

## Modernización del analizador automático de muestras de uranio “RAPIDURAN”: Primera parte

Javier Gago\*, Oscar Baltuano, Eduardo Montoya, Marco Munive, Patricia Bedregal,  
Yuri Hernández, Pablo Mendoza, Mario Mendoza, Marco Ubillús, Blanca Torres

Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear,  
Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

### Resumen

Se presenta los principales aspectos de la modernización de un analizador automático para lotes de muestras de uranio, RAPIDURAN, un equipo construido en Finlandia en la década de los años 80. Este es un sistema complejo que posee muchos componentes neumáticos, mecánicos y electrónicos. En la actualidad, el sistema electrónico ha quedado obsoleto y presenta fallas frecuentes por lo que su operación no es confiable. Por esa razón, se hicieron trabajos de modernización de este sistema utilizando componentes electrónicos de alta tecnología. Para esta labor fue necesario realizar un proceso de reingeniería que incluyó primeramente ingeniería inversa para determinar la operación de cada componente; posteriormente, el mantenimiento mecánico integral y finalmente el diseño y montaje de un nuevo sistema para el control electrónico.

### Abstract

Main aspects of the modernization of RAPIDURAN system, an automated analyzer for batches of samples of uranium built in Finland in the 80's decade are presented. This is a complex system that comprises many pneumatic, mechanic and electronic components. At present, the electronic system is outdated and presents frequent failures, being its operation not reliable. For this reason, actions to modernize this system using high technology electronic components were taken. To carry out this work and in order to understand the operation of each component, firstly it was necessary to perform a reengineering process using inverse engineering. Thereafter, an integral maintenance of the pneumatic and mechanic system was performed, followed by the design and assembly of a new system for electronic control.

### 1. Introducción

Se conocen diversidad de técnicas para realizar la cuantificación de uranio, cada una de ellas presentan ventajas y limitaciones. Por ejemplo, la técnica de análisis por activación neutrónica basada en la reacción  $^{238}\text{U}(n,\gamma) \ ^{239}\text{U} \rightarrow \ ^{239}\text{Np}$  presenta el inconveniente de un tiempo de decaimiento de varios días. Adicionalmente, la energía de la radiación gamma, emitida por el  $^{239}\text{Np}$ , es baja, por lo cual se interfiere con la radiación de Bremsstrahlung producida por el  $^{32}\text{P}$ .

También hay diversas técnicas que se basan en la medición de algunos de los parámetros característicos del proceso de fisión del uranio para su cuantificación.

El núcleo compuesto de U-235 cuando se fisiona puede escindir en más de 40 formas diferentes, dando lugar a unos 80 productos de fisión primarios (fragmentos de fisión). El

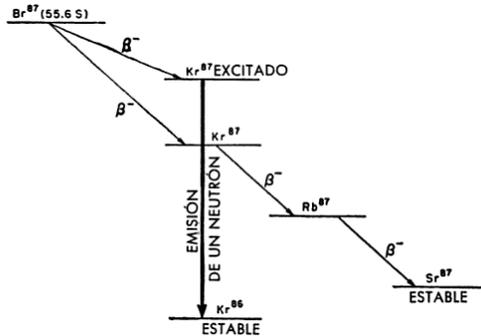
intervalo de los números másicos que corresponden a estos productos van desde 72 (Zinc) a 160 (Terbio). Se define el rendimiento de fisión como el porcentaje de fisiones nucleares que originan productos de un número másico determinado.

Las masas de casi todos los productos de fisión se agrupan en dos grandes categorías: un grupo "ligero" con números másicos comprendidos entre 80 y 110, y un grupo "pesado" con números másicos comprendidos entre 125 y 155.

Los neutrones liberados en el proceso de fisión se dividen en dos categorías: instantáneos y retardados. Los primeros constituyen más del 99 % del total de neutrones de fisión y se liberan en un intervalo de tiempo de 10-14 segundos a partir de la fisión. Una vez que finaliza la

\* Correspondencia autor: jgago@ipen.gob.pe

fisión no hay más neutrones instantáneos pero los fragmentos de fisión continúan emitiendo neutrones retardados durante un período de varias horas con una intensidad decreciente.



**Figura 1.** Mecanismo de emisión de neutrones retardados para un producto de fisión.

Del estudio experimental sobre la velocidad de emisión de los neutrones retardados se ha observado que éstos se pueden distribuir en seis grupos (Tabla 1), cada uno de los cuales se caracteriza por decaer exponencialmente con una velocidad definida. Gran parte de los productos de fisión, ricos en neutrones, experimentan desintegración beta, en la que se produce un protón a partir de un neutrón porque hay un exceso de neutrones frente a protones; sin embargo, en algunos casos el descendiente se produce en un estado excitado, con suficiente energía para que sea posible la emisión de un neutrón (Figura 1). De esta forma surgen los neutrones retardados, viniendo determinado el periodo característico de cada grupo por el periodo del progenitor o precursor del emisor neutrónico real.

**Tabla 1.** Fracción “q” de neutrones retardados producidos por fragmentos de fisión, según el tipo de isótopo.

Grupo	$T_{1/2}$ (s)	U 235	U 238	Th 232
1	55,6	0,021%	0,02%	0,021%
2	22,7	0,141%	0,22%	0,182%
3	6,22	0,127%	0,25%	0,129%
4	2,30	0,255%	0,61%	0,199%
5	0,61	0,074%	0,35%	0,052%
6	0,23	0,027%	0,12%	0,027%
Total		0,650%	1,57%	0,200%

La pequeña fracción (q) de neutrones que es emitida por los fragmentos de fisión se utiliza

para clasificar estos fragmentos en 6 grupos, según los periodos de semi-desintegración ( $T_{1/2}$ ) que van desde 0,2 hasta 55,6 segundos (Tabla 1).

La energía media de estos neutrones retardados se encuentra en el orden de 0,5 MeV; a diferencia de la mayor energía de los neutrones inmediatos (2 MeV en promedio). Esta característica los hace fácilmente detectables a través de detectores gaseosos de BF3 o He3 si previamente se les hace pasar a través de un medio moderador.

La medición de los neutrones retardados puede usarse entonces para cuantificar el contenido de uranio en una muestra, con un nivel de sensibilidad muy elevado. Esta técnica sin embargo implica restricciones importantes. Por un lado, el tiempo de irradiación de las muestras debe ser sumamente corto, del orden de algunas decenas de segundos y la medición de los neutrones debe hacerse en un periodo inmediato muy corto.

Por otro lado, la baja eficiencia intrínseca los detectores gaseosos, obliga a utilizar varios detectores simultáneamente para compensar esta limitación y mejorar la sensibilidad. También es necesario el uso de materiales moderadores para reducir la energía de los neutrones hasta los niveles requeridos para obtener la máxima eficiencia de detección.

Los requerimientos anteriores hacen que la técnica de medición de uranio mediante neutrones retardados requiera el uso de equipos especialmente diseñados para esta técnica y con niveles de automatización elevados debido a los tiempos cortos de irradiación y medición involucrados.

El sistema “RAPIDURAN”[1] es un analizador automático de lotes de muestras de uranio que se basa en la medición de los neutrones retardados producidos por la fisión de uranio contenido en una muestra que ha sido irradiada previamente en el núcleo de un reactor nuclear.

Este equipo fue construido en la década de los 80’s en el Reactor Laboratory del Technical Reserch Centre of Finland (VTT). Es un sistema bastante complejo que involucra diversidad de componentes mecánicos, neumáticos, sensores ópticos y magnéticos para el intercambiador de

muestras, 6 detectores de He-3 e instrumentación nuclear asociada para la cadena de medición, y dispositivos electrónicos y electromecánicos de control, todos ellos manejados de forma centralizada por una computadora ROCKWELL R6500, en la actualidad, bastante obsoleta.

Debido a la antigüedad de la computadora central y algunos dispositivos electrónicos, la operación del equipo frecuentemente presentaba fallas que con el paso del tiempo se hicieron cada vez más difíciles de subsanar por la falta de componentes de repuesto y de información técnica detallada.

Por esta razón, teniendo en cuenta además la creciente demanda de análisis de muestras de uranio y considerando el buen estado de todos los componentes mecánicos y neumáticos; se consideró conveniente la modernización de todos los subsistemas electrónicos del mismo: el de control, la instrumentación asociada y el cambio de la computadora central por otro dispositivo de automatización más moderno.

Para ello ha sido necesario determinar la secuencia de funcionamiento de cada componente mecánico, electrónico, neumático y los sensores correspondientes para su adecuado funcionamiento.

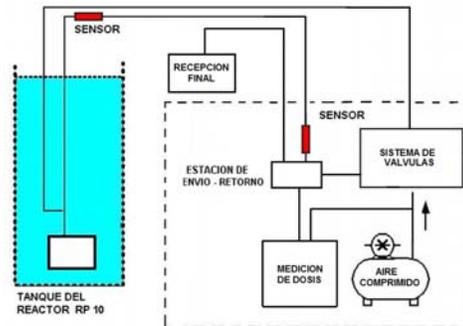
De forma muy simplificada, el sistema toma una muestra del intercambiador automático, realiza el pesaje de la misma, luego es enviada al cabezal de irradiación en el reactor para luego retornar al banco de detectores donde se realiza la medición de los neutrones retardados. Por último, la muestra es enviada a un tacho y luego se repite todo el proceso.

## 2. Descripción del sistema neumático

Para el transporte de las cápsulas porta muestras, se utiliza un sistema neumático de fase diluida de presión positiva para transportar materiales desde un solo punto a uno o múltiples destinos, a distancias más largas y con mayor capacidad de la que es posible usando sistemas de vacío.

Para ello, se utiliza una compresora de desplazamiento positivo con uno o múltiples puntos de entrada al proceso. Se utiliza una compresora en lugar de una bomba de vacío, por que este sistema posee varios cilindros (pistones) neumáticos para realizar el envío y

retorno de la cápsula porta muestra. Los sistemas con bomba de vacío solo se emplean cuando no son requeridos cilindros neumáticos. Los sistemas a presión ofrecen una mayor eficiencia que los de vacío, debido a que pueden transportar los materiales a mayores distancias y pueden soplar directamente en recipientes del proceso. La única desventaja en estos sistemas de aire comprimido es la velocidad con que se transportan las muestras, esta debe ser controlada para evitar su deterioro.



**Figura 2.** Esquema del transporte de muestras a la facilidad de irradiación en el reactor RP-10.

El RAPIDURAN posee un intercambiador de muestras que permite enviar 120 muestras de forma consecutiva y programada. El equipo está instalado en la Sala Experimental del reactor RP-10 y esta compuesto principalmente por una compresora, un conjunto de cilindros y válvulas neumáticas que incluye un tablero para el ordenamiento de las cápsulas, una balanza electrónica, sistemas de medición de dosis, mangueras de polietileno y el cabezal de irradiación insertado en la piscina del reactor (Figura 2).

Las muestras son colocadas en una mesa con una ranura que sirve de guía. Y cada muestra se mueve en forma controlada por un motor de 24VAC (Figura 6).

### 2.1 Secuencia de operación del sistema eléctrico-mecánico

En el diagrama esquemático de la figura 3, se muestran los distintos componentes mecánicos-eléctricos, la distribución que guarda entre cada una de ellas y el circuito que forma el flujo de aire para la operación de cada componente.

El proceso para una muestra sigue la siguiente secuencia:

- Se inicia habilitando el ingreso de aire comprimido al sistema a través de la línea principal la que debe marcar una presión de 4 bar y en la línea de control entre 1 y 2 bar. También se habilita la alimentación eléctrica.
- Se corre una posición la banda transportadora porta muestras del intercambiador, habilitando un motor eléctrico de 24VAC.
- Se activa el cilindro neumático CYL4 a través de la electroválvula V6, el cual mueve una compuerta que permite que la cápsula se desplace a un compartimiento acondicionado en el pistón del cilindro neumático CYL3, que en estado normal permite pesar la muestra.
- Finalizado el pesaje, se activa una electroválvula V8 para accionar el cilindro CYL3 y trasladar la cápsula al compartimiento de recepción en el pistón de CYL1.
- El cilindro CYL1 cambia de estado trasladando la estructura a la posición de envío. En esta operación se debe verificar que la electro válvula V10 esté desactivada y CYL1 se moverá (posición lado izquierdo) por acción de la electro válvula V11.
- Inmediatamente se inicia proceso de envío hacia el reactor. Se acciona la electro válvula V10, que controla el cilindro neumático CYL2, y a continuación la electro válvula V12. Esto se mantiene hasta la llegada de la cápsula al cabezal de irradiación, lo cual es detectado por un sensor de paso en boca de tanque del reactor. Se desactivan las válvulas V10 y V12 para iniciar el proceso de irradiación.
- Finalizado el proceso de irradiación se traslada CYL1 al estado de recepción (posición lado derecho) mediante la activación de la electroválvula V11.
- Se inicia el proceso de retorno de la cápsula hacia la caja de medición, para lo cual se activan primero la electroválvula V10 y luego electro válvula V2. Un sensor óptico en la caja de medición indica la finalización del retorno de la cápsula.
- La muestra permanece en la caja de medición durante el tiempo de medida.
- Finalizada la medición, se mueve CYL1 a la posición de envío al tacho; mediante la activación de la electro válvula V10 y luego la electro válvula V13. Con esto, se envía al tacho blindado para el decaimiento la

muestra. Un sensor óptico instalado cerca del tacho indica la llegada de la muestra al mismo.

- Finalmente, CYL1 retorna a la posición de recepción mediante la activación de la electro válvula V11, con lo cual todo el sistema queda listo para repetir el proceso con la siguiente muestra.

Todo el sistema esta diseñado para mover y trasladar mecánicamente las cápsulas en bloques de 120 muestras en forma secuencial y controlada. La Figura 4 muestra el diagrama de tiempos del funcionamiento de las válvulas necesarias, descritas anteriormente, para realizar las operaciones de envío/retorno de cada una de las muestras.

## 2.2 Sub-Sistema de control electrónico

En la Figura 4 se observa que se requieren 9 señales de control (1 para el motor de la faja transportadora y 8 para las electroválvulas). El sistema también cuenta con 3 sensores magnéticos para garantizar la posición correcta de las electroválvulas V10 y V11 antes de cada operación. Y por otro lado, además de los sensores ópticos con que el equipo contaba originalmente, se le acondicionaron algunos más para el seguimiento de la muestra durante su recorrido, haciendo un total de 6 sensores ópticos infrarrojos.

Considerando que los tiempos de respuesta necesarios, en el orden de algunos milisegundos, no implicaban requerimientos muy exigentes desde el punto de vista de la velocidad del sistema electrónico, se optó por utilizar un microcontrolador PIC16F877 [2] de la familia Microchip.

Este dispositivo operando con un cristal de 4 MHz, es capaz de realizar 1 MIPS (millón de instrucciones por segundo), lo cual satisface perfectamente los requerimientos de tiempo de respuesta.

Es necesario mencionar que este dispositivo se ha dedicado exclusivamente al control del sistema neumático, por lo cual se prevé utilizar un dispositivo más rápido y potente, para realizar las tareas de recolección de datos de la muestra, el manejo de las cadenas de instrumentación nuclear (amplificadores y SCA's) y las tareas de comunicación con la red CAN [3]. La forma como ambos microcontroladores se comuniquen, aún no

ha sido establecida y no es relevante en este momento.

El PIC16F877 [2] dispone en total de 33 líneas de E/S. De esta cantidad, 9 se utilizan

para producir la secuencia mostrada en la Figura 4, 3 líneas son usadas leer los sensores magnéticos y 6 de ellas para el monitoreo de los sensores ópticos infrarrojos.

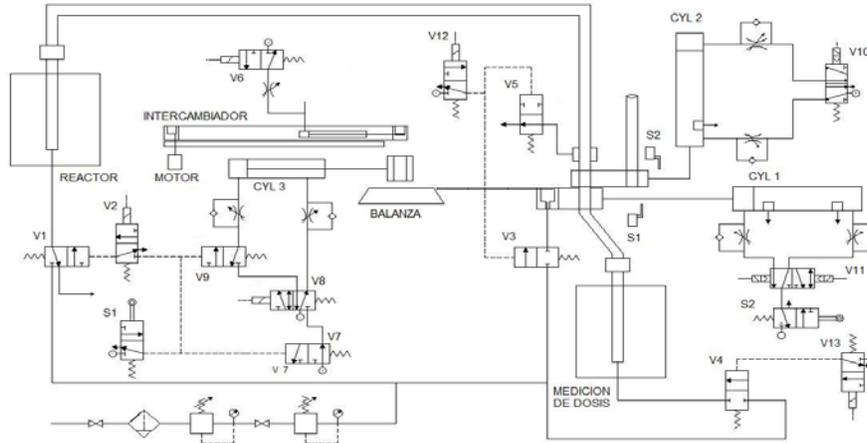


Figura 3. Esquema del circuito electromecánico del Sistema Neumático del RAPIDURAN.

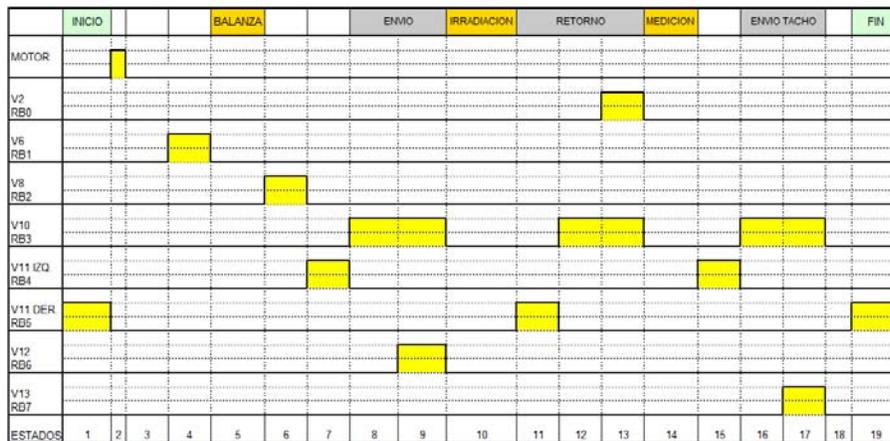


Figura 4. Diagrama de tiempos para la operación del sub-sistema neumático.

Además, se ha considerado el uso de un módulo LCD para mostrar mensajes de operación de utilidad para el usuario. Este módulo operando en modo de 4 bits, requiere 7 líneas adicionales y utiliza retardos de software para la temporización. Para las pruebas previas se ha considerado el uso de 2 líneas adicionales para iniciar y detener la secuencia de operación mediante pulsadores. Finalmente, y aunque en este momento no es relevante, puesto que la unidad opera en modo stand-alone, se le ha dotado al controlador la posibilidad de ser operado en forma remota a través de la interfase RS-232 que posee y que requiere el uso de 2 líneas de E/S. En el futuro, esta conexión podrá ser utilizada para comunicarse con el controlador

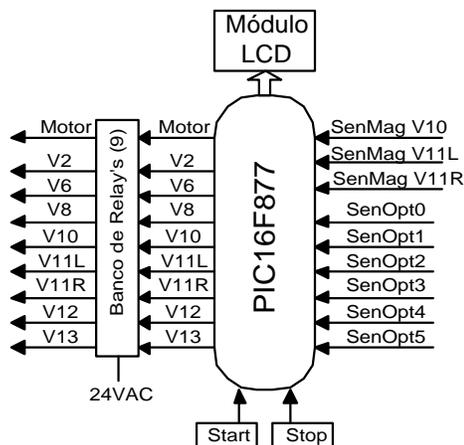
maestro que accederá a la red CAN. Puede notarse entonces, que se requieren en total 29 líneas quedando aún 4 líneas libres para cualquier otra función.

El firmware o programa para el microcontrolador ha sido escrito en lenguaje C, utilizando el compilador Hi-Tech PICC STD [4] e integrado dentro del entorno de desarrollo MPLAB IDE de Microchip.

Se han utilizado las librerías LCD, USART, DELAY y EEPROM que proporciona el propio compilador de Hi-Tech, las cuales han sido configuradas para cumplir con los requerimientos de la aplicación.

El funcionamiento está basado en una máquina secuencial que posee 19 estados

(Figura 4) en la cual cada estado configura las líneas de salida para el control del motor y las válvulas. Previamente a cada estado, el controlador está programado para verificar los estados correctos de los sensores ópticos y magnéticos correspondientes.



**Figura 5.** Diagrama simplificado de la utilización de las líneas de E/S del microcontrolador.

Debido a que todas las electroválvulas y el relay de alta corriente que controla el motor operan con 24VAC, se ha recurrido a un banco de 9 relays de baja corriente para manejar estas cargas con las señales TTL del microcontrolador (Figura 5).

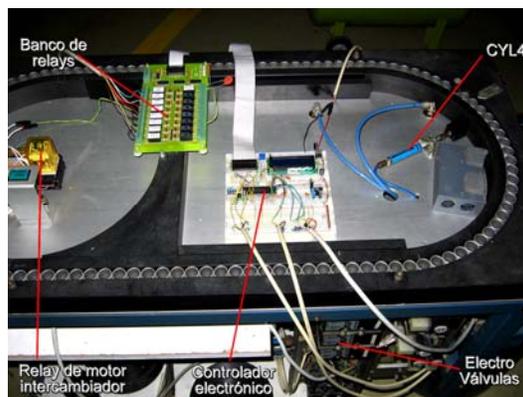
### 3. Operación, Resultados y Discusión

Se puso en operación el sistema, al que previamente se le realizó el mantenimiento de todos sus componentes. Se reemplazaron los sensores ópticos para estandarizarlos a un modelo de fácil adquisición en el mercado local. El sistema de control electrónico fue montado sobre un protoboard (Figura 6) y se utilizó una tarjeta de relays PCLD-785 marca PC-LabCard [5].

Se realizaron 20 pruebas iniciales de toda la secuencia, observándose que frecuentemente se producía el reseteo del microcontrolador al desactivar el motor del intercambiador de muestras. Se procedió entonces a instalar una red Snubber [6] al relay correspondiente para eliminar este fallo. Luego se realizaron 100 pruebas de envío/retorno de muestras, las cuales fueron en su totalidad satisfactorias.

La duración de cada uno de los estados (Figura 4) ha sido pre-programado en el microcontrolador, pero se tiene previsto que

los tiempos de pesaje, irradiación y medición (estados 5, 10 y 14) sean programables a través del controlador maestro conectado a la red CAN.



**Figura 6.** Vista superior del intercambiador de muestras. Se observa el mecanismo para el transporte de los cilindros de aluminio que alojan las cápsulas porta muestras además del protoboard con el controlador y la tarjeta con el banco de relays.

### 4. Conclusiones

Poner en funcionamiento nuevamente el sistema mecánico del RAPIDURAN con un control electrónico más moderno, confiable, configurable y económico, es el primer paso para lograr su puesta en operación. La interconexión de este sistema con otros para realizar el control nucleónico y la conexión a la red CAN es el siguiente paso para la modernización completa de este instrumento; lo que representará un paso significativo de innovación tecnológica para mejorar las capacidades analíticas disponibles.

### 5. Bibliografía

- [1] VTT Tech. RAPIDURAN. An automatic uranium analyzer. Operation Manual. Finland. 1984.
- [2] MICROCHIP. PIC16F87X Data Sheet.
- [3] Baltuano O, Montoya E. Propuesta técnica para la implementación de una red integrada de control y comunicación de instrumentos analíticos (RICCIA). [Informe interno], 2008.
- [4] Hi-Tech Software. PICC STD Compiler Manual, 2008.
- [5] PC-LabCard Series. PCLD-785. 16 Channel Relay Output Board Data Sheet
- [6] Philip C. Todd, Snubber Circuits: Theory, Design and Application. Seminar Manual SEM-900. 1993.