

## Diseño e implementación de un módulo para el control automático de volúmenes en un equipo generador de $^{99m}\text{Tc}$

Yon López<sup>1,\*</sup>, Rafael Urquiza<sup>2</sup>, Javier Gago<sup>3</sup>, Pablo Mendoza<sup>3</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

### Resumen

Se ha desarrollado, usando una impresora 3D, un módulo para la extracción automática de volúmenes desde 0.05 mL hasta 1 mL utilizando como material base el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). El diseño permite la automatización tanto de los procesos de toma de insumos como el de la eyección del eluato de  $^{99m}\text{Tc}$  en el equipo prototipo generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , siendo factible su empleo en los demás sistemas por su alto grado de versatilidad, dependiendo de la selección de sus componentes principales: jeringa de precisión y válvula solenoides multivías. Se obtiene una precisión equivalente a los equipos comerciales, pero a menor costo económico. En este artículo se presenta el diseño mecánico, diseño del mecanismo de movimiento, la electrónica y el control del equipo automático dispensador de jeringa.

### Abstract

A module for the automatic extraction of volume from 0.05 mL to 1 mL has been developed using a 3D printer, using as base material acrylonitrile butadiene styrene (ABS). The design allows automation of the input and ejection eluate  $^{99m}\text{Tc}$  in the generator prototype  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  processes; use in other systems is feasible due to its high degree of versatility, depending on the selection of the main components: precision syringe and multi-way solenoid valve. An accuracy equivalent to commercial equipment has been obtained, but at lower cost. This article describes the mechanical design, design calculations of the movement mechanism, electronics and automatic syringe dispenser control.

### 1. Introducción

El Instituto Peruano de Energía Nuclear, a través de la Dirección de Investigación y Desarrollo, viene desarrollando un prototipo automático de generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , con la finalidad de descentralizar las aplicaciones de la medicina nuclear a nivel nacional.

Dentro de las diversas prestaciones que ofrece el prototipo está la relacionada con la eyección programable de  $^{99m}\text{Tc}$ ; es decir, la posibilidad de que el usuario pueda ajustar la cantidad de actividad requerida en función al volumen extraído de eluato, considerando el tipo de examen de diagnóstico a realizar. En los generadores convencionales se extraen volúmenes definidos de 5 mL o 10 mL de  $^{99m}\text{Tc}$  [1] siendo necesario realizar un proceso de fraccionamiento para lograr la actividad requerida.

El módulo propuesto, tipo dispensador de jeringa, cumple otras funciones específicas

como el control de volúmenes de los insumos que se utilizan para el proceso de producción del  $^{99m}\text{Tc}$ .

En este caso se requiere controlar la cantidad exacta de los insumos: NaOH 5M, metil etil cetona (MEK) y NaCl 0,9 % utilizados para la disolución de las pastillas de  $^{99}\text{Mo}$ , separación del  $^{99m}\text{Tc}$  y posterior elución del  $^{99m}\text{Tc}$ , respectivamente. Los volúmenes son calculados para diferentes cantidades de  $^{99}\text{Mo}$ , siendo estos datos ingresados en la memoria del controlador del módulo dispensador de jeringa.

### 2. Descripción del diseño

El diseño integral del equipo se desarrolló usando el software SolidWorks y la fabricación de las piezas fue realizada mediante una impresora 3D, empleando ABS

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

como material estructural.

El diseño mecánico del equipo consta de una jeringa de precisión de 1 mL acoplada al puerto de salida de una válvula solenoide, el émbolo de esta jeringa está sujeto a un husillo que se desplaza de forma lineal a lo largo de un tornillo sin fin de rosca trapezoidal y 4 mm de paso. El tornillo sin fin está sujeto en su parte superior a un travesaño y soportado por un rodamiento para evitar posibles fuerzas de rozamiento. En su parte inferior está acoplado a un engranaje que forma parte de la caja reducción tipo sin fin-corona.

El diseño de la caja de reducción será tal que permita una relación de reducción de 28:1. La transmisión de movimiento angular de la caja reductora se realiza mediante un motor paso a paso el cual estará unido mediante un acople al eje de la caja de reducción.

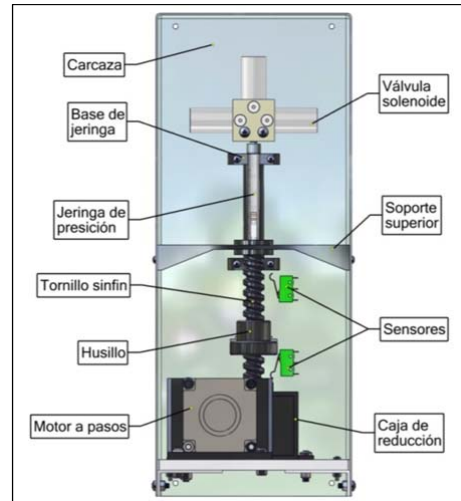


**Figura 1.** Vista isométrica del módulo para el control de volumen.

La electrónica para el control del equipo consta de un microcontrolador Arduino Leonardo conectado a un driver de potencia DRV8825. El microcontrolador genera la secuencia de señales para el movimiento del motor los cuales serán amplificadas por el driver de potencia. El control de volumen se calcula mediante la relación matemática de los pasos del motor y la reducción, reflejada en el movimiento lineal del émbolo de la jeringa acoplado al husillo. La posición del émbolo será controlada mediante sensores de final de carrera colocados en los límites superior e inferior del recorrido del husillo.

Las Figuras 1 y 2 muestran el diseño 3D del

módulo para el control automático de volúmenes.



**Figura 2.** Vista frontal del módulo para control de volumen.

### 3. Componentes principales y cálculos de diseño

3.1 Se utilizó una válvula solenoide de 3 entradas (3 solenoides) y una salida, cuyas características más resaltantes son el cuerpo y diafragma de la válvula de material de teflón, resistente e inerte a la mayoría de compuestos químicos.

3.2 Se utilizó una jeringa de precisión de 1 mL, material de vidrio borosilicato con émbolo de aluminio cuyo extremo en contacto con el líquido está revestido en teflón.

3.3 El motor paso a paso seleccionado corresponde al modelo 23KM-K250V, cuya performance frecuencia vs torque se muestra en la Figura 3.

3.4 Para el cálculo de torque del motor se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Par de arranque de los rodamientos es despreciable, tanto en la caja de reducción como en los apoyos del husillo.
- El momento de inercia de la carga será la suma de los momentos de inercia de la reducción sin fin-corona más el momento de inercia del husillo con su tuerca, con respecto al eje del motor.
- El torque necesario para vencer las fuerza de contacto que se oponen al inicio del movimiento en la transmisión husillo-tuerca y en la transmisión sin fin-corona estarán consideradas dentro de la variable  $T_p$ , cuyo

valor dependerá del material, diseño y la precisión del maquinado para cada componente.

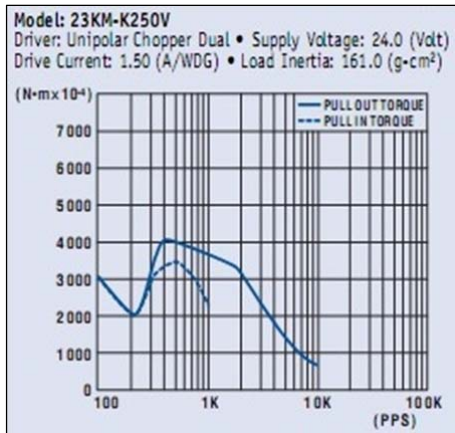


Figura 3. Curva frecuencia vs torque [2].

Para determinar el torque de aceleración en la transmisión mecánica, empleamos la ecuación 1.

$$T_a = \alpha J + T_f + T_p \quad \dots (1)$$

Donde:

$T_a$  = Torque requerido para acelerar (g.cm)

$\alpha$  = Aceleración angular (rad/s<sup>2</sup>)

$J$  = Inercia total (g.cm<sup>2</sup>)

$T_f$  = Torque por fricción (g.cm)

$T_p$  = Torque por transmisión (g.cm)

La inercia total incluye la de la carga y la del rotor del motor. El momento de inercia de la carga con respecto al eje del motor lo obtenemos del software de diseño SolidWorks, considerando el material de la caja de reducción y el husillo de ABS:  $J_1 = 3859.332 \text{ g.cm}^2$ .

De las especificaciones técnicas del motor obtenemos:  $J_m = 150 \text{ g.cm}^2$ .

Se considera la velocidad de movimiento del motor a pasos de 800 pps (0.8 kHz).

Reemplazando en 2:

$$T_a = 1028.22 \text{ g.cm} + T_f + T_p$$

Donde el torque debido a las fuerzas de fricción y el torque de transmisión de movimiento estarán incluidos al aplicar un factor de seguridad de 3 al torque de carga:

$$T_a = 3084.66 \text{ g.cm} = 3.085 \text{ kg.cm}$$

La fricción entre el émbolo y las paredes de la jeringa, al iniciar su movimiento, es superado debido a la caja de reducción la que

aumenta el torque entregado por el motor a pasos en un factor igual al índice de reducción de diseño, es decir el torque aumenta 28 veces su valor.

El motor seleccionado cumple con las necesidades de diseño manteniéndose sobre el valor calculado para la frecuencia de funcionamiento considerado.

3.5 Diseño de la reducción sinfín-corona: La figura 4 muestra la geometría 3D de la reducción sinfín-corona. Para el diseño se tomaron las siguientes consideraciones:

- Número de dientes de la corona ( $N_G$ )=28
- Paso diametral= 24 dientes/pulgada
- Número de entradas del sinfín ( $N_w$ )=1

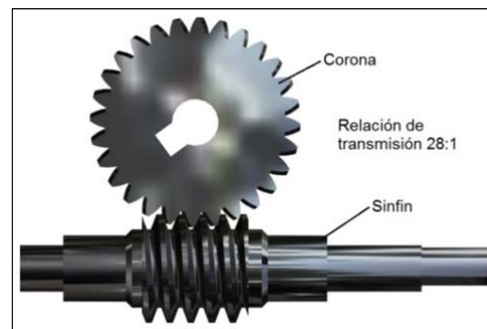


Figura 4. Reducción mecánica sinfín-corona.

Con los cálculos correspondientes obtenemos los parámetros comunes del diseño del sistema de reducción sinfín - corona mostrada en la Tabla 1; mientras que en la Tabla 2, se muestran las variables de diseño de la geometría de los dientes del sistema de reducción sinfín – corona.

Tabla 1. Parámetros comunes.

Descripción	Cantidad
Paso axial (Px)	3.325 mm
Paso circular (Pc)	3.325 mm
Paso diametral (Pd)	24 dientes/pulg
Angulo de avance ( $\lambda$ )	4.33°
Diámetro de paso de la corona (Dg)	29.633 mm
Diámetro de paso del sinfín (Dw)	13.97 mm
Número de dientes de la corona ( $N_g$ )	28
Número de entradas del sinfín ( $N_w$ )	1
Relación de velocidades (RV)	28
Distancia entre centros (C)	21.802 mm
Ancho de cara de la corona (Fg)	7.976 mm

**Tabla 2.** Dimensiones de los dientes sinfin-corona.

Descripción	Cantidad
Addendum (a)	1.058 mm
Profundidad total (ht)	2.283 mm
Profundidad de trabajo (hk)	2.117 mm
Dedendum (b)	1.225 mm
Diámetro de la raíz del sinfin (Drw)	11.521 mm
Diámetro exterior del sin fin (Dow)	16.087 mm
Diámetro de raíz de la corona (Drg)	27.184 mm
Diámetro de garganta de la corona (Dt)	27.517 mm

El sistema de reducción tiene un ángulo de avance de  $4.33^\circ$  ( $<5^\circ$ ), por lo que presenta una característica de autobloqueo, evitando así que un par torsional aplicado a la corona genere un movimiento rotatorio del sinfin [3].

3.6 Diseño de husillo-tuerca: La relación del movimiento lineal de la tuerca estará en función del paso considerado en el husillo. Para el diseño se consideró un paso de 4mm, es decir que por cada vuelta que da la corona, la tuerca se moverá 4 mm en dirección del eje z. El diseño 3D se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.** Vista husillo-tuerca.

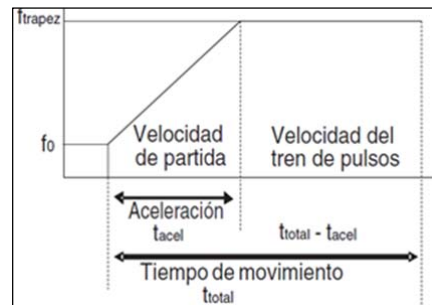
#### 4. Electrónica y control

Durante los ensayos el motor con carga “Pull in” obtiene el máximo torque a 600 Hz de velocidad con un consumo de corriente por bobina de aproximadamente 1.4 A y para máxima velocidad “Pull out” se eligió que a 0.98 kHz el consumo por bobina es de 1.3 A. Para lograr equilibrar dichas corriente el circuito de potencia del motor debe calibrarse a un voltaje de referencia o “Vref” de 0.95 V, obteniendo 1.9 A de suministro de corriente nominal. Debido a que la corriente por

bobina es del 70 % de la corriente nominal [4] entonces resulta 1.33 A la corriente por bobina.

Se escogen estos valores muy próximos debido a que el driver DRV8825 no permite señales de entrada para variar el voltaje controlado por PWM a su “Vref”, sino más bien tiene un potenciómetro conectado y se varía manualmente [5]. Debido a este impedimento no se puede lograr llegar a más velocidad de “Pull out”, porque la caída de corriente disminuye muy rápidamente de 1.1 kHz hasta 10 kHz trayendo dificultades al movimiento de velocidad máxima con carga del equipo (Figura 3).

4.1 Perfil trapezoidal: La Figura 6 muestra el perfil para el movimiento del motor paso a paso.



**Figura 6.** Perfil trapezoidal [6,7].

Los pulsos de aceleración y del movimiento constante se establecen según:

- Aceleración:  

$$P_{acel} = (f_{Trapez} - f_0) \times t_{acel}$$
- Movimiento constante:  

$$P_{cte} = (f_{Trapez}) \times (t_{Total} - t_{acel})$$

Siendo:

$$f_0 = \text{Velocidad de partida}$$

$$t_{acel} = \text{Tiempo de aceleración}$$

$$f_{Trapez} = \text{velocidad constante}$$

$$t_{total} = t_{acel} + t_{cte}$$

Se quiere que el sistema tenga una frecuencia inicial  $f_0$  de 600 Hz, una velocidad trapezoidal  $f_{Trapez}$  de 980 Hz la cual el tiempo de aceleración sea de 1 segundo dando.

$$P_{acel} = 380 \text{ pulsos}$$

En el caso del  $P_{cte}$  no será calculado en base al tiempo, sino en función al volumen que se

quiera. Para calcular la velocidad en rpm del motor se usa la siguiente fórmula [8]:

$$f_{Trapez} = \frac{V_{rpm} \times 360 \frac{\text{ángulo}}{\text{rotación}} \times n \frac{\mu \text{ pasos}}{\text{pasos}}}{60 \frac{\text{segundos}}{\text{minutos}} \times \theta \frac{\text{ángulo}}{\text{pasos}}}$$

Siendo:

$n$  = Fracción entre micropasos y pasos

$\theta$  = Ángulo de paso del motor

$$980Hz = \frac{V_{rpm} \times 360 \frac{\text{ángulo}}{\text{rotación}} \times 1 \frac{\mu \text{ pasos}}{\text{pasos}}}{60 \frac{\text{segundos}}{\text{minutos}} \times 1.8 \frac{\text{ángulo}}{\text{pasos}}}$$

$$V_{rpm} = 294$$

4.2 Circuito de potencia del motor: Para suministrar la corriente necesaria para el motor se diseña y construye un circuito de potencia que sirva de interfaz entre el microcontrolador y el motor, por lo que seleccionamos el Driver DRV8825 para motores Bipolares-Unipolares. El circuito es alimentado a una fuente de 24 V, contiene filtros pasa-bajo pasivos de frecuencia de corte de 1.5 kHz y un Switch Trigger para mejorar la señal PWM proveniente del microcontrolador y de forma opcional se incorporó unos diodos Schottky (Figura 7). Los relays recibirán señales de activación desde el microcontrolador activando las electroválvulas.

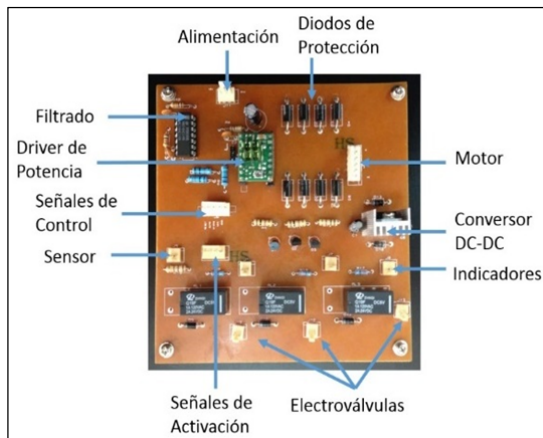


Figura 7. Circuito de potencia.

4.3 El diagrama de flujo del sistema de control se muestra en la Figura 8, en ella podemos observar las conexiones entre el microcontrolador, las señales de entrada de los sensores, el teclado y las señales de salida hacia las electroválvulas, el motor, un LCD y una alarma.

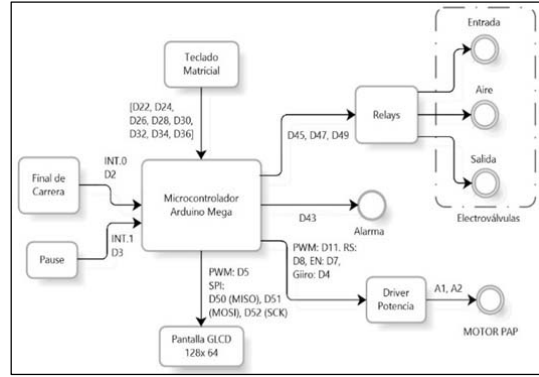


Figura 8. Diagrama de conexión.

4.4 La secuencia de funcionamiento se describe en la Figura 9. Al encender el equipo, tiene un sistema de auto-calibrado, en caso que el apagado anterior haya resultado con algún problema o falla en su proceso. Posteriormente, le pedirá al usuario que digite los volúmenes de eyección y las veces que quiera extraer el mismo volumen si lo desea. Luego debe pulsar **Enter** para ejecutar el proceso, este bucle revisará si los datos ingresados son o no correctos y convertirá el volumen  $V_{\mu L}$  ingresado según ecuación a pasos del motor.

$$Pasos = V_{\mu L} \times 84$$

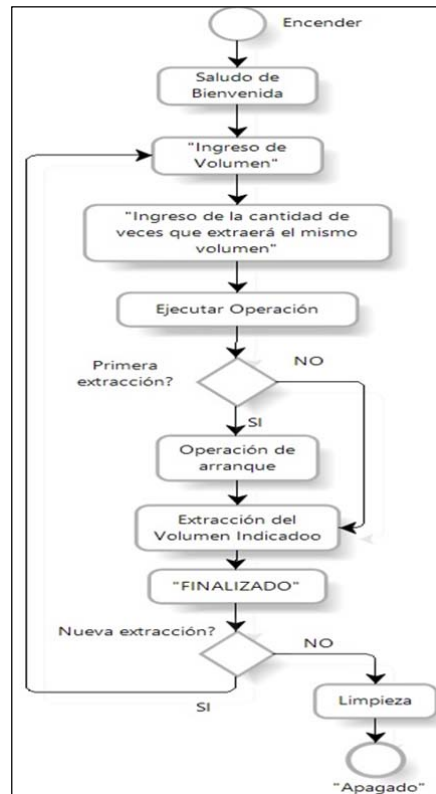


Figura 9. Diagrama de control.



## 5. Descripción del funcionamiento

El módulo extrae volúmenes del eluato de solución salina de NaCl al 0,9 % conteniendo el  $^{99m}\text{Tc}$  mediante el mecanismo impulsado por el motor paso a paso que estará acoplado al eje del sinfín en la caja de reducción. Al transmitirle un movimiento angular este hace girar a la corona que a su vez esta acoplada al eje del husillo. El índice de reducción en la caja es de 28:1, es decir que por cada 28 vueltas que le transmite el motor al tornillo sinfín este hace girar una vuelta a la corona. La corona le transmite el movimiento angular al husillo, al cual esta acoplado el émbolo de la jeringa; el paso entre el husillo y la tuerca es de 4 mm, entonces por cada vuelta de la corona la tuerca se desplaza linealmente 4 mm hacia arriba o hacia abajo dependiendo del sentido de giro, siendo la relación de trasmisión de movimiento entre el eje del motor y la tuerca de 0.143 mm/revoluciones.

Dado que la longitud de carrera del émbolo en la jeringa es de 60 mm será necesario 420 revoluciones para que el motor desplace el émbolo. Las Figuras 10 y 11 muestran la electrónica implementada y el módulo de control de volúmenes, respectivamente.

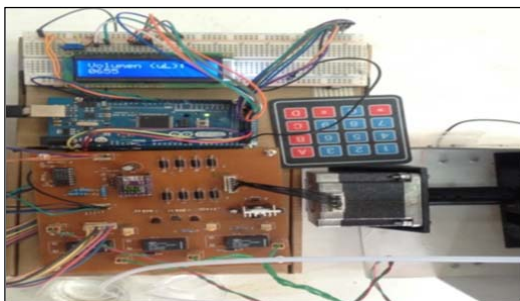


Figura 10. Electrónica de control.

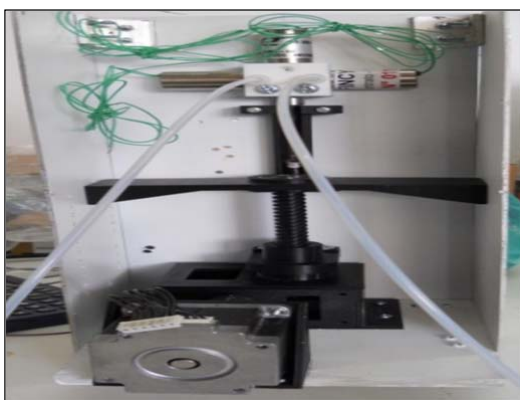


Figura 11. Módulo para el control de volumen.

## 6. Resultados

Para determinar la precisión del módulo de control implementado se mide el volumen extraído por diferencia de pesada en rangos de volumen de 50  $\mu\text{L}$  a 750  $\mu\text{L}$ , expresándose la precisión obtenida en términos de coeficiente de variación relativa porcentual.

Tabla 3. Volumen de extracción medido por diferencia en balanza calibrada de 0,1 mg de precisión.

Volumen prefijado ( $\mu\text{L}$ )	750	625	500	250	150	100	50
N	20	6	20	20	20	20	20
Volumen extraído ( $\mu\text{L}$ )	708	58,6	460	218	114	64	14,5
Desviación estándar ( $\mu\text{L}$ )	2,3	1,4	3,8	2,5	1,5	1,7	1,6
CV (%)	0,3	0,2	0,8	1,1	1,3	2,6	11,3
Error ( $\mu\text{L}$ )	42	39	40	32	36	36	35,5
Tiempo (s)	603	581	559	517	500	491	483

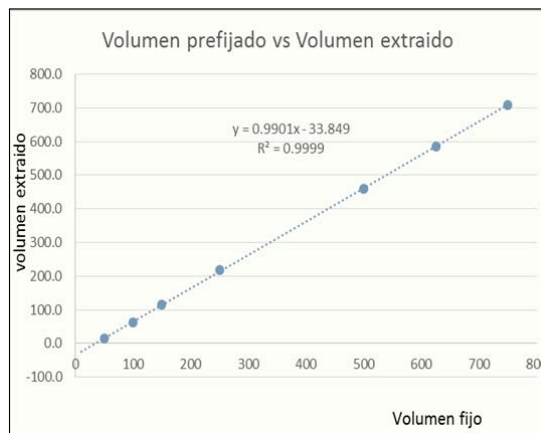


Figura 12. Relación entre volumen prefijado y volumen extraído en módulo de control.

En la Figura 12 se muestra la relación lineal entre el volumen prefijado y extraído con un coeficiente de correlación de 0.9999 e intercepción de 34  $\mu\text{L}$ .

Se corrige el sesgo observado mediante ajuste adicional cuyo resultado se observa en la Tabla 4, en donde se aprecia que para un

volumen de extracción de 100  $\mu\text{L}$  se obtiene un error de  $\pm 0.1 \mu\text{L}$ .

**Tabla 4.** Ajuste realizado para volumen de extracción prefijado en 100  $\mu\text{l}$  (N=2).

Volumen prefijado ( $\mu\text{L}$ )	Volumen extraído ( $\mu\text{L}$ )	Error (%)	Tiempo de extracción (s)
100	100,1	-0.1	494
100	99,9	+0.1	493

## 7. Conclusiones

Se ha implementado un módulo para la extracción automática de volumen, con un error relativo  $\pm 0.1 \%$  para 100  $\mu\text{L}$  con tiempos de extracción de 480 s.

La electrónica asociada y mecánica implementada cumplen con las características necesarias para el funcionamiento del módulo, no obstante se necesita bajar los tiempos de extracción a menos de 300 s para un óptimo trabajo.

## 8. Agradecimiento

A INNOVATE-Perú, Contrato N° 162-FINCYT-1-A-2013, por el apoyo económico y financiero brindado para el desarrollo de la presente investigación.

## 9. Referencias

- [1]. Chattopadhyay Sankha, *et al.* A computerized compact module for separation of  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -radionuclide from molybdenum. *Applied Radiation and Isotopes*. 2012; 70: 2631-2637.
- [2]. Minibea Co., Ltd. [homepage]. Hybrid stepping motors. Standard type. Disponible en: <http://www.eminebea.com/en/product/rotary/steppingmotor/hybrid/standard/>.
- [3]. Mott Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 4ta ed. México: Prentice Hall; 2006.
- [4]. NMB Corporation. [homepage]. Precision steps motors. Disponible en: [http://www.cncitalia.it/upload\\_ele/pap\\_nmb.pdf](http://www.cncitalia.it/upload_ele/pap_nmb.pdf)
- [5]. Texas Instruments. [homepage]. DRV8825 Stepper Motor Controller IC. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs73f/slvs73f.pdf>
- [6]. Fernández Aragón Iñigo. Control de un motor paso a paso: PIC, USB, C#. [Tesis de Maestría]. Navarra: España: Universidad Pública de Navarra, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación; 2011.
- [7]. Tauroni Gil R. Experiencia con motores paso a paso: Diseño de sistemas basados en microprocesadores. ITIS 2008-2009. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- [8]. Automatic Direct. Sistema de motores paso a paso: Manual N° STP-SYS-MSP. 2007. [homepage]. Disponible en: <https://www.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/surestepmanualsp.pdf>