimo, entonces

podemos ajustarla a una parábola y determinar su mínimo, que para el caso fue (Figura 8):

BF3: $a3^* = 11.72041 \times 10^{-6} \text{ s}$
 CF1: $a3^* = 2.52086 \times 10^{-6} \text{ s}$

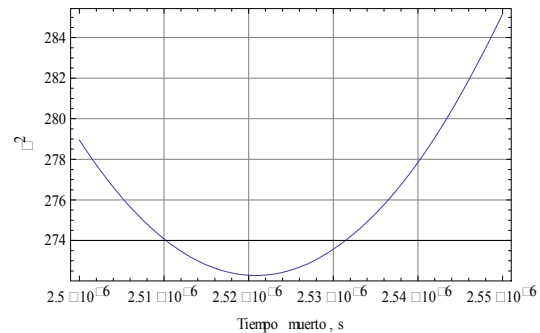


Figura 8. Determinación del parámetro variable, τ , que minimiza la función χ^2 , mientras que los otros parámetros se mantienen fijos. Para el caso CF1.

Valor de la incertidumbre de a3*

Para determinar la incertidumbre de a3*, incrementamos a3, hasta que el valor de $\chi^2(a1, a2, a3)$ se incremente en uno respecto a $\chi^2(a1, a2, a3^*)$, si esto ocurre, entonces el desplazamiento en a3, habrá sido exactamente σ_{a3^*} :

BF3: $\sigma_{a3^*} = 1.41 \times 10^{-8} \text{ s}$
 CF1: $\sigma_{a3^*} = 5.38 \times 10^{-8} \text{ s}$

El resultado del parámetro a3 (tiempo muerto, τ) en esta primera corrida resultó:

BF3:

$$\tau = 11.72 \text{ microsegundos}$$

$$\sigma_\tau = 0.01 \text{ microsegundos}$$

CF1:

$$\tau = 2.47 \text{ microsegundos}$$

$$\sigma_\tau = 0.05 \text{ microsegundos}$$

Repetimos este procedimiento para los dos parámetros restantes y los resultados correspondientes para el parámetro a2 fueron:

BF3:

$$\alpha = 0.0156 \text{ s}^{-1}$$

$$\sigma_\alpha = 0.0002 \text{ s}^{-1}$$

CF1:

$$\alpha = 0.07720 \text{ s}^{-1}$$

$$\sigma_\alpha = 0.00002 \text{ s}^{-1}$$

Y para el parámetro a1:

BF3:

$$n_0 = 12475$$

$$\sigma_{n_0} = 14$$

CF1:

$$n_0 = 1420.08$$

$$\sigma_{n_0} = 1.54$$

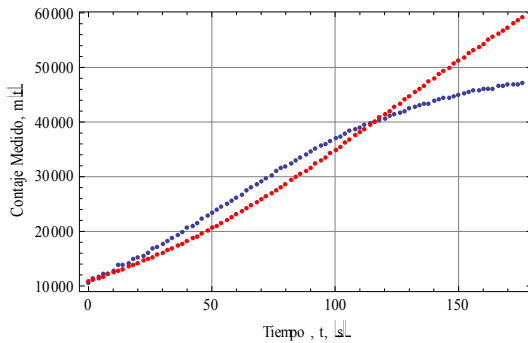


Figura 9. Comparación, para el caso BF3, entre los valores medidos (azul) con los valores del modelo para los parámetros obtenidos (rojo). Se observa bastante divergencia.

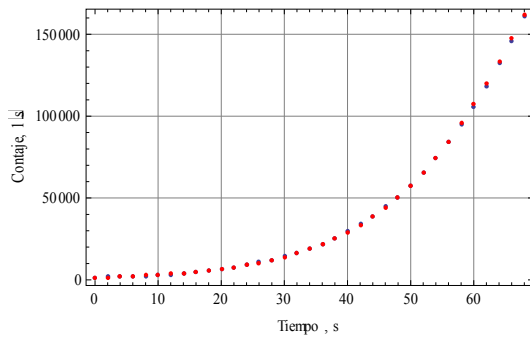


Figura 10. Comparación, para el caso CF1, entre los valores medidos (azul) con los valores del modelo para los parámetros obtenidos (rojo). Se observa bajísima discrepancia.

Valor del Chicuadrado reducido

Con el fin de evaluar si el ajuste estuvo bueno, determinamos el valor del Chicuadrado reducido (χ^2_v), para los valores obtenidos, resultando:

$$\text{BF3: } \chi^2_v = 482.51$$

$$\text{CF1: } \chi^2_v = 9.61$$

Este valor resulta bastante grande para el BF3, pero no para el caso CF1. Por lo que el ajuste para el primer caso debe mejorarse y si se puede también para el segundo. La comparación de los datos medidos y provenientes del modelo, se muestra en la Figura 8.

5. Discusión de resultados

a) En primer lugar tratamos de modificar los parámetros a_1 , a_2 , y a_3 , de manera que se logre un menor valor de χ^2_v ; esto se logra si los parámetros son:

$a_1 = 14000$, $a_2 = 0,023 \text{ s}^{-1}$, $a_3 = 0,00002 \text{ s}$
con valor del Chicuadrado reducido:

$$\chi^2_v = 1,228$$

Este valor para los grados de libertad 86 correspondiente representa un valor mucho mejor, y por ende un mejor ajuste, el cual se observa en el comportamiento de los valores medidos y ajustados mostrados en la Figura 11.

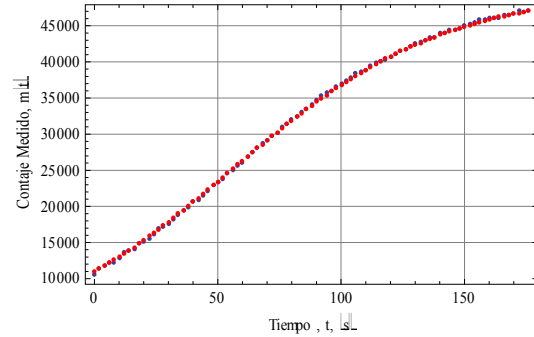


Figura 11. Comparación entre los valores medidos (azul) con los valores ajustados (rojo), para la segunda corrida, observando una mejor aproximación, alcanzado el valor de $\chi^2_v=1.23$.

b) Se puede ir disminuyendo χ^2_v , en una corrida adicional con lo que se obtuvieron los valores siguientes:

$$n_0 = 13923$$

$$\sigma_{n_0} = 24$$

$$\alpha = 0.02298 \text{ s}^{-1}$$

$$\sigma_\alpha = 0.00003 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau = 0.00001996 \text{ s}$$

$$\sigma_\tau = 0.00000150 \text{ s}$$

Y el valor del Chicuadrado reducido de:

$$\chi^2_v = 1.022$$

El cual refleja el mejor ajuste. Por lo que los valores recomendables obtenidos son estos últimos. La comparación se presenta en la Figura 12.

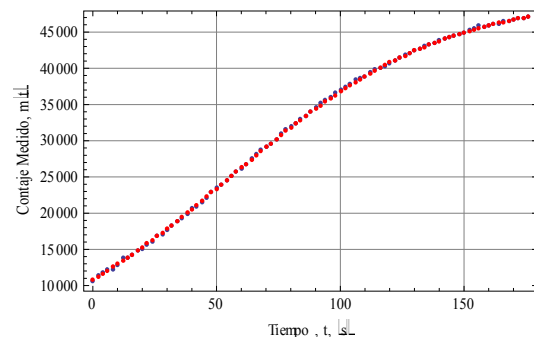


Figura 12. Comparación, para el caso BF3, de los resultados medidos con el modelo obtenido, para el valor del Chicuadrado reducido de $\chi^2_v=1.02$.

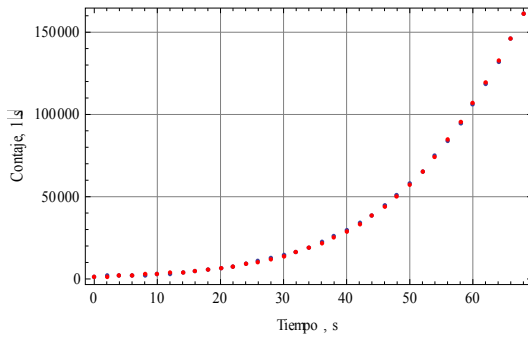


Figura 13. Comparación, para el caso CF1, de los resultados medidos con el modelo obtenido, para el valor del Chicuadrado reducido de $\chi_v^2=8.50$.

c) Para el caso del RP-10 se hizo lo propio pero el valor no se redujo, obteniéndose finalmente (Figura 13):

$$n_0 = 1420.48$$

$$\sigma_{n_0} = 1.54$$

$$\alpha = 0.07720 \text{ s}^{-1}$$

$$\sigma_\alpha = 0.00002 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau = 0.00000252 \text{ s}$$

$$\sigma_\tau = 0.0000001 \text{ s}$$

$$\chi_v^2 = 8.50$$

d) De acuerdo con el modelo el tiempo muerto está presente desde el inicio del experimento, independiente del tren de radiaciones que llegue. Así para el tiempo $t=0$, el valor real ($n(0)$), correspondiente al medido, $m(0)$, puede ser determinado de dos maneras: la primera a partir del valor medido, y la segunda a partir del valor ajustado. Para ello las relaciones que se utilizan son:

$$n(t) = \frac{m(t)}{1 - m(t)\tau}$$

Donde $m(0)$, usando el modelo del artículo y los parámetros obtenidos resulta:

$$m(0) = \frac{n_0}{1 + n_0\tau}$$

A modo de ejemplo para el caso del RP-0:

$$m(0) = 10\,895.3$$

Mientras que el leído en los datos es:

$$m(0) = 10\,567.5$$

Para estos dos valores los correspondiente $n(0)$ resultan:

$$\text{Modelo: } n(0) = 13923.0$$

$$\text{Datos: } n(0) = 13392.3$$

La corrección alcanza el 28 %.

Esto, también, puede entenderse como que el detector presenta una corrección por tiempo muerto de casi 30% para la intensidad de 10 mil cuentas por segundo.

e) La expresión para la corrección de datos por tiempo muerto en la cadena de arranque viene dada por la expresión:

$$n(t) = \frac{m(t)}{1 - m(t)\tau}$$

f) El cuanto al segundo parámetro, α , que corresponde a la tasa de crecimiento exponencial. Tiene significado físico cuando se refiere al modelo de reactor puntual de la cinética de reactores, en cuyo caso representaría la raíz principal de la ecuación inhour, y por ende el inverso del período, que a su vez tiene que ver con el valor de la inserción de reactividad positiva inyectada al sistema. Los períodos de evolución de acuerdo con el experimento son:

$$\text{Período} = 1/\alpha = 43.52 \text{ s : (RP0)}$$

$$\text{Período} = 1/\alpha = 12.95 \text{ s : (RP10)}$$

Para los operadores del reactor este valor es demasiado pequeño, teniendo en cuenta que se levantó el reactor tratando de mantener un período entre 80 y 100 segundos. La explicación podría ser que este período es un valor representativo de todos los períodos que se podrían haber generado debido a que durante el experimento el operador trató de mantener el período constante, mediante la introducción y extracción de pequeñas (pulsos) porciones de barra de control, lo que habría impedido se alcance el régimen de evolución exponencial requerido en el modelo. Por eso el parámetro representaría un período promedio de todos estos valores posibles generados durante las pulsaciones.

g) En cuanto al tercer parámetro, que es el objetivo del experimento, el tiempo muerto, τ , para el caso del RP-0 resultó 20,0 microsegundos (19,96). Mientras que para el RP-10 se obtuvo 2,52 microsegundos. De esa comparación diríamos que las cámaras de fisión son más rápidas en su respuesta.

h) La medición es una respuesta global de la cadena (detector más cadena electrónica), por lo que podríamos decir que habría una parte del tiempo muerto debido al detector, τ_D , y otro el correspondiente a la electrónica (todo diferente al detector), τ_E . En el primero la

influencia sería debido a la geometría del detector, composición de la sustancia que llena el detector y voltaje de trabajo. El correspondiente al tiempo muerto electrónico, sería las etapas de preamplificación, amplificación. Es posible que este valor pueda ser medido excluyendo al detector, mediante un generador de pulsos, con capacidad de variar su frecuencia a los órdenes que se haga notorio este efecto.

i) Finalmente el modelo utilizado se sustenta en que el tiempo muerto es constante, si se mantiene el voltaje de trabajo, el tamaño y composición del gas y otros componentes y está presente desde que llega la primera radiación, pero su efecto se hace más notorio cuando se incrementa la intensidad de radiaciones que llega al detector y posteriormente a la colección y extracción de la carga, por lo que las correcciones se hacen indispensables para mayores contajes. También hemos asumido que ambos detectores CF y BF3 son no-paralizables.

j) En la Figura 14 se observa que los factores que inciden en la determinación del tiempo muerto de la cadena de arranque del RP0,

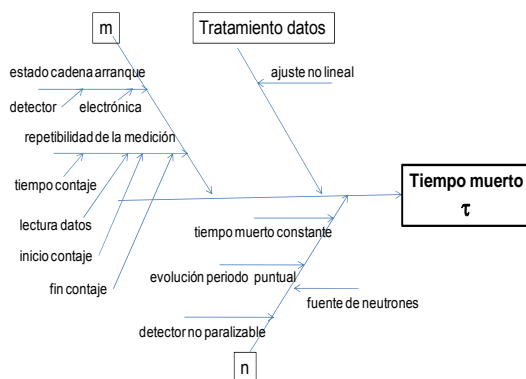


Figura 14. Esquema de fuentes de incertidumbre en la determinación del tiempo muerto según el experimento propuesto.

6. Conclusiones

a) El modelo propuesto se basa en hipótesis que pueden ser discutibles: 1) el detector no paralizabile, con tiempo muerto constante; 2) la evolución de la población de neutrones del reactor sigue una función exponencial en el tiempo. De ellos el más discutible podría ser la segunda hipótesis, la misma que presenta su mayor debilidad en mantener una evolución constante con una sola inserción de reactividad y no estar pulsando repetidas veces.

b) Considerando que el tiempo muerto depende exclusivamente del detector, esta medición no podría realizarse con una fuente de pulsos cuya frecuencia fuera variable.

c) Con relación a la metodología de ajuste empleado podría mejorarse haciéndolo más automático o utilizando programas instalados. Sin embargo se debe tener clara la metodología para poder comparar con paquetes ya implementados.

d) El contaje de datos mejoraría si la colección se realiza de manera automática mediante un multicanal que dispusiera el modo MCS. Al inicio del contaje convendría trabajar con menores cuentas, tal como 3 mil por segundo.

7. Referencias

- [1]. Bevington Philip. Data reduction and error analysis for the physical sciences. 1992.
- [2]. Knoll G. Radiation detection and measurement. John Wiley, Capítulo 3, 1989.
- [3]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informes de instrumentación nuclear, RP-10. [Informe Interno]; 1989.
- [4]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informes de instrumentación nuclear, RP-0. [Informe Interno]; 1989.
- [5]. Zuñiga A., Notas de Tratamiento Estadístico de Datos, UNI, 1999.
- [6]. Zuñiga A., Tratamiento de datos: FER-INST, IPEN, 2008.
- [7]. Deming W.E., Statistical Adjustment of Data, Dover, 1964.
- [8]. Lyons L., Data Analysis for Physical Science Students: A Practical Guide, Cambridge University, 1996.
- [9]. Meyer S.L., Data Analysis for Scientists and Engineers, John Wiley, 1975.
- [10]. Evans RD. The Atomic Nucleus, McGraw-Hill, Capítulos 26, 27, 28, 1955.