

Diseño de un intercambiador de muestras automático para la medición de flujo de neutrones mediante espectrometría gamma

Javier Gago^{1,*}, Killian Descreaux², Rubén Bruna¹, Oscar Baltuano¹, Eduardo Montoya¹

¹ Instituto Peruano de Energía Nuclear. Lima, Perú

² Université Paris-Sud IUT de Cachan. Paris, Francia

Resumen

Se presenta los cálculos, selección y diseño de componentes para la construcción de un sistema automático para medir el flujo de neutrones del reactor RP-10 en operación a través de la espectrometría gamma de muestras (hojuelas) irradiadas en el núcleo del reactor. Este sistema podrá realizar la medición de 100 muestras que se intercambiarán en forma programada y automática, reduciendo el tiempo de manipulación por parte del usuario y obteniendo mediciones con un menor grado de error.

Palabras clave: Automatización, Espectrometría gamma, Intercambiador, Flujo neutrónico

Abstract

This paper presents calculus, selection and components design for the construction of an automatic system in order to measure neutron flux in a working nuclear reactor by the gamma spectrometry technique using samples irradiated on the RP-10 nucleus. This System will perform the measurement of interchanging 100 samples in a programed and automatic way, reducing operation time by the user and obtaining more accurate measures.

Key words: Automatization, Gamma Spectroscopy, Interchanger, Neutronic Flux

1. Introducción

El conocimiento del flujo de neutrones es de importancia fundamental para el aprovechamiento óptimo de las diversas facilidades de irradiación como herramienta de investigación y desarrollo en un reactor nuclear, especialmente en los experimentos y estudios relacionados con daños de irradiación en sólidos, cálculo de blindajes, producción de radioisótopos y análisis por activación neutrónica.

Diferentes métodos para determinación de los flujos de neutrones térmicos y epitérmicos [1] en un reactor son aplicados en algunos laboratorios anexados a los reactores de investigación, que están basados en la espectrometría gamma con detectores de yoduro de sodio (NaI(Tl)) y germanio hiperpuro (HPGe) como un método preciso para mediciones en un reactor nuclear [2].

La espectrometría gamma consiste en la obtención del espectro de las radiaciones gamma emitidas por los radionucleídos [2] en un sistema llamado cadena de espectrometría gamma, el cual está constituido por un detector de HPGe o NaI(Tl), un pre-amplificador un amplificador de señal y un

analizador multicanal que va anexado a una computadora.

Esta técnica espectrometría gamma acoplada a un intercambiador automático de muestras permitirá obtener el factor pico de potencia utilizando el método de las dos hojuelas [3] para obtener los flujos de neutrones térmicos, epitérmicos en aproximadamente 200 posiciones distintas del reactor. El método de las dos hojuelas consiste en irradiar y medir las tasas de reacción de las hojuelas.

Este método además nos permitirá determinar los perfiles axiales y radiales de los flujos de neutrones medidos y calculados en las diferentes posiciones del núcleo del reactor.

Para aplicar el método de medición de hojuelas se tiene que tener en cuenta el tamaño y el espesor de ésta. Las hojuelas usadas tienen de 3.0 a 8.00 mm de diámetro, 0.14 mm de espesor y 5.0 a 10.0 g de masa.

Actualmente, las mediciones se realizan en forma manual para cada muestra y el personal se expone a pequeñas dosis de irradiación gamma. Existen modelos de intercambiadores de muestras como el desarrollado en nuestras

* Correspondencia autor: jgago@ipen.gob.pe

instalaciones para la medición en forma alternada, la cantidad máxima de 6 muestras [4], en forma análoga podemos comparar el intercambiador desarrollado por D.J. Andrews para 8 muestras [5]. Conforme al requerimiento del sistema se tiene el intercambiador desarrollado por S.B. Garfikel en un sistema para analizar 30 muestras [6]. Actualmente, existen equipos que permiten el tratamiento de hasta 96 muestras [7], todos tienen la función de obtener espectros que emiten las muestras activadas.

Estos diseños son tomados como base para realizar un nuevo sistema mecánico automático, para mediciones experimentales de activación de materiales capaz de analizar hasta 100 muestras y determinar el mapa de flujo neutrónico y la potencia del reactor.

2. Descripción del intercambiador

El sistema propuesto se puede dividir en tres subsistemas: a) Mecanismo de desplazamiento en los ejes X e Z, b) El disco intercambiador y c) Medición de tasa de dosis, tal como se muestra en la Figura 1.

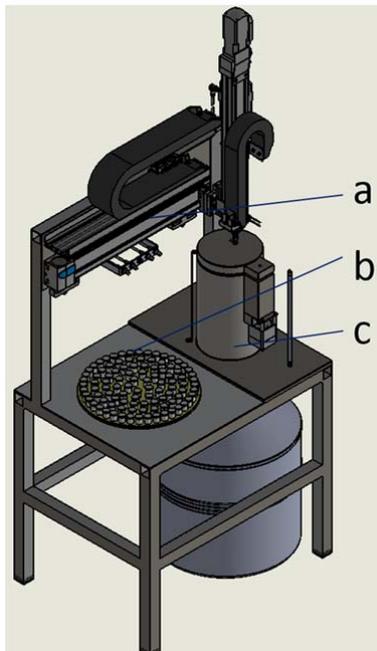


Figura 1. Intercambiador de muestras.

El mecanismo de desplazamiento X-Z es un sistema práctico ya desarrollado por otras empresas, como por ejemplo el modelo ASC2 ORTEC [8] y varía en el número de muestras a trasladar, tamaño y peso. En nuestro caso se seleccionó componentes de la marca Festo [9] para el movimiento en los ejes X-Z. El

mecanismo de desplazamiento X-Z consiste en el movimiento de un accesorio encargado de transportar en forma individual una muestra (Figura 2, detalle A) desde el disco intercambiador hacia el sistema de medición de dosis. El sujetador de la muestra se desplaza en un plano vertical, asumiendo el eje "X" para el movimiento horizontal (carrera de 500 mm) y el eje "Z" para el movimiento vertical (carrera de 350 mm), este movimiento es totalmente controlado y el rozamiento no es considerable, porque está compuesto por un sistema de guías a base de rodamientos lineales totalmente alineado juntamente con el acople del servo motor (tolerancia repetición de posición 0.08 mm). Cada eje lleva un servo motor y la carga útil a mover es de 0.5 kg con alimentación monofásica a 230V AC.

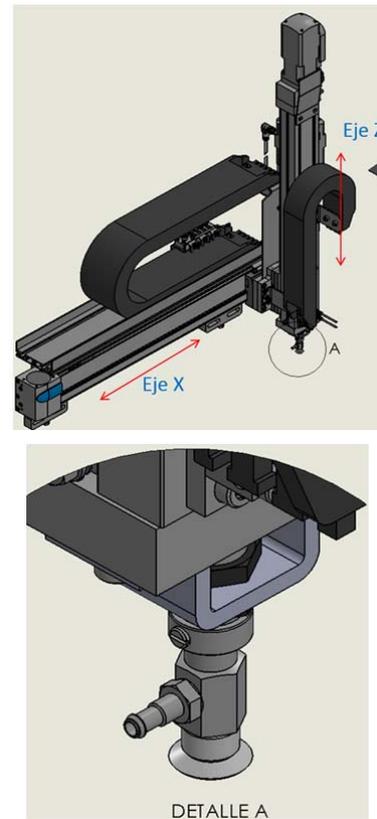


Figura 2. Sistema Desplazamiento X- Z (arriba). Ventosa (abajo).

El accesorio mostrado en el detalle A de la Figura 2 es una ventosa [10] que consiste en un anillo flexible (silicona), que se fijará en la parte superior del envase mediante succión generada por una bomba de vacío.

Las muestras (hojuelas) contenidas en los envases de plástico de polietileno son

colocadas en forma ordenada en disco intercambiador, la cantidad permitida es de hasta 100 envases (Figura 3).

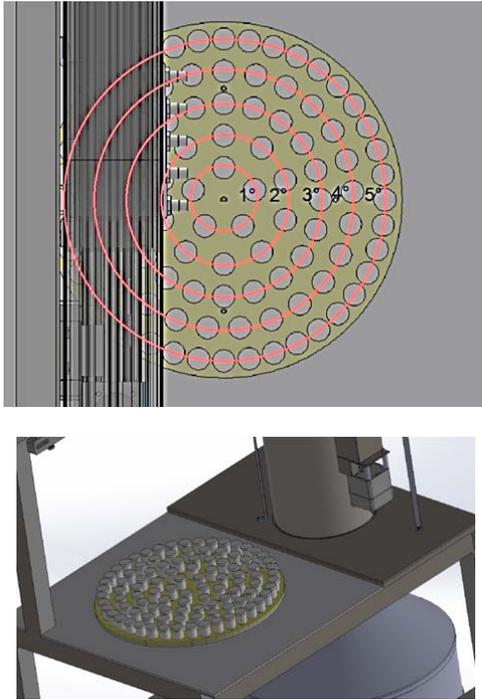


Figura 3. Disco intercambiador. Vista de planta (arriba), Vista isométrica (abajo).

En la vista de planta (Figura 3) se aprecia la distribución en forma anillos (líneas color rojo) de las muestras colocadas en el disco intercambiador. Están ordenados de forma sistemática y permite girar a una posición donde pueda ser sostenido por la ventosa. Se tiene una distribución de 5 “anillos” sobre el disco y en cada “anillo” hay un número de muestras distribuidas de la siguiente forma, de menor a mayor número de muestras:

- 1° Anillo : 5 muestras
- 2° Anillo : 10 muestras
- 3° Anillo : 20 muestras
- 4° Anillo : 25 muestras
- 5° Anillo : 40 muestras

El motor tiene 200 pasos (360 grados, 1 paso = 1.8 grados) y para cada anillo hay un número entero de pasos para ir a cada muestra:

- 1 : 05 muestras = $360^\circ/5 = 72^\circ = 40$ pasos
- 2 : 10 muestras = $360^\circ/10 = 36^\circ = 20$ pasos
- 3 : 20 muestras = $360^\circ/20 = 18^\circ = 10$ pasos
- 4 : 25 muestras = $360^\circ/25 = 14.4^\circ = 8$ pasos
- 5 : 40 muestras = $360^\circ/40 = 9^\circ = 5$ pasos

Con este procedimiento de la actuación del motor paso se asegurará la posición de cada muestra para su respectivo envío al subsistema de medición.

3. Cálculos

4.1 Cálculo del torque del disco intercambiador

El disco de aluminio tiene un espesor de 10 mm y un diámetro 360 mm, el mismo que sostendrá los 100 envases de polietileno. Estos envases tienen las siguientes dimensiones: diámetro 19 mm y altura 28 mm aproximadamente y un peso de 4 g. Para las prestaciones descritas se procedió a realizar los cálculos con la finalidad de determinar el torque mínimo que debe tener el motor paso a paso, para girar el disco intercambiador. Luego, se determinó el momento de inercia [11,12] del disco con los 100 envases de polietileno, según la disposición que se muestra en la Figura 4, utilizando la ecuación (1) y teniendo como referencia el centro del disco.

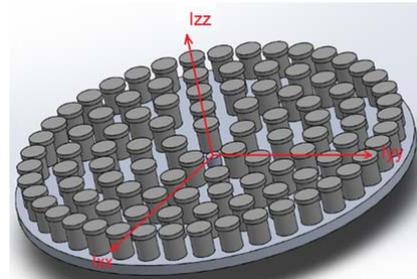


Figura 4. Coordenadas para cálculo de momento de inercia.

$$I_{zz} = \sum_i m_i \cdot r_i^2 \dots\dots(1)$$

Donde:

m_i = masa (kg)

r_i = radio de giro (m)

i = numero entero (1,2,3...)

I = Momento de inercia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

La masa del disco de aluminio es de 1939.1 g y su radio de giro pasa por el centro 180 mm. La masa de cada envase de polietileno es de 4 g. Siguiendo la descripción de la Figura 3 el radio de anillo que forma cada grupo de envases son los siguientes 32.5, 65, 97.5, 130 y 162.5 mm. Con estos datos, se aplicó la ecuación (1) y se obtuvo el momento de inercia del disco intercambiador con los 100 envases:

$$I_{zz} = 0.0392 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (1)$$

Luego, para la determinación de la aceleración angular en alcanzar la velocidad nominal de 1 rpm se establece los siguientes parámetros:

Velocidad de giro: 0.5 rpm (0.0524 rad/s)
 Ángulo de recorrido 9°. Se asume un recorrido de 1.5° (0.0262 rad) para alcanzar su velocidad de giro y otro 1.5° para detener su movimiento. Tendrá solo 6° de recorrido a velocidad angular constante.

Para la determinación de la aceleración empleamos la ecuación 2 y utilizando el código de cálculo Solidworks:

$$\alpha = \frac{\omega_f^2}{2\theta} \quad \dots(2)$$

Donde:

θ = Ángulo en radianes

ω_f = Velocidad angular final (radianes/s)

α = Aceleración angular (radianes/s²)

Se conoce:

$\theta = 0.0262$ rad y $\omega_f = 0.0524$ rad/s

Reemplazando los datos se obtiene que la aceleración angular es:

$$\alpha = 0.0524 \text{ radianes/s}^2$$

El tiempo para obtener la velocidad nominal es de 0.5 rpm

$$t = \sqrt{\frac{2\theta}{\alpha}} \quad \dots (3)$$

Donde:

θ = Angulo en radianes.

t = Tiempo (s)

Se tiene los datos t = 1 s

Este mismo tiempo se empleará en recorrer 9° (4 segundos) tal como se muestra en la Figura 5.

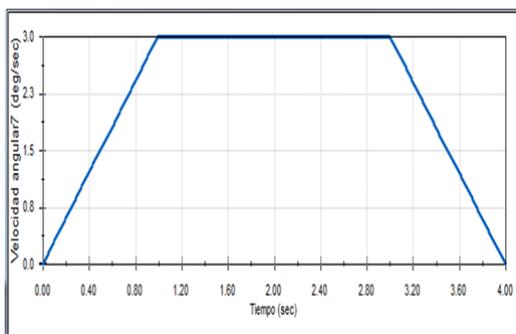


Figura 5. Variación de la velocidad angular en función del tiempo.

Después de obtener la aceleración angular se procederá a determinar el torque mínimo que debe tener el motor paso a paso mediante la ecuación (4).

$$T = I \cdot \alpha \quad \dots (4)$$

Reemplazando los datos ya obtenidos se tiene:

$$T = 2.05 \text{ N mm}$$

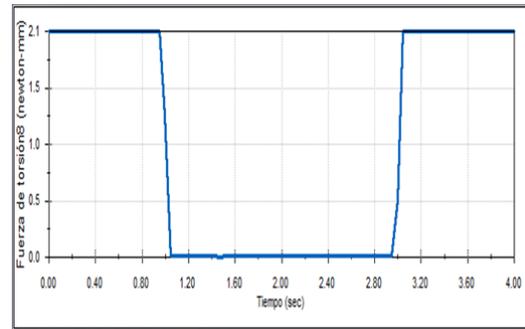


Figura 6. Torque del motor en función del tiempo.

En la Figura 6 se muestra la simulación del torque que se produce para el arranque y parada del disco giratorio. Ese torque tiene un valor de cero en el intervalo de tiempo donde la velocidad es constante.

Para seleccionar el motor paso a paso se deberá considerar los posibles pequeños desalineamientos propios del proceso de ensamble; por esa razón, se aplicará un factor de seguridad 2.

4.2 Cálculo de torque para activar movimiento tapa de blindaje de plomo

De manera similar al proceso anterior es necesario determinar el momento de inercia de la tapa de plomo.

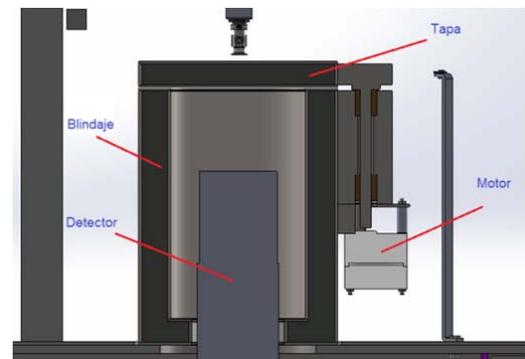


Figura 7. Subsistema del blindaje de plomo.

Para eso es necesario también determinar la inercia de la tapa del blindaje de plomo

(Figura 7) mediante la ecuación (5) de Steiner [11,12].

$$I = I_{cm} + m \cdot R^2 \dots (5)$$

Esta tapa tiene un radio de giro de 122.83 mm con respecto al eje del motor. La tapa de plomo tiene un espesor de 25 mm, diámetro de 186 mm y un peso de 7.47 kg, con este componente principal se obtuvo el respectivo momento de inercia $I = 0.1797 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Para las condiciones de movimiento de la tapa de plomo se establecieron los siguientes parámetros: Velocidad nominal de giro es 1 rpm (0.1048 rad/s o 6°/s), ángulo de recorrido es 90°, el tiempo en alcanzar la velocidad nominal es de 3 segundos por lo tanto su aceleración angular es $2^\circ/\text{s}^2$. Empleando nuevamente la ecuación (4) obtenemos el Torque $T = 6.27 \text{ Nm}$. El tiempo en disminuir la velocidad de giro a cero (parada) es también 3 segundos.

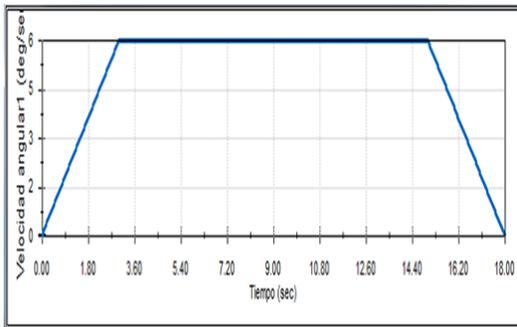


Figura 8. Diagrama velocidad versus tiempo del subsistema de la tapa del blindaje.

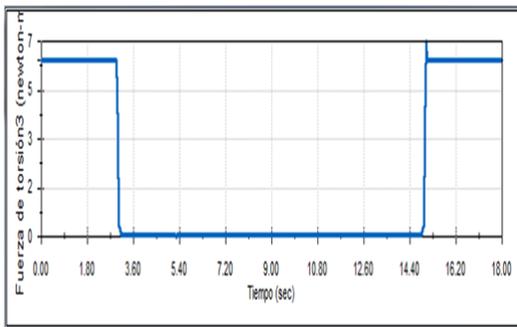


Figura 9. Diagrama torque versus tiempo del subsistema de la tapa del blindaje.

En las Figuras 8 y 9 se muestran la representación del movimiento verificando los cálculos. En la Figura 8 se observa el comportamiento lineal del incremento de velocidad angular y de la misma forma para la paralización del giro. Esta relación lineal se puede modificar a una función que permita

hacer un cambio de velocidad gradual (evitar arranques de giro y paradas bruscas). En la Figura 9 se observa nuevamente la presencia del torque durante el proceso de arranque y parada del giro de la tapa del blindaje. A una velocidad constante el torque es igual cero.

4.3 Estimación del peso de envase a trasladar

Los envases usados generalmente tienen un diámetro externo de 23 mm y el diámetro de la ventosa es de 15 mm, estos elementos estarán en contacto debido al movimiento de la estructura X-Z. Por la ventosa habrá un flujo de aire (succión) provocando la adherencia del envase a la ventosa.

La estimación de la fuerza o peso del envase a trasladar por succión la calculamos utilizando la siguiente ecuación (6) [13].

$$d = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot s}{P_u \cdot n \cdot \mu}} \dots (6)$$

Donde:

d: Diámetro de la ventosa en cm

Pu: Depresión en bar

m: masa de la pieza en kg

n: número de ventosas

S: factor de seguridad

μ: coeficiente de fricción

Considerando los siguientes valores: $P_u=0.4$ bar, $n=1$, $S=2$, $\mu=0.5$ y $d=1.5$, obtenemos una fuerza de succión de 179 g, valor que está por encima del valor de 4 g estimado como peso para una cápsula, con lo cual se garantiza la capacidad de succión y traslado de la ventosa.

4. Conclusiones

Se ha culminado el diseño teórico del sistema intercambiador, verificándose el cumplimiento de los criterios de diseño y operación, lo que nos permite continuar con la etapa de fabricación, pruebas y puesta en operación del sistema.

La mayor parte de los componentes mecánicos y controles electrónicos serán construidos en los laboratorios y talleres del IPEN, siendo el sistema de traslado (mesa) X-Z la única parte que será adquirida ya ensamblada, debido a la alta precisión que requiere su fabricación, ensamblaje y alineamiento.

Los valores obtenidos en el cálculo de torque para accionar el movimiento de giro del disco intercambiador y tapa del blindaje de plomo, son relativamente bajos, la potencia para seleccionar sus respectivos motores no sobrepasa los 50 W.

El diseño cumple con un criterio de optimización de costos y ventaja competitiva con respecto a los sistemas comerciales llave en mano, debido a que el mantenimiento y la reparación, en caso de fallas, se podrá hacer utilizando los recursos humanos y tecnológicos de nuestro medio.

5. Bibliografía

- [1] Duderstadt J, Hamilton LJ. Nuclear reactor analysis. New York: John Wiley & Sons. Inc.; 1976.
- [2] Beckurtz KH, Writz K. Neutron physics. New York: Springer; 1964.
- [3] Bazzana, Santiago. Desarrollo, análisis y evaluación de experimentos neutrónicos en el RA-6. Tesis. Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro. Argentina. 2012.
<http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/342/1/Bazzana.pdf>
- [4] Mendoza M, Baltuano O, Montoya E, Hernández Y. Intercambiador automático de muestras. Informe Científico Tecnológico. 1998-2001. p. 123-124.
- [5] Andrews DJ. An Automatic sampler changer for gamma spectrometry. Fisheries Research Technical Report N° 77. Lowestoft; 1984.
- [6] Garfinkel SB, Mann WB, Pararas JL. The national bureau of standards $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence-counting and γ -ray intercomparator automatic simple changers. Nuclear Instruments and Methods. 1973; 112(1-2): 213-217.
- [7] Agilent Technologies. Agilent 7620-AS Autosampler Automated NMR Sample Changer. [Homepage]. Disponible en: <http://www.agilent.com/en-us/Agilent404>
- [8] ORTEC. ASC2. Automatic Sample Changer. Advanced, Automated Gamma Spectroscopy Yet Economically Priced. www.ortec-online.com/download/asc2.pdf
- [9] Festo. Pórticos vertical de dos ejes. [Homepage]. Disponible en: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/LINIENPORTALE_ES.PDF
- [10] Festo. Ventosas de sujeción por vacío ESG. [Homepage]. Disponible en: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/ESG_ES.PDF
- [11] Alonso M, Finn E. Física. Volumen I: Mecánica. México: Fondo Educativo Interamericano S.A.; 1970.
- [12] Huang TC. Mecánica para ingenieros. Tomo II. Dinámica. México: Fondo Educativo Interamericano; 1985.
- [13] Schmalz. Ventosas de vacío. Dimensionamiento. [Homepage]. Disponible en: <http://es.schmalz.com/imperia/md/content/aktuelles/produkte/vt/infos/2.10.pdf>