

# APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE RUIDO NEUTRÓNICO EN SUBCRÍTICO UTILIZANDO UN NUEVO SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Bellino P.A.<sup>(1)</sup> – Gómez A.<sup>(2)</sup>

*Física Experimental de Reactores – Centro Atómico Constituyentes – CNEA*

## RESUMEN

Un nuevo sistema de adquisición de datos fue construido y programado, con el fin de poder estimar parámetros cinéticos nucleares en un reactor subcrítico. Dicho sistema permite aplicar cualquiera de las técnicas de ruido neutrónico, ya que logra almacenar toda la información brindada por la cadena de detección. Se aplicaron los métodos de  $\alpha$ -Rossi,  $\alpha$ -Feynman y el análisis espectral para la estimación de la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos (y por lo tanto de la reactividad). Las mediciones se realizaron en el reactor de investigación RA-1, donde se lograron distintos niveles de subcriticidad (hasta los -7 dólares) introduciendo las barras de control. Los tres métodos arrojaron estimaciones concordantes con la reactividad de referencia en cada nivel, incluso cuando la eficiencia del detector era baja. Todas las mediciones se realizaron con un alto flujo de radiación gamma, a pesar de lo cual los resultados fueron satisfactorios.

## 1. INTRODUCCIÓN

La técnica de ruido neutrónico, es una herramienta ampliamente utilizada para la estimación de parámetros cinéticos en reactores nucleares [1]. Todos los métodos que utilizan la técnica de ruido están basados en el mismo principio: analizar las fluctuaciones neutrónicas que se producen debido al proceso de fisión, y obtener de ellas la información relevante sobre la cinética del proceso multiplicativo. Entre todos los parámetros de interés, el de mayor importancia es la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha$ ), ya que se relaciona directamente con la reactividad y por lo tanto interviene en los análisis de seguridad concernientes a la criticidad.

En los últimos años se ha volcado gran parte de la atención sobre los reactores avanzados ADS, que ya eran conocidos en teoría desde los comienzos de la era nuclear. Estos reactores tienen la característica de ser intrínsecamente subcríticos, y ser alimentados por medio de una fuente de neutrones externa. Debido a estas características, la técnica de ruido neutrónico es la principal herramienta para estudiar la cinética de estos nuevos reactores, como así también una forma de monitorear su grado de subcriticidad.

Por otra parte, las mediciones en subcrítico no están acotadas a los reactores nucleares, sino que sirven en presencia de cualquier tipo de medio multiplicativo. En particular, esta técnica es utilizada para el monitoreo de subcriticidades en instalaciones de almacenamiento de combustible gastado, como así también en todo el proceso de fabricación de combustibles, o en el recambio y rotación de combustibles en una central nuclear. De esta manera, se asegura que durante todo el proceso, la subcriticidad se mantenga por debajo de la norma permitida y evitar accidentes de criticidad.

---

<sup>(1)</sup> [pbellino@cnea.gov.ar](mailto:pbellino@cnea.gov.ar) <sup>(2)</sup> [angomez@cnea.gov.ar](mailto:angomez@cnea.gov.ar)

Debido a las bondades que poseen las técnicas de ruido neutrónico, en el presente trabajo se mejoró y continuó con el desarrollo de un sistema de medición de pulsos para configuraciones subcríticas, dentro de la propuesta y plan de trabajo realizado anteriormente [2]. La principal mejora del sistema de adquisición consistió poder registrar el tiempo de llegada de cada pulso proveniente del detector; por consiguiente, toda la información de la cadena de medición es almacenada. Esto permite que en un procesamiento posterior, puedan aplicarse cualquiera de las técnicas de ruido neutrónico existentes. Adicionalmente, se logró reducir el intervalo temporal para realizar las mediciones de  $\alpha$ -Feynman, pasando de 1 ms con el sistema de adquisición anterior, a 20  $\mu$ s con el actual. Usualmente, estas técnicas de medición en subcrítico se realizan con multicanales en modo tiempo, y sólo permite adquirir contaje en un dado intervalo temporal. Por otro lado, es necesario un multicanal por cada cadena de detección si se quiere trabajar con más de un detector. Contrariamente, el nuevo sistema de medición permite trabajar hasta con tres cadenas de detección en simultáneo, sin agregar componentes electrónicos, lo que lo hace más sencillo de sincronizar y abarata considerablemente su costo.

Se han analizado los tres métodos más utilizados en subcrítico:  $\alpha$ -Rossi,  $\alpha$ -Feynman y el análisis en frecuencia. Las mediciones fueron realizadas en el reactor de investigación RA-1, para distintos grados de subcriticidad y con distintas posiciones del detector. Se hicieron comparaciones entre los tres métodos usados para las distintas eficiencias absolutas del detector, y con subcriticidades de hasta -7 dólares. Por otro lado, también se hicieron comparaciones con las mediciones realizadas en un trabajo anterior con otro sistema de medición como forma de verificar la correcta adquisición y procesamiento de datos. A su vez, todos los niveles de subcriticidad fueron medidos independientemente por el método de rod-drop, y dichos valores fueron tomados como referencia para las comparaciones.

## 2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos consistió en una tarjeta PCI marca National Instruments modelo PCI 6602 y una computadora industrial (Pentium 4, 3.0 GHz, 512 Mb). La tarjeta PCI sirve para contar pulsos con una resolución de 32 bits y con 8 canales de entrada. Tres de ellos pueden funcionar en modo DMA para la transferencia de datos a la CPU, mientras que el resto en modo Interrupción, esto último, como se verá, tendrá importancia a la hora de caracterizar las limitaciones del sistema de medición. Posee además una memoria FIFO interna de 16 datos con 32 bits por cada canal DMA, en donde se almacenan los datos antes de ser transferidos a la memoria RAM de la CPU (ver **Figura 01**). La transferencia se efectúa a través del BUS de la CPU, por lo cual, si la transferencia no es lo suficientemente rápida, los datos almacenados en la memoria FIFO serían sobre-escritos, dando como resultado la irrecuperable pérdida de información.

La tarjeta contadora fue manejada a través de un software programado en LabView, que permitió adquirir y almacenar los datos para su posterior procesamiento. La utilización de este lenguaje de programación se escogió debido a la flexibilidad que ofrece cuando se trabaja con grandes velocidades de transferencias de datos, ya que permite desacoplar los tiempos de adquisición, con los tiempos de escritura y evitar de esa forma la sobre-escritura de datos [3].

Existen dos formas alternativas de realizar la adquisición de datos: una de ellas es simulando un multicanal, donde se adquiere la cantidad de pulsos en un dado intervalo temporal; mientras que la otra consiste en realizar adquirir directamente del tiempo de llegada de cada uno de los pulsos provenientes de la cadena de medición.

La primera forma de adquisición se realizó para comparar con las mediciones antiguas donde se había adquirido de esta forma. En la **Figura 02 a)** se muestra el manera en que se programó la tarjeta para medir la cantidad de pulsos que llegan en un dado intervalo de tiempo  $T_0$ . Primero es necesario crear una señal cuadrada, de periodo  $T_0$ , que será utilizada como GATE de la medición. Esta señal puede ser creada en alguno de los canales libres que posee la tarjeta, y posteriormente direccionada (internamente) al canal en donde se realiza la medición. La señal de pulsos TTL proveniente de la cadena de medición actúa como RELOJ del contador, dando como resultado que con cada subida de flanco del GATE, el contador escribe en el buffer (memoria FIFO) el valor que lleva acumulado hasta entonces. Luego de que esto suceda, el contador automáticamente comienza a contar los pulsos de cero hasta detectar una nueva subida de flanco del GATE.

Por otro lado, la segunda forma de adquirir los datos, consiste en medir directamente el tiempo de llegada de los pulsos, de esta manera se obtiene un registro completo de los pulsos que fueron detectados en el detector. La forma de adquirir se esquematiza en la **Figura 02 b)**. Allí puede verse que la señal proveniente del detector es utilizada como GATE, mientras que la señal utilizada como SOURCE corresponde a la señal del reloj interno de la tarjeta. Este reloj interno puede funcionar a 80 MHz, dando un periodo de 12.5 ns que será precisamente la mínima resolución del contador. El contador incrementará su valor continuamente (a una velocidad de 1 pulso por cada 12.5 ns) y sólo cuando llegue un pulso del detector se escribirá dicho valor en el buffer de la tarjeta. Debido a que el contador posee una resolución de 32 bits, el máximo número de conteo que podrá registrar el contador corresponde a  $2^{32} \approx 4.3 \cdot 10^9$  luego, automáticamente comenzará de cero. Este defecto en la manera de contar es corregido posteriormente a través del software, ya que no produce un aumento del tiempo de procesado. Si bien, tal como se mencionó con anterioridad, la resolución del contador es de 12.5 ns, este valor es despreciable frente al tiempo muerto característico de las cadenas de medición utilizadas, aproximadamente igual a 1  $\mu$ s.

En la práctica, el factor condicionante para realizar la adquisición es la velocidad de transferencia de datos entre la tarjeta PCI y la PC, dada por la velocidad del BUS. La tasa de transferencia nominal máxima [4] para mediciones en forma continua es de 245 kS/s en modo DMA y de 76 kS/s en modo Interrupción. Efectuando pruebas con un generador de pulsos, se comprobó que con el sistema pueden realizarse mediciones confiables hasta las 300.000 cps durante un tiempo indeterminado, y para una tasa de cuenta de 1.000.000 cps el sistema realiza las mediciones sólo un par de segundos, produciendo luego una sobre-escritura del buffer, debido a que los datos están llenando el FIFO antes de que estos puedan ser transferidos a la memoria de la PC. A todos los fines prácticos, estas limitaciones de velocidades de transferencia no son un inconveniente, ya que en subcrítico la tasa de cuentas suele ser menor. En particular, la cadena ORTEC utilizada permite realizar mediciones sólo por debajo de las 100.000 cps.

### 3. Mediciones y procesamiento de datos

Para corroborar el buen funcionamiento del sistema de adquisición, se realizaron una serie de mediciones en el reactor de investigación RA-1 perteneciente a la CNEA. Este reactor posee elementos combustibles de  $^{235}\text{U}$  enriquecido al 20%, moderado y refrigerado con agua liviana. Si bien está pensado para operar a 40 kW en estado crítico, en todas las mediciones se lograron configuraciones subcríticas con reactividades hasta los -7 dólares, correspondiente al reactor con sus cuatro barras de seguridad insertadas.

En la **Figura 02** puede observarse la configuración del núcleo y la ubicación del detector y la fuente de neutrones utilizada. Se probó el sistema de medición con dos detectores (por separado) con sus respectivas cadenas de medición. Como fuente de neutrones se utilizaron fuentes de Am-Be de 500 mCi y de 5 Ci dependiendo de la medición realizada.

El primer sistema consistió en una cadena de medición CANBERRA 7820-ADS-7821-HT junto con un detector de  $^3\text{He}$  con una sensibilidad de 6 cps/nv. La cadena trabaja directamente con los pulsos de corriente, sin necesidad de utilizar un pre-amplificador. Los pulsos son amplificados y conformados, y por último se convierten a pulsos TTL en la salida. Esta cadena tiene la ventaja de poder medir a una alta tasa de conteo, y por sobre todas las cosas, permite una excelente discriminación de la radiación gamma. El segundo sistema de medición consistió en una cadena ORTEC con pre-amplificador y discriminador con salida TTL. El detector utilizado para esta cadena fue uno de  $\text{BF}_3$  con una sensibilidad de 11.3 cps/nv.

Debido a que el reactor RA-1 estuvo operando de forma continua a plena potencia (40 kW), las mediciones se realizaron con un fondo de radiación gamma apreciablemente grande. La tasa de exposición medida días antes de realizar estas experiencias, dio un resultado de 10.000 Roentgen/hora, en el reflector externo, a la altura del plano medio del núcleo del reactor.

Cada una de las series de mediciones realizadas, son ajustadas con sus respectivos modelos teóricos y de allí se estiman los parámetros de mayor interés. Vale aclarar que en todo momento se supondrá la aproximación del modelo puntual del reactor, y la aproximación instantánea. Bajo estas condiciones, la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos se escribirá como:

$$\alpha = \frac{\beta_{eff} - \rho}{\Lambda} = \frac{1 - \beta}{\Lambda^*} \quad (1)$$

donde  $\beta_{eff}$  es la fracción de neutrones retardados y  $\Lambda$  el tiempo entre reproducciones. Por otro lado, también es posible determinar la eficiencia absoluta del detector, definida como:

$$\varepsilon = \frac{R}{F} \quad (2)$$

siendo  $R$  la tasa de cuentas promedio y  $F$  la tasa de fisiones promedio que se producen en el núcleo.

### 3.1 Método de $\alpha$ -Rossi

El método de  $\alpha$ -Rossi se basa en medir la probabilidad condicional, definida como la probabilidad de detectar un neutrón en un intervalo  $dt_2$  alrededor del tiempo  $t_2$ , habiéndose detectado previamente un neutrón a un tiempo  $t_1$  en el intervalo  $dt_1$ . Definiendo esta probabilidad como  $p(\tau)dt_1dt_2$ , su expresión teórica resulta ser:

$$p(\tau)dt_1dt_2 = F\varepsilon dt_1dt_2 \left( F\varepsilon + \frac{\varepsilon D}{2\alpha\Lambda^2} e^{-\alpha\tau} \right) \quad (3)$$

donde  $D = \frac{\langle v(v-1) \rangle}{\langle v^2 \rangle}$  es el factor de Diven y  $\tau = t_2 - t_1$ .

En la práctica, para obtener esta probabilidad condicional se toma a cada pulso detectado como un disparador ( $t_1 = 0$ ), y se mide el tiempo  $\tau$  que tardan en llegar los pulsos sucesivos. En la **Figura 04** se muestra gráficamente el procedimiento para la medición. El tiempo máximo que se mide en cada disparo del detector será varias veces el tiempo característico de decaimiento  $1/\alpha$ . Si las mediciones temporales se realizan en un tiempo discretizado  $\Delta t$ , y si  $m$  es la cantidad de pulsos que se toman como disparadores, entonces la probabilidad condicional medida toma la expresión:

$$P(\tau) = \frac{p(\tau)}{m\Delta t} = R + \frac{\varepsilon D}{2\alpha\Lambda^2} e^{-\alpha\tau} \quad (4)$$

El primer término corresponde a la parte no correlacionada de la probabilidad, mientras que el segundo es el correspondiente a la parte correlacionada, de donde se obtiene la información relevante.

### 3.2 Método de $\alpha$ -Feynman

El método de  $\alpha$ -Feynman se basa en medir la estadística en el conteo en un dado intervalo temporal  $\tau$ , y analizar cómo se aparta de la distribución de Poisson, que es la que se obtendría en caso de no tener correlación entre los neutrones (ausencia del medio multiplicativo). Considerando que en un proceso Poissoniano la varianza es igual al valor medio, se define la magnitud  $Y(\tau)$  como el apartamiento antes mencionado:

$$Y(\tau) = \frac{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2}{\langle N \rangle} - 1 = \frac{\varepsilon D}{\alpha^2 \Lambda^2} \left( 1 - \frac{e^{-\alpha\tau}}{\alpha\tau} \right) - 2Rd \quad (5)$$

En la fórmula anterior, se ha utilizado la corrección por el tiempo muerto de la cadena de detección ( $d$ ). Esta corrección es indispensable realizarla, de lo contrario no se obtiene un ajuste adecuado de los datos medidos.

A los fines prácticos, el método de  $\alpha$ -Feynman requiere realizar mediciones a distintos valores de  $\tau$  (el valor máximo será de varias veces  $1/\alpha$ ). Sin embargo, en el presente trabajo se utilizó la técnica de agrupamiento [5] que consiste en realizar mediciones sólo para un valor de  $\tau = T_0$  suficientemente pequeño, y posteriormente sintetizar el resto de los  $\tau$  a partir del  $T_0$ . Esto es, sumando el conteo, se van creando los intervalos  $\tau = 2T_0, 3T_0, 4T_0, \dots$ . En la **Figura 05** se muestra el esquema de agrupamiento a partir de los datos medidos.

Por último, se hace notar que la **Ecuación (3)** también fue corregida para tener en cuenta el sesgo que se introduce al calcular la varianza debido al número finito de mediciones [6]. Este efecto se ve acentuado al utilizar la técnica de agrupamiento, en donde para cada  $\tau$  el número total de puntos es diferente, y por lo tanto la corrección varía punto a punto.

### 3.3 Análisis espectral

Esta forma de analizar los datos, consiste en estudiar el comportamiento en el dominio de frecuencia, de las fluctuaciones en la tasa de conteo neutrónica. La densidad espectral de potencia (PSD) se define como la transformada de Fourier de la auto-correlación neutrónica. Se puede demostrar [7], que dicha auto-correlación neutrónica está representada por la expresión:

$$C(\tau) = R\delta(\tau) + \frac{R\epsilon D}{2\alpha\Lambda^2} e^{-\alpha\tau} \quad (6)$$

que al ser transformada al dominio de frecuencias queda:

$$PSD(\omega) = R + \frac{R\epsilon D}{\alpha^2\Lambda^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2} \quad (7)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular y el resto de los parámetros involucrados fueron definidos anteriormente. El primer término corresponde a ruido blanco no correlacionado (delta de Dirac en la auto-correlación), mientras que el segundo es el término correlacionado de donde se obtienen los datos del  $\alpha$  y de  $\epsilon$ .

Experimentalmente, la forma de obtener la PSD es adquiriendo los datos en un dado intervalo temporal, que determinará la frecuencia de muestreo  $f_s$  de la adquisición. Si una parte de los tiempos de llegada de los pulsos, se necesita sintetizar con posterioridad el intervalo temporal seleccionado ( $T_0 = 1/f_s$ ) para obtener la serie temporal de datos. Una vez realizado este proceso, se procede a aplicar el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro de frecuencias, que luego será ajustado con la expresión dada por la **Ecuación (4)**. En la **Figura 06** se muestra en detalle cómo se realiza el proceso para obtener la PSD a partir de los datos temporales de los pulsos.

Cabe destacar que el análisis de frecuencia es realizado en la mayoría de las veces con un detector en modo corriente, como una cámara de ionización compensada; junto con un filtro anti-aliasing.

## 4. Resultados y discusiones

### 4.1 Comparación con el antiguo sistema

Las primeras series de mediciones corresponden a las realizadas con el objetivo de comparar este nuevo sistema de medición con el que se tenía anteriormente. Por lo tanto, se midió en forma de multicanal y sólo se procesaron los datos con el método de  $\alpha$ -Feynman. Se utilizó la cadena de medición CANBERRA, con el detector ubicado en el plano medio del núcleo, y la fuente de Am-Be en el núcleo, también sobre el plano medio. Se midió en tres estados subcríticos, correspondientes a reactividades de -7, -5 y -3 dólares aproximadamente. La tasa de conteo en cada uno de ellos fue de 63, 90 y 176 kcps respectivamente.

En la **Figura 07 a)** se muestra los gráficos del  $Y(\tau)$  medidos con sus respectivos ajustes. Se logró una buena concordancia entre la reactividad medida y la tomada como referencia, tal como lo muestra la **Tabla 01**. Se hace también evidente, a partir de dicho gráfico, el efecto que produce el tiempo muerto de la cadena de detección sobre las mediciones: a mayor tasa de conteo, toda la curva sufre un desplazamiento negativo, tal como se modeló en el último término de la **Ecuación (3)**.

En la **Figura 07 b)** se realiza la comparación entre la nueva medición, y la realizada con otro sistema de adquisición, en un estado subcrítico similar, con similares posiciones del detector y de la fuente [8]. Si bien el tiempo muerto obtenido es ligeramente distinto (ver **Tabla 01**), el resto de los parámetros coincidieron dentro del error experimental. En el gráfico también puede observarse la mejor resolución que posee la curva construida, gracias a poder tomar intervalos temporales de 50  $\mu$ s mientras que en la medición antigua, sólo se podía tomar hasta 1 ms debido a limitaciones en la adquisición.

### 4.2 Comparación entre los tres métodos

Las mediciones del tiempo de llegada de los pulsos permiten procesar los datos con cualquiera de los tres métodos de ruido neutrónico. Por tal motivo, se realizaron mediciones en un dado nivel de subcriticidad y se compararon los tres métodos. Este análisis se realizó para dos niveles de subcriticidad, utilizando dos cadenas de mediciones distintas, con distintas ubicaciones del detector (y por lo tanto, con distintas eficiencias absolutas).

La primera medición se realizó con la cadena ORTEC, con la fuente de Am-Be de 500 mCi en la parte inferior del núcleo y el detector de  $\text{BF}_3$  ubicado 15 cm por encima del plano medio del núcleo. La barra de control BC1 estuvo completamente introducida, mientras que el resto de las barras mantuvieron su configuración de crítico (BC2 = 100% BC3 = 39.2% BC4=100% de extracción). La reactividad de referencia para dicha configuración fue de  $\rho = -2.17$ . Se realizaron las mediciones del tiempo de llegada de los pulsos durante aproximadamente 10 minutos.

La **Figura 08** contiene a las curvas obtenidas al procesar los datos a través de los tres métodos. En la **Figura 08 a)** se muestra la distribución de  $\alpha$ -Rossi normalizado con la tasa de conteo  $R$ , y se observa el decaimiento exponencial gobernado por la constante  $1/\alpha$  de los neutrones instantáneos.

Para realizar el análisis en frecuencia, se agruparon los pulsos medidos en intervalos de 1 ms simulando, entonces, una frecuencia de muestreo de 1kHz. El espectro fue calculado con el método de Welch con 512 puntos y con un solapamiento del 50%. En la **Figura 08 b)** se muestra la PSD normalizada con la tasa de conteo promedio  $R$ . Los datos fueron ajustados con la **Ecuación (5)** normalizada, obteniéndose la  $\varepsilon$  y el  $\alpha$ .

Con el objetivo de aplicar el método de  $\alpha$ -Feynman, los datos medidos fueron agrupados en intervalos temporales de 50  $\mu$ s (intervalo base) y a partir de allí se construyeron el resto de los intervalos mediante la técnica de agrupamiento antes mencionada. En la **Figura 08 c)** se muestra la curva medida con su respectivo ajuste.

En la **Tabla 02** se informan los parámetros obtenidos del ajuste, junto con la reactividad de referencia. Al comparar los tres métodos, se pudo comprobar que todos ellos coinciden dentro del margen de error. Sin embargo, el que menor error presentó fue el método de  $\alpha$ -Feynman, aunque cabe recordar que fue necesario incluir el efecto del tiempo muerto de la cadena en el modelo. Por el contrario, los otros dos métodos no tuvieron esta dependencia en el tiempo muerto (hecho favorable) a pesar de que luego el error estadístico haya sido mayor.

Finalmente, se realizó el mismo análisis para los datos medidos con la cadena CANBERRA y utilizando un detector de  $^3\text{He}$  ubicado en el plano medio del núcleo. En la **Figura 09** se muestran los tres gráficos característicos, y en la **Tabla 02** los valores obtenidos. Si bien en este caso la eficiencia fue casi un orden de magnitud mayor que en la medición anterior, el error relativo en las mediciones no mejoró significativamente. Esta última observación demuestra que aún con eficiencias bajas, se pudieron realizar mediciones con errores estadísticos aceptables.

### 4.3 Curva de calibración de barra en subcrítico

Como posible aplicación práctica de esta técnica de medición de reactividad en subcrítico, se realizó una curva de calibración de una barra de control. Es habitual que las calibraciones de barras se realicen ya sea por el método del periodo o a través de la cinética inversa (reactímetro), en ambos casos se debe partir de un estado crítico e ir compensando con otra barra de control. Si se piensa en un reactor intrínsecamente subcrítico, tal que no se posible alcanzar la criticidad bajo ninguna configuración de barras y de combustibles, estos últimos métodos no podrían ser aplicados. Por lo tanto, la técnica de ruido neutrónico se vuelve una herramienta de suma importancia, y permite realizar la calibración en cualquier estado subcrítico. Por otro lado, en los métodos de compensación, la distribución de flujo cambia a medida que se compensa con la otra barra, y por lo tanto la calibración de barras no siempre se realiza con la distribución de flujo de operación. En cambio, con estos métodos, se puede calibrar la barra sin necesidad de modificar el flujo neutrónico a lo largo de la calibración.



En la **Figura 10** se muestra una curva de calibración obtenida por el método del reactímetro y otra por  $\alpha$ -Feynman. Los parámetros estimados en cada ajuste están reflejados en la **Tabla 03**. En esta calibración se utilizó la cadena de medición ORTEC con el detector de  $\text{BF}_3$  y la fuente de Am-Be de 500 mCi. Los valores de reactividad medidos coinciden con la curva de calibración realizada con el reactímetro. Con esta coincidencia entre valores, se puede concluir que las variaciones del flujo neutrónico al compensar barras con el método del reactímetro no influyen significativamente sobre la calibración de la barra.

## 5. Conclusiones

Con el nuevo sistema de adquisición de datos, fue posible medir el tiempo de llegada de los neutrones detectados, y con esta información se procesaron los datos utilizando tres métodos de ruido neutrónico para mediciones en subcrítico. Si bien se realizaron mediciones con un detector a la vez, la ampliación para poder utilizar dos detectores más en simultáneo es inmediata.

Se realizaron mediciones en el reactor RA-1 para poner a prueba el sistema de adquisición, y se compararon las mediciones con las efectuadas antiguamente con otra tarjeta y otros programas. Se obtuvieron resultados concordantes indicando el buen funcionamiento de la adquisición y del procesamiento de los datos.

Midiendo el tiempo de llegada de los pulsos detectados, se procesó la información mediante los métodos de  $\alpha$ -Rossi,  $\alpha$ -Feynman y el análisis espectral. En todos los casos, se obtuvieron estimaciones de la reactividad coincidentes dentro de los errores experimentales.

Las mediciones fueron realizadas con un alto fondo de radiación gamma lo que obligó, en ciertos casos, a retirar el detector de las cercanías del núcleo produciendo un descenso de su eficiencia absoluta. A pesar de ello, las mediciones arrojaron estimaciones de los parámetros congruentes con los valores de referencia. Con eficiencias de  $10^{-3}$  fue posible medir reactividades hasta los -7 dólares con un error del 1% (con el antiguo sistema, el error fue del 25%); mientras que con eficiencias de  $10^{-4}$  se midieron reactividades de hasta los -3 dólares con un error del 10%. Por último, a través de estas mediciones se hizo evidente la mejora significativa respecto del antiguo sistema de medición, permitiendo ahora aplicar la técnica de ruido neutrónico cuando la radiación gamma no es despreciable.

## 6. Referencias

- [1]. *Kinetics and Noise Analysis of Zero-Power Reactors: An NPY-Project Report*. s.l. : IAEA, 1972. Technical reports series No. 138.
- [2]. **Gomez, Angel**. *Sistema de medición para la estimación de parámetros cinéticos en un reactor subcrítico*. CNEA. 2004. CNEA.C.RCN.POF.043.
- [3]. **Bitter, R., Mohiuddin, T. y Nawrocki, M.** *LabView advanced programming techniques*. Segunda edición. s.l. : CRC Press, 2007.
- [4]. **National Instruments**. *NI 660x User Manual*. 2006. www.ni.com .
- [5]. *General formulae for the Feynmann-a method with the bunching technique*. **Kitamura, Y., y otros**. 2000, Annals of Nuclear Energy, Vol. 27, págs. 1199-1216.
- [6]. *The forgotten effect of the finite measurement time on various noise analysis techniques*. **Wallerbos, E.J y Hoogenboom, J.E.** 10, 1998, Ann. Nucl. Energy, Vol. 25, págs. 733-746.
- [7]. **Williams, M.** *Random Processes in Nuclear Reactors*. s.l. : Pergamon Press, 1974.
- [8]. **Gomez, Angel**. *Estimación de parámetros cinéticos en subcrítico, utilizando la cadena de detección CANBERRA-7820-ADS-7821-HT, en el reactor RA1*. CNEA. 2006. ITE-06REC-200-SP B1 M.

## 7. Tablas

CBC [%]				$\$_{ref}$	$\$$	$d [10^{-6}s]$	$\epsilon [10^{-4}]$
BC1	BC2	BC3	BC4				
100	100	0	0	-3.02	-3.05(1)	0.5601(1)	10.11(3)
100	0	0	0	-4.95	-5.09(3)	0.605(1)	10.2(1)
0	0	0	0	-7.12	-7.03(6)	0.600(2)	9.6(2)
0	0	0	0	-7.10	-8(2)	0.987(5)	11(1) (*)

**Tabla 01:** Mediciones con el método de  $\alpha$ -Feynman realizadas con la cadena Canberra, el detector de  $^3\text{He}$  y la fuente de 5 Ci en el plano medio del núcleo. (\*) Medición realizada con el antiguo sistema de adquisición de datos.

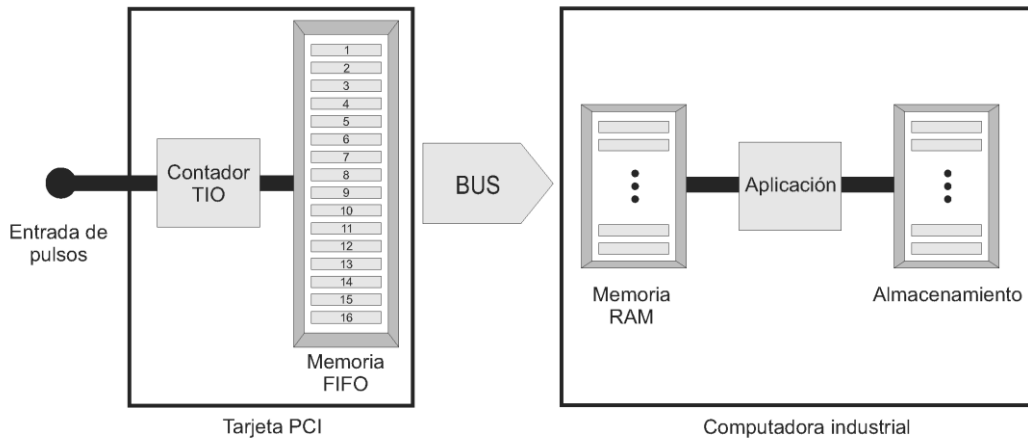
Detector	Rod-drop	$\alpha$ -Rossi		$\alpha$ -Feynman		Frecuencia	
	$\$_{ref}$	$\$$	$\epsilon [10^{-4}]$	$\$$	$\epsilon [10^{-4}]$	$\$$	$\epsilon [10^{-4}]$
$\text{BF}_3$	-2.17	-2.2(2)	1.6(3)	-2.11(7)	1.6(2)	-2.1(1)	1.8(3)
$^3\text{He}$	-4.95	-5.4(4)	9.6(9)	-5.09(3)	10.2(1)	-5.1(3)	9(1)

**Tabla 02:** Comparación entre los tres métodos en subcrítico para dos mediciones realizadas con distintos detectores y distintos niveles de subcriticidad.

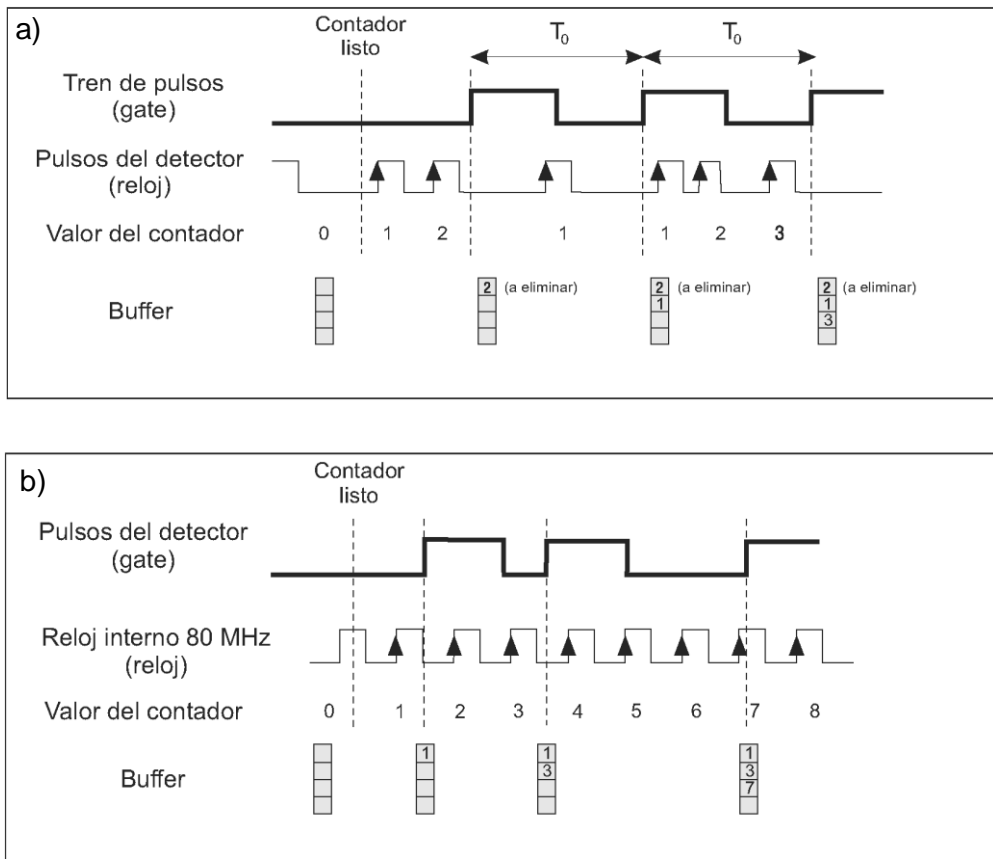
BC1 [%]	$\$_{ref}$	$\langle N \rangle$ [cps]	$\$$	$d [10^{-6}s]$	$\epsilon [10^{-4}]$
84.1	-0.104	26103(7)	-0.13(3)	1.15(2)	1.30(9)
72.7	-0.312	15259(5)	-0.33(3)	1.37(3)	1.38(8)
64.8	-0.521	10653(4)	-0.55(5)	1.52(4)	1.5(1)
52.0	-0.939	6489(4)	-0.92(6)	1.97(8)	1.7(1)
42.4	-1.299	4901(3)	-1.21(7)	1.88(6)	1.4(3)
36.3	-1.498	4186(3)	-1.51(6)	1.96(6)	1.4(1)
0.0	-2.17	2952(2)	-2.2(1)	2.10(9)	1.5(3)

**Tabla 03:** Estimación de reactividad realizada para la calibración de una barra de control. La reactividad de referencia fue calculada por el método del reactímetro con compensación de barras, mientras que el resto de los parámetros se calcularon con el método de  $\alpha$ -Feynman.

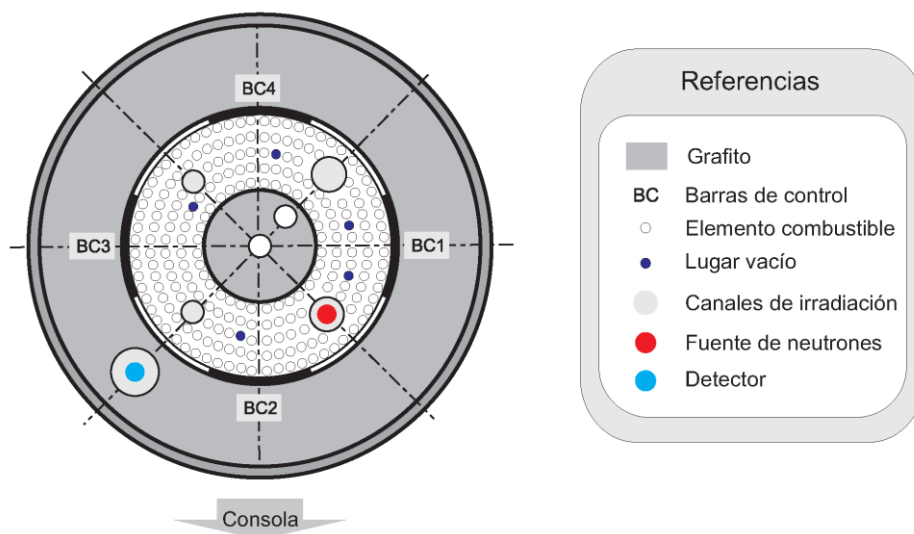
## 8. Figuras



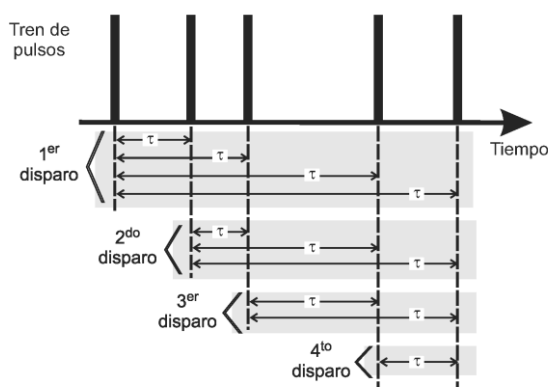
**Figura 01:** Esquema del sistema de adquisición de datos, formado por la tarjeta NI-PCI 6602 junto a una computadora industrial.



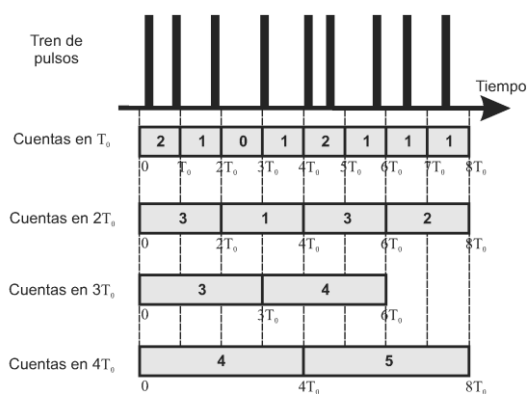
**Figura 02:** a) Procedimiento para adquirir el número de cuentas en un dado intervalo temporal  $T_0$ , simulando el funcionamiento de un analizador multicanal. b) Medición del tiempo de llegada de los pulsos provenientes del detector.



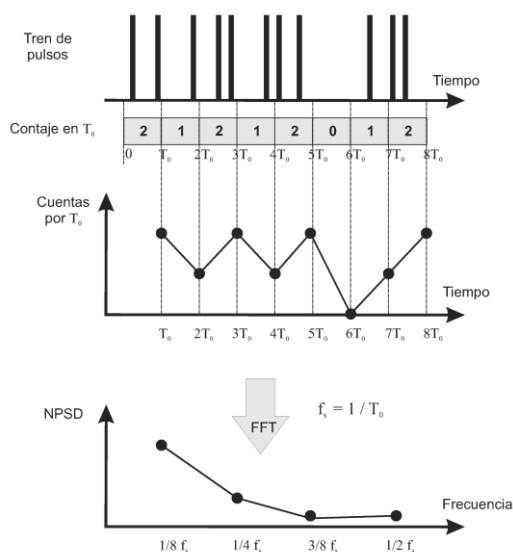
**Figura 03:** Esquema del núcleo del RA-1 con las ubicaciones utilizadas para realizar las experiencias.



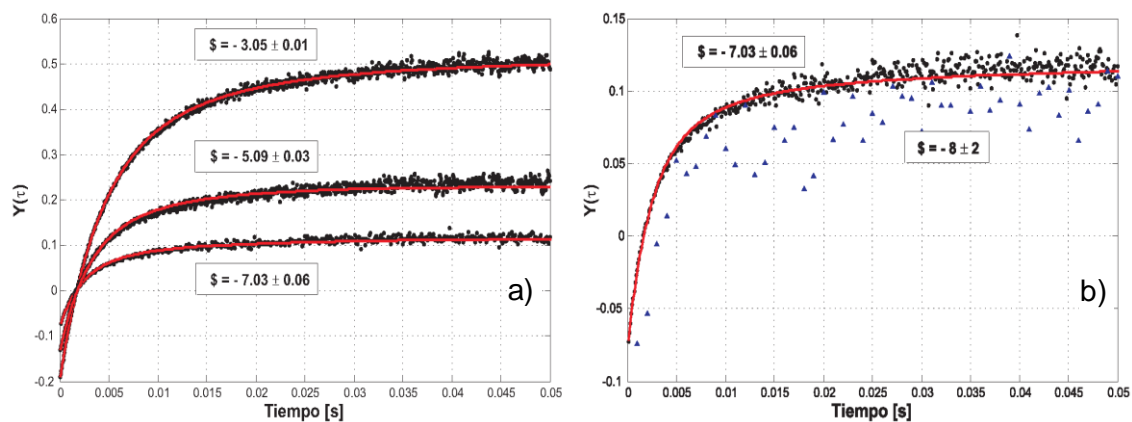
**Figura 04:** Procedimiento para realizar la medición de  $\alpha$ -Rossi a partir de los tiempos de llegada de los pulsos.



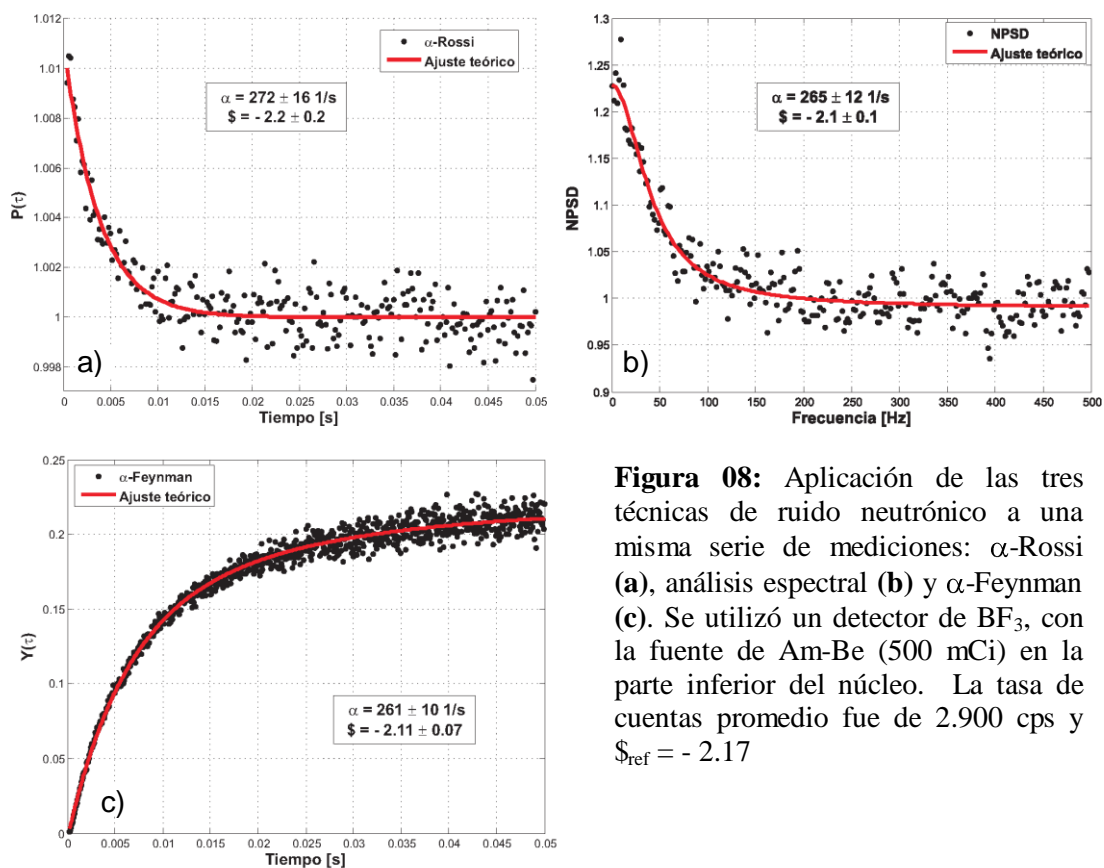
**Figura 05:** Procedimiento para realizar la medición de  $\alpha$ -Feynman por la técnica de agrupamiento



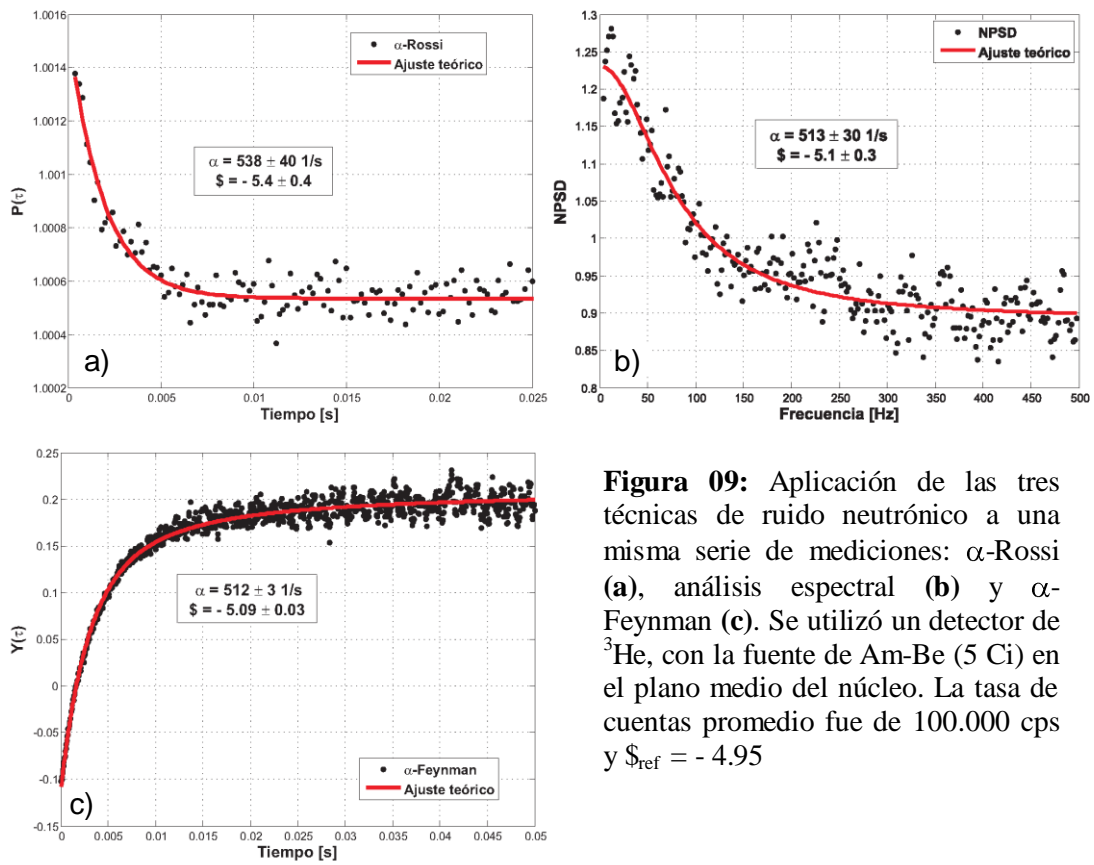
**Figura 06:** Procedimiento para realizar el análisis espectral de los datos, y obtener la PSD normalizada.



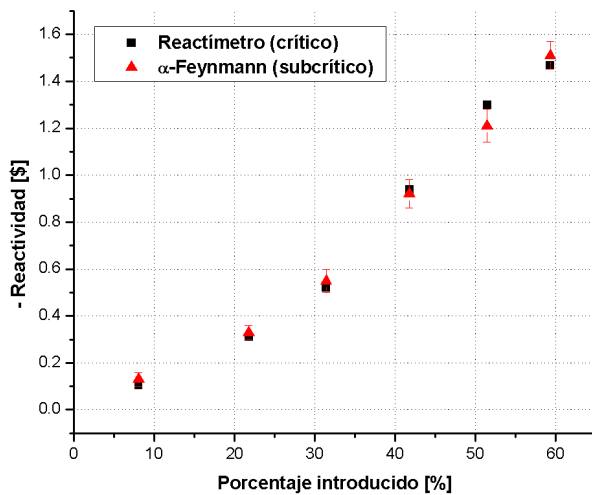
**Figura 07:** a) Mediciones utilizando el método de  $\alpha$ -Feynman con sus respectivos ajustes para tres niveles de subcriticidad. b) Comparación con mediciones realizadas con el antiguo sistema de adquisición de datos, realizada en el 2006.



**Figura 08:** Aplicación de las tres técnicas de ruido neutrónico a una misma serie de mediciones:  $\alpha$ -Rossi (a), análisis espectral (b) y  $\alpha$ -Feynman (c). Se utilizó un detector de  $\text{BF}_3$ , con la fuente de Am-Be (500 mCi) en la parte inferior del núcleo. La tasa de cuentas promedio fue de 2.900 cps y  $\lambda_{\text{ref}} = -2.17$



**Figura 09:** Aplicación de las tres técnicas de ruido neutrónico a una misma serie de mediciones:  $\alpha$ -Rossi (a), análisis espectral (b) y  $\alpha$ -Feynman (c). Se utilizó un detector de  $^3\text{He}$ , con la fuente de Am-Be (5 Ci) en el plano medio del núcleo. La tasa de cuentas promedio fue de 100.000 cps y  $\lambda_{\text{ref}} = -4.95$



**Figura 10:** Curva de calibración de una barra de control (BC1). Se comparan las mediciones realizadas por el método de  $\alpha$ -Feynman en subcrítico respecto de la obtenida con el reactímetro a partir de crítico con compensación de barras.

# IMPLEMENTATION OF THE NEUTRON NOISE TECHNIQUE FOR SUBCRITICAL REACTORS USING A NEW DATA ACQUISITION SYSTEM

Bellino P. A.<sup>(1)</sup>– Gómez A.<sup>(2)</sup>

*Física Experimental de Reactores – Centro Atómico Constituyentes – CNEA*

## ABSTRACT

A new data acquisition system was designed and programmed for nuclear kinetics parameter estimations in subcritical reactors. The system allows using any of the neutron noise techniques, since it could store the whole information available in the neutron detection system. The  $\alpha$ -Rossi,  $\alpha$ -Feynman and spectral analysis methods were performed in order to estimate the prompt neutron decay constant (and hence the reactivity). The measurements were done in the nuclear research reactor RA-1, where introducing the control rods, different reactivity levels were reached (until -7 dollars). With the three methods used, agreement was found between the estimations and the reference reactivities in each level, even when the detector efficiency was low. All the measurements were performed with a high gamma flux, although the results were found to be satisfactory.

---

<sup>(1)</sup> [pbellino@cnea.gov.ar](mailto:pbellino@cnea.gov.ar) <sup>(2)</sup> [angomez@cnea.gov.ar](mailto:angomez@cnea.gov.ar)