

## Diseño e implementación de un módulo portátil para el traslado y disolución de $^{99}\text{Mo}$ aplicado al empleo de un generador de $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Yon López<sup>1\*</sup>, Rafael Urquiza<sup>2</sup>, Pablo Mendoza<sup>3</sup>, Jorge Rojas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru S/N, Lima 1, Perú

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería de Sistemas y Electrónica, Universidad Tecnológica del Perú, Av. 28 de Julio 826, Lima 15046, Perú

<sup>3</sup> Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>4</sup> Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Av. Universitaria /Av. Germán Amézaga S/N, Lima 1, Perú

### Resumen

Se presenta el diseño e implementación de un equipo portátil de agitación magnética para el traslado y disolución eficiente de  $\text{MoO}_3$  acoplado al prototipo generador de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . El desarrollo de este equipo permitirá un traslado eficiente y seguro del  $^{99}\text{Mo}$  con una actividad máxima de 2 Ci desde el reactor nuclear de Huarangal hasta el lugar de operación del equipo generador de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . En este artículo se describe el diseño mecánico, cálculo de volumen, cálculo de blindaje, diseño de la electrónica y el control programable de la velocidad del sistema de agitación de muestras radiactivas.

### Design and setup of a portable stirring device for transfer and dissolution of $^{99}\text{Mo}$ applied to the use of a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator

#### Abstract

This work shows the design and implementation of a portable magnetic stirring device for transfer and efficient dissolution of  $\text{MoO}_3$  coupled to a  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator prototype. The development of this equipment will enable an efficient and safe transfer of  $^{99}\text{Mo}$  at a 2 Ci of maximum activity from the nuclear reactor Huarangal to the point of operation of the  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator equipment. This article describes the mechanical design, volume and shielding calculation, the electronics design and the programmable speed control of the stirring system for radioactive samples.

### 1. Introducción

El Instituto Peruano de Energía Nuclear a través de la Dirección de Investigación y Desarrollo viene implementando un prototipo automático de generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , financiado a través del convenio 162-FINCYT-1A-2013, con la finalidad de descentralizar las aplicaciones de la medicina nuclear a nivel nacional [1].

El  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  gracias a sus propiedades nucleares es un radiotrazador ideal y predominante en medicina nuclear que con el desarrollo de generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  ha posibilitado el rápido crecimiento en el campo de radiodiagnóstico por imágenes, facilitando la formulación de compuestos de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  en los laboratorios de radiofarmacia hospitalaria [2].

El prototipo desarrollado está conceptualizado para operar controlando la carga del material radiactivo, mediante la inserción del  $\text{MoO}_3$  irradiado en forma de tabletas para realizar el proceso de disolución en  $\text{NaOH}$  5M en un contenedor externo al generador, con el objetivo de minimizar la probabilidad de contaminación radiactiva en el generador así como reducir la tasa de exposición para el operador o usuarios cumpliendo con los parámetros de seguridad y protección radiológica [3].

Un punto importante a considerar es el traslado seguro del  $\text{MoO}_3$  irradiado, desde el centro de producción hasta el lugar donde se encuentra instalado el equipo generador de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , tomando en cuenta que sus

\*Correspondencia autor: yon\_m9@hotmail.com

dimensiones, peso y fragilidad de algunos de sus componentes hacen poco viable el frecuente traslado del mismo.

Para satisfacer los requerimientos y condiciones mencionados se realizó el diseño de un equipo blindado de agitación magnética de fácil traslado y con las características adecuadas en blindaje y volumen para disolver 25 gramos de  $\text{MoO}_3$  con una actividad máxima de 2 Ci.

El diseño del equipo se desarrolló con el programa SolidWorks y el blindaje requerido se calculó mediante el programa Microshield, desarrollándose igualmente el circuito de control de la velocidad del motor DC asociado al agitador.

## 2. Descripción del diseño

El diseño mecánico del equipo consta de un recipiente de teflón, material seleccionado debido a su inercia química, cuyo diseño tendrá tres capilares que ingresan por la tapa, uno para la inyección del NaOH, otro para la succión del contenido y el tercero para el ingreso o salida de aire, la tapa tendrá un orificio por donde ingresará el  $\text{MoO}_3$ .

Debido a la reducción de sus propiedades mecánicas como consecuencia de la radiación [4], se hace necesario su recambio cada cierto período de tiempo.

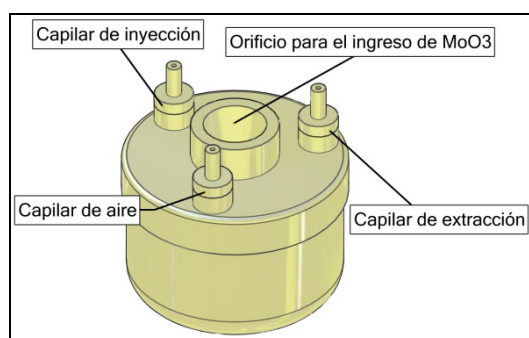


Figura 1. Recipiente de teflón.

Este recipiente está contenido en un blindaje de plomo que en su parte inferior tiene acoplado un motor DC, cuyo eje ingresa dentro del blindaje y tiene incrustado un imán en su extremo. La parte superior del blindaje tiene tres agujeros por donde emergen las mangueras de teflón. La tapa del blindaje es del tipo roscada con teflón de cobertor interno, en forma de corcho, que sella el orificio de entrada del  $\text{MoO}_3$  al recipiente de teflón, garantizando su hermeticidad.

A su vez, el blindaje de plomo está contenido en un recipiente de acero inoxidable, que en su interior posee una estructura que le sirve como soporte y medio de fijación. El recipiente de acero inoxidable, reforzado con platinas para su fácil traslado, tiene incorporado un panel de control para la electrónica de funcionamiento del equipo.

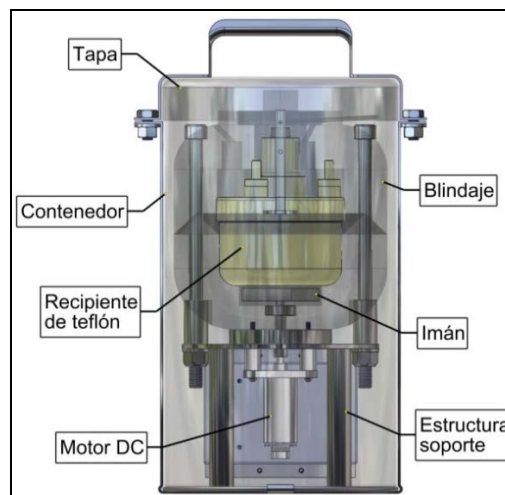


Figura 2. Vista posterior.

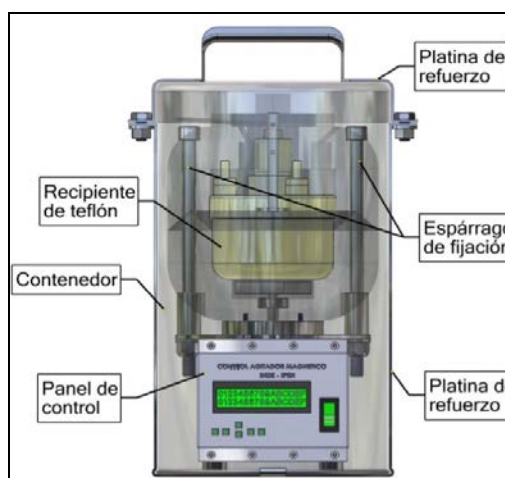


Figura 3. Vista frontal.

## 3. Cálculos de diseño

### 3.1 Cálculo de volumen y tiempos de disolución

Para optimizar el volumen de NaOH 5M a emplear, velocidad de agitación y tiempos de disolución de las pastillas de  $\text{MoO}_3$  (cada pastilla tiene aproximadamente 2,50 g), se realizan pruebas de comparación de causa y efecto mostrándose los valores obtenidos en la Tabla 1.



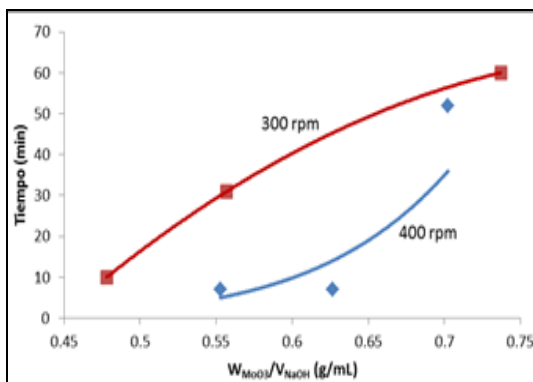
**Figura 4.** Equipo de disolución de muestras radiactivas.

Los tiempos de disolución son proporcionales al contenido de  $\text{MoO}_3$  en un volumen definido de  $\text{NaOH}$  5M bajo una agitación constante, considerando que la solubilidad disminuye debido a la saturación del  $\text{NaOH}$  por el óxido de molibdeno [5,6]

**Tabla 1.** Solubilidad de  $\text{MoO}_3$  en  $\text{NaOH}$  (5M).

Nº de pastillas	Vol. NaOH 5N (mL)	Tiempo (min)	Agitación (rpm)
6	30	10	300
7	30	31	
8	30	> 60	
9	40	7	400
10	40	7	
11	40	52	

En la Figura 5 se grafican los datos donde se describe la relación que existe entre el tiempo de disolución respecto de la masa de  $\text{MoO}_3$  y el volumen de  $\text{NaOH}$  empleado variando la velocidad de agitación.



**Figura 5.** Variación de tiempo de disolución respecto a masa de  $\text{MoO}_3$ /Volumen de  $\text{NaOH}$ .

### 3.2 Cálculo de blindaje

Debido a la fuerte actividad que se administra al equipo (2 Ci de  $^{99}\text{Mo}$ ) es necesario proveer un sistema de blindajes que protejan al personal profesionalmente expuesto según la norma IAEA TS-R-1, para ello se utiliza plomo por su disponibilidad. Los cálculos del blindaje se realizan con el software Microshield® [7] modelando el sistema como un cilindro de dimensiones del recipiente de teflón cubierto por un espesor de plomo, luego un espacio de aire y finalmente la pared del contenedor (acero), se calcula la tasa de dosis en las paredes del contenedor, siendo la pared lateral la zona crítica. La fuente se considera uniforme en el volumen con el espectro de decaimiento del  $^{99}\text{Mo}$ .

Se propone un espesor de 3 cm de plomo que resulta en una tasa de dosis de 1,5 mSv/h en contacto con la pared del contenedor. De este modo el nivel de protección se encuentra por debajo del límite establecido por la IAEA y es apto para el transporte de bultos categoría III-Amarilla en condiciones de transporte no exclusivo.

**Tabla 2.** Categorías de bultos y sobreenvasos [8].

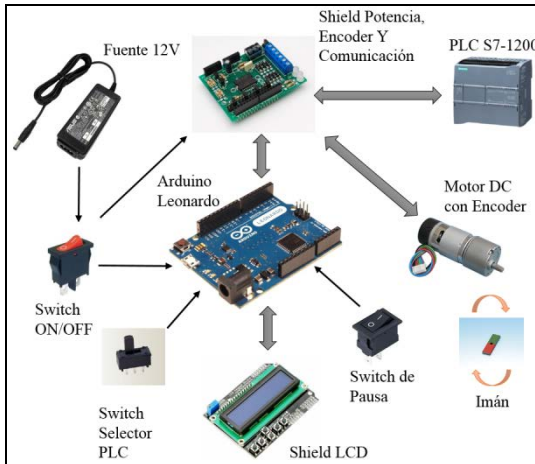
Condiciones		Categoría
IT	Nivel de radiación máximo en cualquier punto de la superficie externa	
0 <sup>a</sup>	Hasta 0,005 mSv/h	I-BLANCA
Mayor que 0 pero no mayor que 1 <sup>a</sup>	Mayor que 0,005 mSv/h pero no mayor que 0,5 mSv/h	II-AMARILLA
Mayor que 1 pero no mayor que 10	Mayor que 0,05 mSv/h pero no mayor que 2mSv/h	III-AMARILLA
Mayor que 10	Mayor que 2mSv/h pero no mayor que 10mSv/h	III-AMARILLA <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Si el IT medido no es mayor que 0,05, el valor citado puede ser cero.

<sup>b</sup> Deberá transportarse también bajo uso exclusivo.

### 4. Electrónica y control

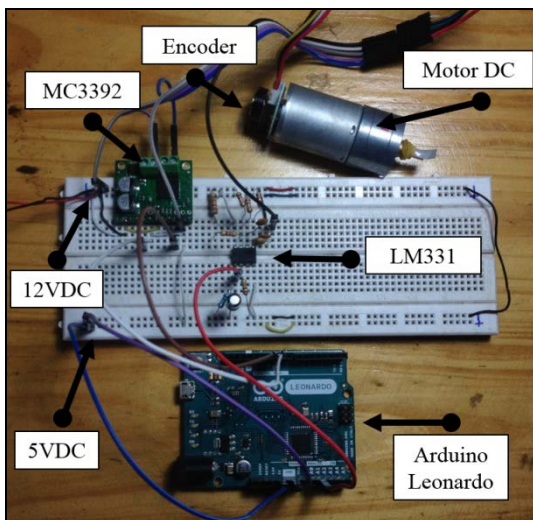
La electrónica de control se basa en crear y estabilizar una señal PWM por medio de un controlador PID diseñada e implementada para el motor DC con encoder, marca Metal Gearmotor con encoder de 48CPR de resolución y una reducción de 9,7:1, como se muestra en el esquema de la Figura 6.



**Figura 6.** Esquema de las partes conectadas que conforman la electrónica.

La fuente de 12 voltios alimenta al sistema. El Switch On/Off me permite el encendido de la tarjeta Arduino y los Shield's que se acoplan a él. El Shield LCD permite controlar por teclas y visualizar los mensajes en una pantalla LCD. El Shield Potencia, Encoder y Comunicación permiten alimentar al motor DC por medio de las señales que vienen del Arduino, también convierte las señales del encoder y permite la comunicación con un PLC por medio de un protocolo RTU RS485. El interruptor Pause permite pausar el proceso cuando se inicie la disolución.

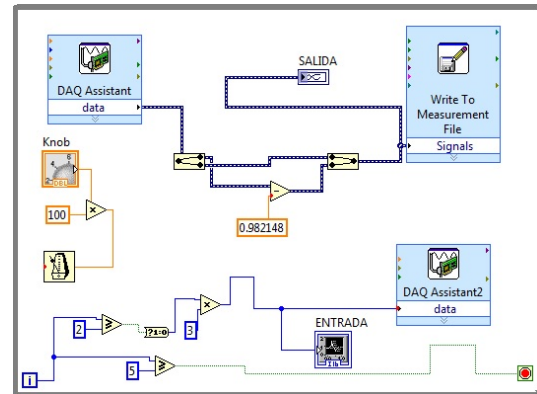
El diseño del controlador PID se realizó mediante el proceso de adquisición de datos y posterior identificación del modelo del motor para el sistema mostrado en la Figura 7.



**Figura 7.** Circuito de pruebas del control de velocidad en protoboard.

La DATA obtenida en el tiempo de respuesta y estabilidad a distintas velocidades, se

obtuvieron mediante la tarjeta de adquisición de datos DAQ-6009 de National Instruments.



**Figura 8.** Programa para adquisición de datos de entrada y salida del sistema.

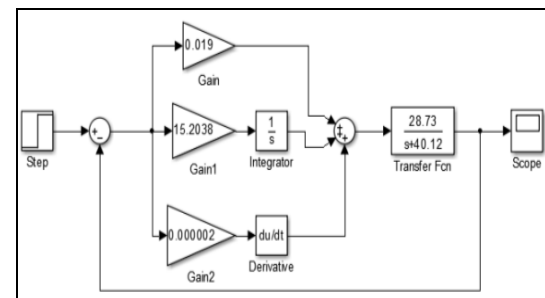
Una vez obtenida la data se procede a identificar la planta utilizando el modelo paramétrico ARX [9], mediante el toolbox de identificación de datos de Matlab.

Luego de obtener el modelo de planta del sistema, diseñamos el controlador PID mediante el método Root locus, estableciendo los polos deseados para:  $t_s=0,5$  y  $M_p=0,001$ . El controlador en tiempo continuo se representa de la siguiente forma:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

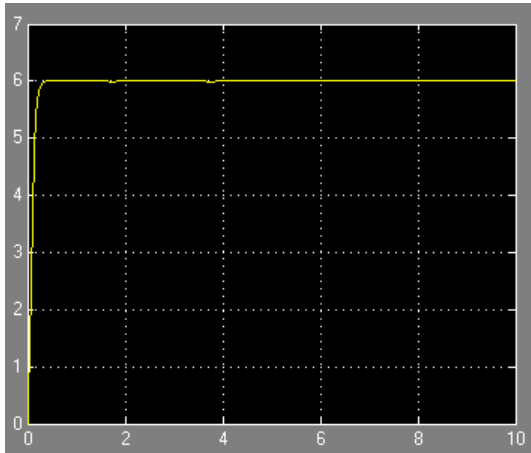
Siendo  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  las constantes del controlador a hallar y  $e(t)$  la función de transferencia de la planta.

Usando Matlab y modelando el PID y la planta en Simulink según Figura 9.



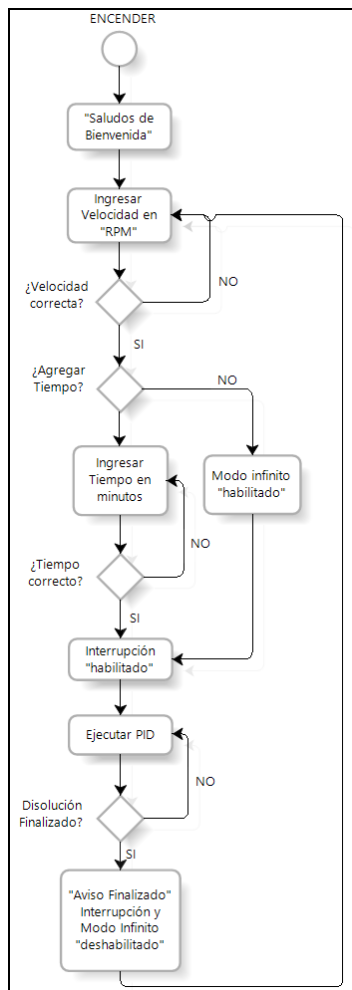
**Figura 9.** Controlador PID.

Obtenemos la respuesta en el tiempo mostrada en la Figura 10, corroborando el diseño del controlador PID hallado.



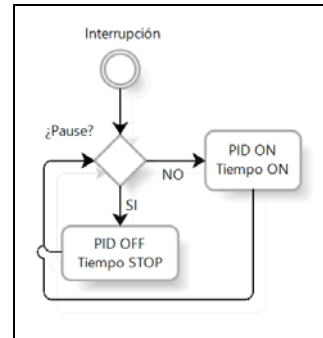
**Figura 10.** Respuesta en el tiempo de la velocidad del motor.

Luego de realizar el control del motor con carga, se desarrolla un algoritmo con una secuencia automática del control. Para ello se debe programar el PID en el algoritmo C/C++ de Arduino. Lo cual se basa en el diagrama de flujo de la Figura 11, constituyendo el programa general.



**Figura 11.** Diagrama de flujo del sistema de disolución.

La opción de pausa en la Figura 12 es un diagrama en paralelo, debido a que usa una interrupción. Cuando se pulsa el botón de “Pausa” automáticamente deja de generar señales PWM y detiene el tiempo hasta que el botón sea de nuevo pulsado para continuar con el proceso.



**Figura 12.** Diagrama del botón “Pause”.

Luego de subir el programa en el Arduino e implementar las placas Shield's, se les conecta una sobre otra quedando según la Figura 13.



**Figura 13.** Montaje Final del equipo Disolutor.

### 5. Descripción del funcionamiento

El tubo de aluminio conteniendo <sup>99</sup>MoO<sub>3</sub>, en forma de tabletas, es llevado a la celda radioquímica blindada en donde se realiza su apertura introduciendo las tabletas <sup>99</sup>MoO<sub>3</sub> en el orificio de ingreso del recipiente de teflón (Figura 1) sellando herméticamente el recipiente mediante un tapón de teflón incrustado en la base de la tapa de plomo. El equipo de disolución es trasladado, siguiendo los procedimientos de seguridad, desde el centro nuclear “RACSO” hasta el centro de medicina nuclear donde se encuentra instalado el generador de <sup>99m</sup>Tc.

Este equipo se acopla luego al generador mediante mangueras de teflón conectadas al módulo de toma de insumos cerrando el circuito de obtención del <sup>99m</sup>Tc.



Se inicia la secuencia de disolución del  $\text{MoO}_3$  mediante la introducción de  $\text{NaOH}$  5M procedente del módulo de toma de insumos en un volumen programado de 30 mL. Luego se activa el sistema de agitación poniendo en movimiento el motor DC que a su vez pone en movimiento al imán acoplado a su eje iniciando la rotación por inducción de la pastilla magnética que se encuentra dentro del recipiente de teflón, aumentando la velocidad de la disolución de las tabletas de  $\text{MoO}_3$ .

La velocidad y el tiempo de agitación del motor están programados para trabajar a diferentes cantidades de  $\text{MoO}_3$  en base a pruebas experimentales obtenidas en el laboratorio.



**Figura 14.** Equipo para disolución de muestras radiactivas.

## 6. Conclusiones

- A diferencia de otros generadores de separación por columna cromatográfica de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  el prototipo automático en desarrollo, realiza el circuito de obtención de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  desde la etapa de disolución de  $\text{MoO}_3$  irradiado en formato de tabletas, para la posterior separación y extracción del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ; minimizando la probabilidad de contaminación radiactiva en el equipo y reduciendo la tasa de exposición del operador.
- El equipo permitirá el transporte seguro del  $\text{MoO}_3$  irradiado con una actividad máxima de 2 Ci, desde el centro nuclear hasta el hospital donde se encuentre instalado el generador de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .
- El equipo se acopla de una manera fácil y sencilla al generador, completando el circuito

de obtención del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  permitiendo la disolución eficiente del  $\text{MoO}_3$  en el menor tiempo posible, contribuyendo a la eficiencia de obtención de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

## 7. Agradecimientos

A INNOVATE-PERU, contrato N° 162-FINCYT-1-A-2013 por el apoyo económico y financiero brindado en el desarrollo de la presente investigación.

## 8. Referencias

- [1]. Javier Gago. Diseño y definición de parámetros de un sistema portátil para la obtención del radioisótopo  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (GENVI). Informe Científico Tecnológico. 2012; 12: 155-159.
- [2]. Banerjee Sharmila, *et al.* Evolution of Tc-99m in diagnostic radiopharmaceuticals. Seminars in Nuclear Medicine. 2001; 31(4): 260-277.
- [3]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Requisitos de Seguridad Física de Fuentes Radiactivas. Norma SF.001.2011. Lima; 2011.
- [4]. Menzel B, Blanchet T. Enhanced wear resistance of gamma irradiated PTFE and FEP polymers and the effect of post-irradiation environmental handling. Wear. 258(5-6): 935-941.
- [5]. Montero de Espinosa G. Control de calidad de generadores de molibdeno-99/tecnecio-99m de columna seca. [Tesis PhD]. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, Dpto. de Farmacia y Tecnología Farmacéutica; 1993.
- [6]. Domínguez Catasús J, León Arias Y, Gamboa Marrero R, *et al.* Evaluation of TBP, TOA and MEK as extractants to obtain  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  radiotracers in organic phase from  $^{99}\text{Mo} / ^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator. Nucleus. 2012; 51: 26-31.
- [7]. Microshield Software 4.00. Licensed to: ANSTO. Serial: 4.00-00216.
- [8]. International Atomic Energy Agency. Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos. Requisitos de seguridad N° TS-R-1. Vienna, Austria; 2009.
- [9]. Soto Otalora A, Mauricio Losada A, *et al.* Identification of dc motor with parametric methods and artificial neural networks, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2012; 7(7): 922-925.