

# ESPECTRÓMETRO POR TIEMPO DE VUELO (TOF) EN EL REACTOR RP-10

Munive M.<sup>(1)</sup> [mmunive@ipen.gob.pe](mailto:mmunive@ipen.gob.pe); Baltuano O.<sup>(2)</sup> [obaltuano@ipen.gob.pe](mailto:obaltuano@ipen.gob.pe);  
Soto C.<sup>(3)</sup> [soto.cy@puccp.edu.pe](mailto:soto.cy@puccp.edu.pe)

(1) Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería / Lima, Perú

(2) Departamento de Física – IPEN / Lima, Perú

(3) Pontificia Universidad Católica del Perú / Lima, Perú

## RESUMEN

Un espectrómetro de neutrones por tiempo de vuelo TOF (Time-of-Flight) registra el tiempo que demora un neutrón en recorrer una determinada distancia, asociándolo luego este tiempo a la energía cinética del neutrón. El estudio cinético del haz de neutrones se realiza sobre pulsos neutrónicos, que son generados mediante un obturador giratorio llamado Chopper y el análisis en el tiempo de los pulsos detectados se realiza por un sistema MCS. Se obtuvo espectros en energía o en su defecto en longitud de onda, en los conductos de irradiación No. 2 y 4, y en la columna térmica del reactor RP-10 del Centro Nuclear RACSO.

## 1. INTRODUCCIÓN

De los conductos de irradiación de un reactor nuclear emergen haces de neutrones con un amplio espectro energético, el conocer dicho espectro es primordial para el uso propio del conducto de irradiación, para ello se emplea diferentes técnicas para obtener el espectro energético, una de estos métodos es el tiempo de vuelo, la base para este espectrómetro es el estudio cinético de los neutrones, lograr registrar que tiempo le toma a cada miembro de un paquete neutrónico el recorrer una distancia establecida. La obtención de los espectros energéticos y el flujo de cada haz que emerge de los conductos de irradiación, son las bases primordiales para tener caracterizado el conducto de irradiación.

## 2. BASE TEÓRICA

Uno de los parámetros que caracteriza a los neutrones es su energía cinética, y si describimos la energía del neutrón en términos cinéticos la detallaremos en función de su velocidad, o en términos más sencillos como el tiempo 't' que demora recorrer una distancia 'L' [1].

$$E = \frac{m_n \cdot L^2}{2t^2} \quad (1)$$

Para ampliar podremos detallar un espectro en función del tiempo de recorrido al cual en adelante llamaremos *tiempo de vuelo*. El espectrómetro por tiempo de vuelo basa el estudio sobre un pulso o paquete de neutrones, luego asociándolo al espectro en función de la energía.

$$C(E) = C(t) \frac{dt}{dE} \quad (2)$$

$$C(E) = C(t) \left[ -\frac{t^3}{m_n L^2} \right]$$

De la ecuaciones 1 y 2 se tiene que  $m_n$  es la masa del neutrón,  $t$  es el tiempo de vuelo,  $L$  es la longitud de vuelo, detallando la ecuación 2 la distribución en función de la energía  $C(E)$  es proporcional a la distribución en el tiempo  $C(t)$ , la colección en el tiempo se realiza mediante el sistema distretizador que da  $C(t)$ , luego se transfiere por ordenador en distribución en energía  $C(E)$ .

El estudio se realiza sobre pulsos neutrónicos, lo cual se logra por la interrupción periódica de un haz de neutrones mediante un obturador [2]; para un pulso de neutrones las velocidades con las que se desplazan sus miembros son diversas, se predice que al viajar este pulso una determinada distancia los tiempos de recorrido para los neutrones componentes del pulso serán distintos diferenciándose en el orden de los microsegundos, Figura 1.

La forma de lograr el espectro es detectar y analizar en el tiempo el pulso de neutrones que han viajado la distancia establecida y repetir el análisis por cada pulso generado.

Un espectrómetro por tiempo de vuelo consta, como se menciona, de un dispositivo que logra generar pulsos de neutrones al cual se le conoce como Chopper [2,3], obturador de haz que periódicamente permite el paso del haz de neutrones que incide sobre él, la periodicidad es lograda mediante un sistema de disco giratorio que posee un agujero que es la ventana de acceso para el haz de neutrones y la

frecuencia de pulso generado esta relacionado con la velocidad de giro del Chopper. Al final de la distancia de vuelo se coloca un detector de neutrones que posee un sistema que logre discretizar y analizar en el tiempo los pulsos de neutrones que sean registrados, llamado sistema MCS, el cual se encarga de seleccionar los pulsos de detección de los neutrones con relación al tiempo, desde que son generados los pulsos hasta que son medidos, el pulso total de medida es discretizado en intervalos de tiempo que se conoce como ancho ventana y con número de intervalos o canales. Por pulso generado se lograra un registro o barrido de todas las ventanas establecidas para el MCS, y que su sincronización se hace mediante un sensor de posición ubicado en el Chopper.

Si el registro de pulsos se hace repetidamente se obtendrá un espectro en el tiempo del haz de neutrones incidente sobre el Chopper, obteniendo de esta manera el espectro deseado.

### 3. ARREGLO EXPERIMENTAL

El espectrómetro por Tiempo de Vuelo se instalo en cada una de los conductos de irradiación operativos del reactor nuclear RP10, siendo estos la salida 5 de la Columna Térmica, los conductos de irradiación No 2 y 4, adecuándoles sistema colimador que presenta un ángulo de divergencia apropiado para la experiencia y su respectivo blindaje.

#### Equipo del espectrómetro por tiempo de vuelo

El espectrómetro por tiempo de vuelo se puede describir mencionando solo tres partes del mismo: el Chopper u obturador giratorio; cadena de detección y el sistema discretizador o analizador.

La generación de pulsos de neutrones se logra mediante el Chopper, el cual consiste de un disco de cadmio de 30 cm de diámetro y de 0,3 cm de espesor junto con dos discos de acrílico del mismo diámetro y de 0,85 cm espesor cada uno, aprisionando entre si al disco de cadmio con un espesor combinado de 2,2 cm. Las ventanas de acceso a los neutrones son dos agujeros de 0,5 cm de diámetro a 10 cm del centro del disco y diametralmente opuestos. El eje de giro del disco es paralelo al haz de neutrones y este es accionado mediante fajas por un motor AC con un juego de poleas para lograr seleccionar 5 velocidades de giro  $\omega$  (620, 1100, 1700, 2340, 3100) RPM, logrando un periodo de generación de pulsos de (48, 27, 13, 10, 8) ms respectivamente. Pero debido al tamaño del agujero, el tiempo de apertura del

disco o de generación del pulso es de (1; 0,6; 0,4; 0,31; 0,22; 0,1) ms respectivamente. La velocidad de corte varia dentro de 9 a 45 m.s<sup>-1</sup>, valores están por de bajo de los valores considerados como velocidades mínima para un intervalo de neutrones térmicos, El sistema de detección consta de un detector y de su cadena de medición. Para las experiencias se uso dos detectores de neutrones <sup>3</sup>He y el BF<sub>3</sub>

Los pulsos de salida del detector son amplificados por un preamplificador y un amplificador SCA, logrando pulsos cuadrados, los cuales van al MCS<sup>1</sup> el cual es un analizador en tiempo al cual hemos venido llamando discretizador. Posee un rango de 256 canales a 8192 canales y ancho de canal de 10  $\mu$ s a 500  $\mu$ s. Además este sistema posee la facilidad de almacenar la data de colección y transferirla en modo texto para ser analizada por ordenador. La forma de sincronizar el inicio de las cuentas del sistema de los canales por el MCS y el comienzo de la apertura del Chopper se hace mediante un sensor de posición, el cual consiste en un emisor - receptor infrarrojo que usa uno de los agujeros como disparador del pulso, mientras la otra esta permitiendo el paso de los neutrones. La calibración de tal sincronismo es primordial para garantizar el correcto análisis del tiempo de vuelo de los pulsos. El tiempo de colección de datos es variable desde unos minutos hasta horas dependiendo de la tasa de contaje.

### 4. RESULTADOS

#### Colección de espectro neutrónico

El tratamiento de los datos se realiza mediante el cambio de tiempo de vuelo a longitud de onda, esto debido a que podemos ajustar nuestros datos a una expresión matemática del espectro térmico que posee la forma Maxwelliana.

$$\phi(\lambda)d\lambda = 2N_0 \left( \frac{\lambda_T}{\lambda} \right)^4 d\lambda \cdot \exp - \left( \frac{\lambda_T}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{5}{2}} \lambda_{MAX}$$

donde:

$N_0$  es el número de neutrones incidentes ,  $\lambda_T$  y  $\lambda_{MAX}$  es la longitud de onda térmica y máxima respectivamente, esta última es el valor más representativo del haz de neutrones térmicos emergente de cada conducto tratado.

La colección de los espectros expresadas en longitud de onda se puede apreciar en la Figura 2, en ellas se presentan los ajustes Maxwellianos en un determinado rango al cual hemos llamado rango de ajuste; así, el ajuste nos da el valor de  $\lambda_T$ , Figura 2.

Los resultados expresados en la Tabla 1, son valores representativos de cada conducto de irradiación, así es como se caracteriza mediante un espectrómetro por tiempo de vuelo a los neutrones emergentes de un reactor nuclear. Cabe detallar que el ajuste para cada uno de los resultados es solo en el rango térmico, sin tomar en cuenta los otros rangos energéticos.

**Tabla 1.** Resultados de la colección de espectro en los conductos de irradiación del reactor nuclear RP-10 mediante Tiempo de Vuelo.

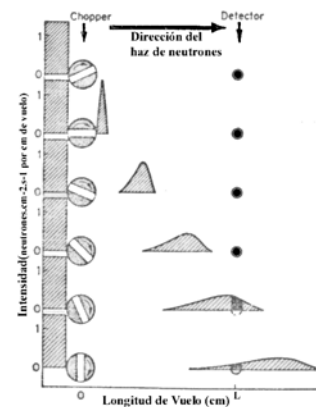
| Facilidad de RP-10                          | Columna Térmica | Conducto de Irradiación No. 2 | Conducto de Irradiación No. 4 |
|---|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Longitud de onda térmica $\lambda_T$ (Å)    | 3,149 ± 0,011   | 1,949 ± 0,003                 | 1,743 ± 0,009                 |
| Longitud de onda máxima $\lambda_{MAX}$ (Å) | 1,990 ± 0,07    | 1,233 ± 0,002                 | 1,102 ± 0,007                 |
| $E_{MAX}$ (meV)                             | 20,55 ± 1,45    | 53,78 ± 0,20                  | 67,31 ± 0,90                  |
| Intervalo energético de ajuste (meV)        | 7,46 -- 46,53   | 12,74 – 106,11                | 9,43 -- 133,54                |

## 5. CONCLUSIONES

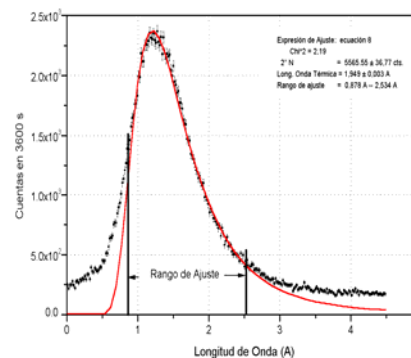
- Los neutrones emergentes de los conductos de irradiación operativos del reactor nuclear RP10, han sido caracterizados en longitud de onda para el rango energético térmico, mediante el sistema Tiempo de Vuelo TOF, logrando establecer los valores máximos de energía o longitud de onda para así como rangos energéticos (Tabla 1).
- Los espectros recolectados por TOF, se sumarán a los datos referenciales de cada conducto de irradiación tales como flujo neutrónico y geometría de colimador, siendo estos datos referenciales para posteriores experiencias.
- El espectrómetro por tiempo de vuelo se edificó con la premisa de coleccionar espectros neutrónicos en el rango térmico, es así que el tratamiento de datos solo abarca dicha región energética.

## 6. REFERENCIAS

- [1] R.S. Stone, R.E. Slovacek; Neutron Spectra Measurements KPAL-1916; Knolls Atomic Power Laboratory, 1957.
- [2] A. Delapalme, Introduction to Elastic Neutron Diffraction, Peruvian Winter School IPEN; 1893.
- [3] K.H. Beckurts, K.Wirtz, Neutron Physics, Springer-Verlag, New York 1964.



**Figura 1.** Variación del pulso de neutrones en función de la longitud de vuelo, principio del espectrómetro por Tiempo de Vuelo.



**Figura 2.** Espectro de neutrones obtenido por el espectrómetro por Tiempo de Vuelo, haz de neutrones emergentes del conducto de irradiación No. 2 del reactor RP-10.