

Diseño e implementación del control fino automático del Reactor RA-4, usando Matlab® y software embebido

Ignacio Tabares¹, Hugo Meneghetti¹ y Gonzalo Sanchez¹

1. *Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.*
itabares@fceia.unr.edu.ar

Resumen— En este trabajo se desarrolla una interfaz entre el reactor nuclear RA-4 y una PC para permitir la implementación, en esta última, de distintos métodos de control sobre el reactor mediante el software Matlab®. La finalidad de permitir la implementación, de distintos tipos lazos de control, es lograr que el sistema funcione como una herramienta didáctica para ser usada con fines académicos dentro del área de control automático.

Palabras Clave— control fino automático, reactor nuclear, didáctica de control, real time target, control en tiempo real.

1. INTRODUCCIÓN

La interfaz desarrollada consta de un adquisidor de datos y de un driver para manejar un actuador. El adquisidor permite realizar lecturas sobre señales provenientes del reactor y enviarlas, mediante una interfaz USB, a la pc para que ésta pueda analizarlas en tiempo real. El adquisidor debe cumplir ciertos requisitos técnicos que son impuestos o bien por la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), o bien por requerimientos propios al diseño. Por otro lado, el controlador permite manejar un actuador que comanda la posición de una barra de control fino en el núcleo del RA4 y esto genera cambios de reactividad en el mismo. La posición de la barra de control fino es determinada por las correcciones realizadas por el diseño del control elegido. Dicha posición es enviada desde la PC a la interfaz si es que ésta se encuentra trabajando en el modo automático (lazo cerrado) o por la acción de los pulsadores que se encuentran en el panel frontal de la interfaz si es que esta está trabajando en el modo manual (lazo abierto).

Partiendo de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del RA-4, y basándonos en el modelo matemático del mismo, se procederá a identificar el problema planteado. Éste radica en controlar la concentración de densidad de neutrones (n) en la cámara del reactor, variando la reactividad del reactor (ρ) mediante la barra de control fino siempre partiendo de un estado crítico. Visto de esta forma es posible modelar a nuestro sistema como un sistema SISO (Single Input Single Output), cuya entrada es la posición de la barra de control (la cual es proporcional a la reactividad del reactor) y la salida es la potencia del reactor (la cual es proporcional al flujo neutrónico). Al ser tratado como un sistema SISO, luego de describir las

ecuaciones diferenciales del sistema, se pasará al modelado mediante variables de estado y por último se pasará a una función de transferencia entrada-salida del sistema.

2. DESARROLLO

2.1. Modelo Matemático

La cinética de reactores nucleares [1] plantean que, bajo condiciones de criticidad, la dependencia dinámica entre la reactividad (ρ), la densidad de neutrones (n) y la densidad de un precursor i definida como (C_i) viene dada por

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i \end{cases}$$

donde β , l y λ son constante para el reactor en estudio y representan:

- β : fracción efectiva de neutrones retardados, la cual es una constante adimensional para cada reactor.
- l : tiempo de vida efectiva de los neutrones.
- λ : constante de decaimiento del precursor.

A su vez cada precursor, C_i , se corresponde con cada uno de 6 grupos de neutrones retardados obteniéndose una ecuación diferencial de séptimo orden para $i=1..6$. Si bien estas ecuaciones diferenciales rigen la dinámica del sistema para todos los reactores nucleares, podemos hacer un modelo simplificado, sin perder generalidad, teniendo en cuenta un solo grupo de neutrones retardados, con un valor de λ que sea el promedio pesado de los λ_i de cada grupo. De esta forma obtenemos una dinámica de segundo orden, cuyas variables de estado son n y C , y de las cuales la única variable observable es n , por lo que no tendremos inconvenientes en trabajar con un solo precursor.

Bajo estas hipótesis y al trabajar con un solo grupo de neutrones retardados las ecuaciones diferenciales se reducen a lo siguiente:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\beta}{l} n + \lambda C + \frac{\rho}{l} n \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{l} n - \lambda C \quad (2)$$

La cual resulta ser no lineal por la existencia de un término en [1] donde una de las variables de estado queda multiplicada por la variable de entrada ρ . Además podemos relacionar el flujo neutrónico ϕ con la densidad de neutrones mediante: $\phi = \nu n$.

El reactor nuclear RA-4, Siemens untrerrichts reaktor - SUR 100, es un reactor de docencia e investigación, cuya potencia nominal autorizada es 1 W, el cual no presenta variaciones significativas por temperatura, no superando una variación de 0,2 °C.

2.2. Linealización del modelo

El propósito de linealizar el sistema es poder aplicar las técnicas de control moderno ampliamente conocidas. Para eso proponemos una técnica de linealización donde se obtiene un modelo incremental lineal normalizado del sistema. Si bien los modelos incrementales se calculan en torno a un punto de trabajo específico, el hecho de estar normalizado permite su aplicación para cualquier punto de equilibrio, lo que en este caso de traduce a puntos de trabajo donde el reactor esté en estado crítico.

El proceso de linealización puede consultarse en [2] y resulta ser:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3)$$

donde las matrices del sistema se describen a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{l} & \frac{\beta}{l} \\ \lambda & -\lambda \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \quad D = [0 \quad 0]$$

2.3. Del modelo de variables de estado al modelo entrada salida.

Partiendo del sistema matricial correspondiente al modelo de variables de estado dado en la Ec. (3) se puede calcular la matriz transferencia. En este caso, al tratarse de un sistema SISO la función transferencia coincide con la matriz transferencia, por lo que sólo bastará calcular esta última.

La función transferencia buscada, que relaciona la entrada y la salida del sistema resulta ser:

$$G(s) = \frac{U(s)}{Y(s)} = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B$$

la cual existe siempre y cuando $\det[(sI - A)^{-1}] \neq 0$, ya que de lo contrario la matriz $(sI - A)$ no sería invertible.

La función transferencia resulta ser:

$$G(s) = \frac{21097.046(s + 0.08)}{s(s + 154.088)}$$

Puede observarse que la función transferencia de la planta muestra los mismos polos que el sistema en variables de estado: 0 y -154.08844.

2.4. Diseño del controlador

Debido a que la señal analógica es ruidosa y que la resolución del dispositivo es alta, se produce ruido en la señal digitalizada. En los ensayos preliminares se observó como la propagación de ruido, por el diagrama de bloques, afectaba intermitentemente la posición del actuador provocando que la misma no quede en un lugar fijo, sino oscile alrededor del punto en el cual se alcanzaba el régimen crítico nuevamente.

Frente a esta problemática se optó, en un principio, correr la frecuencia del polo del corrector a -1rad/s, con el compromiso de aumentar el tiempo de respuesta; pero con la ventaja de lograr una mayor inmunidad frente al ruido, reduciendo la presencia de ruido en la señal de control. Si bien la respuesta del sistema, en este caso, era aceptable se propuso una segunda mejora en pos de optimizar la performance mecánica del actuador.

Por lo actuado, se propuso la introducción de un nuevo bloque pasa-bajo, de carácter integrativo para compensar errores por exceso o por defecto del actuador, detrás del bloque saturador. La función transferencia de este filtro es la siguiente:

$$H_{PB}(s) = \frac{0.5}{s + 0.5}$$

el cual tiene ganancia estática unitaria y polo en -0.5, lo que otorga un fuerte filtrado.

Luego de estas correcciones se observó que la dinámica del sistema era satisfactoria, logrando una buena relación de compromiso entre la dinámica deseada y la inmunidad al ruido necesaria para un buen funcionamiento del actuador.

Con estas modificaciones realizadas la función transferencia a lazo abierto resultó ser:

$$H_{LA}(s) = \frac{10000s + 843.9}{s^4 + 155.5s^3 + 231.5s^2 + 77s}$$

2.5. Implementación electrónica

Para dar solución a la problemática planteada se debe cumplimentar una serie de requerimientos, algunos debido a la reglamentación vigente de la CONEA y otros obedecen a la necesidad de implementar otros tipos de control, como podrían ser realimentación por variables de estado lo que implica la construcción de un observador. Los mismos resultan ser:

- Aislación galvánica entre el circuito de medición y el resto del mismo. Este requerimiento es solicitado por la CNEA, de modo tal que la medición no interfiera ni en el control manual del reactor, ni tampoco interfiera con el RA-4.

- Asegurar una frecuencia de muestreo del adquisidor de, como mínimo, un orden de magnitud mayor que la mayor frecuencia de la dinámica del reactor. Esto surge de la necesidad de implementar un Observador cuando se necesita estimar una variable de estado no medible como es la densidad de precursores.
- La implementación del control del sistema en tiempo real requiere una comunicación lo suficientemente rápida como para asegurar que el mismo responda en tiempo y en forma para que se adapte a las necesidades del usuario.
- La etapa de entrada debe contener una alta impedancia de entrada para drenar la menor cantidad posible hacia el circuito de medición, de modo tal que afecte lo mínimo posible a la corriente de cámara.

Nuestra propuesta de diseño es una interfaz que pueda funcionar en modo automático, para brindar el control fino automático, y un modo manual para que el usuario pueda comandar manualmente la posición de la barra de control fino.

El funcionamiento del dispositivo, en modo Automático, comienza en la medición de una señal proveniente del reactor que está relacionada con la densidad de neutrones (o el flujo neutrónico) que excursiona entre 0 y -20V. Esta señal es digitalizada mediante un ADC y enviada a un microcontrolador para su posterior re-envío hacia la computadora donde se ejecuta el software de control utilizado. Una vez que dicho software realiza la corrección necesaria, que dependerá del comportamiento deseado por el usuario, se transmite hacia el microcontrolador la información para que éste accione sobre el actuador y se efectúe dicha corrección logrando un Control Fino Automático del Reactor.

La siguiente Fig. 1 muestra el diagrama de bloques del circuito implementado de acuerdo a su funcionalidad.

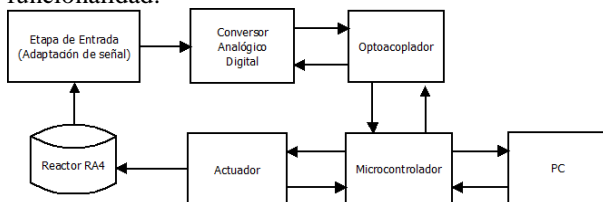


Figura 1. Etapas de la electrónica implementada

La etapa de entrada del circuito debe presentar una elevada impedancia de entrada y una ganancia unitaria, lo que se logró utilizando resistencias de elevado valor tanto en la entrada como en la realimentación del AO, resultando ser resistencias de 2,2MΩ. Los altos valores de estas resistencias, y como consecuencia los valores muy pequeños de corriente de entrada hacia el AO, presentan la necesidad de usar un dispositivo con pequeñas corrientes de bias, ya que de lo contrario, existiría un error apreciable a la salida del AO de

entrada. Se eligió, por lo tanto, el OPA2140 de Texas Instruments, que presenta una corriente bias máxima de 10pA. Vale observar además que se prevé una compensación mediante una resistencia, R9, que fue debidamente calculada. Para más detalles técnicos de éste dispositivo puede consultarse en las hojas de datos anexadas al presente trabajo.

Debido a la necesidad impuesta por el sistema de control sobre el período de muestreo, el cual resulta ser aproximadamente 2ms, y la necesidad de que la rapidez de conversión sea mucho menor que este valor, hemos diseñado esta etapa principalmente con un ADC. El mismo resulta ser el ADC8519 fabricado por Texas Instruments. Este ADC es un conversor de 16bits basado en una estructura de aproximaciones sucesivas con una capacidad máxima de conversión de 250kSPS (samples per second). El mismo se encuentra provisto de una interfaz de comunicación serie para la transferencia del dato muestreado, la cual puede ser sincronizada por un reloj interno o una señal de sincronismo externa, habiéndose adoptada la segunda opción.

Luego de haberse realizado la conversión digital del dato de entrada, se encuentra la etapa de optoacoplamiento para satisfacer la necesidad de la CNEA en aislarla del resto del circuito. Dado que la comunicación entre el ADC y el microcontrolador es bidireccional, es preciso utilizar un optoacoplador con estas características. Uno de los canales transportará la señal de sincronismo mientras que el otro, la señal de datos. Por otro lado el dispositivo debe satisfacer los requerimientos temporales de la comunicación implementada. Hemos optado por el ISO7242 de Texas Instruments que resalta una velocidad de transferencia de 150Mbps y una aislación 4kV.

Hemos implementado para el diseño el microcontrolador PIC18F4550. Las funciones que realiza este dispositivo dependerán del modo de funcionamiento en que se encuentre trabajando el controlador (modo manual o automático).

El motor paso a paso utilizado es de dos polos (dos bobinas) y 12V, el cual se ha reciclado de una impresora hogareña. Se ha seleccionado como controlador del motor paso a paso el integrado DRV8843 de Texas Instrument. Este controlador se encarga de recibir las secuencias de pasos provenientes del microcontrolador y mediante lógica interna acciona los transistores de los puentes H que alimentan de corriente las bobinas del motor.

Se ha utilizado un display LCD de matriz de punto de 18x2 caracteres, compuesto internamente por un microcontrolador cuya interfaz está basada en el controlador Hitachi HD44780.

La comunicación con este dispositivo se puede lograr mediante un bus de 4bits u 8bits. En nuestro caso se ha elegido realizar dicha comunicación con un bus de 4bits, para minimizar el uso de pines I/O del microcontrolador y el conexionado entre los mismos.

2.6. Implementación control en tiempo real

Existen muchas herramientas en la actualidad mediante las cuales puede lograrse un control automático en tiempo real, pero muy pocas tienen dicha funcionalidad cuando: (a) se tiene hardware en el lazo de control; (b) se quiere desarrollar un control que sea modificable por el usuario, para poder implementar distintas tecnologías de control como ser: Controladores PID, Linealización DFL y Control SWLQR; las cuales son soportadas por nuestro hardware de adquisición de datos y que la misma sea útil desde el punto de vista didáctico para la enseñanza de la Ingeniería.

Es aquí cuando entran en juego determinadas variables a tener en cuenta para satisfacer nuestros objetivos, por un lado necesitamos un sistema operativo y un software de control con posibilidad de trabajo en tiempo real y, por otro lado, programas que, en lo posible, sean conocidos por los alumnos que ingresen al ciclo superior de la carrera de Ingeniería Electrónica. Por lo tanto hemos evaluado dos herramientas posibles: Scilab a través de su herramienta SCALE disponible para Windows y para Linux; y Matlab a través de su herramienta Real-Time Windows Target (RTWT) disponible para Windows.

Nuestra elección fue utilizar para el control la segunda opción debido a que la carrera contiene, en muchos espacios curriculares, el aprendizaje de conceptos mediante Matlab. Aunque existen dos ventajas más que son válidas mencionar: el mejor grado de compatibilidad entre el microcontrolador y Windows-Matlab, y por último, la capacidad que tiene RT de sincronizarse con el Reloj de Tiempo Real (RTC) y el módulo que administra este hardware bajo Windows, llamado Real Time Module (RTM).

La aplicación Real Time Windows Target provee mecanismo para ejecutar en tiempo real modelos de Simulink sobre Microsoft Windows y la capacidad de conectarse a placas adquisidoras de datos. Soporta, actualmente, dos modos de simulación: normal, para operaciones en tiempo real simples con acceso a dispositivos I/O, y modo externo, para operaciones en tiempo real de alta performance. Esta aplicación es compuesta de varios módulos, los cuales le otorgan distintas funcionalidades a la misma.

Cuando se necesita una ejecución en tiempo real de alta performance sobre la PC, se recurre al modo externo, donde el modelo creado a través de Simulink es compilado en C, para ser ejecutado en el modo kernel de Windows y pueda funcionar en tiempo real. Notar, que si el modelo en Simulink tiene parámetros iniciales transferidos mediante Workspace, la ejecución de la aplicación en tiempo real se dará bajo esas condiciones de parámetros que se otorgaron en el momento de la compilación.

No todas las herramientas que se encuentran en Simulink pueden usarse cuando se quiere tener un control en tiempo real, sino que existen determinados bloques que pueden usarse, algunos bloques pueden usarse bajo ciertas restricciones, y otros, directamente no pueden implementarse en este modo de

funcionamiento. Por ejemplo, si se quiere usar bloques en tiempo continuo (como en nuestro caso, ya que queremos implementar un control PID) es necesario el uso de un algoritmo de integración de tiempo fijo, mediante la elección de un tiempo de muestreo acorde a las necesidades requeridas por el usuario.

El modo externo requiere una interface de comunicación para el pasaje de parámetros, la cual puede ser una placa de adquisición de datos compatible con dicho software o bien puede usarse el hardware incorporado en una PC como ser el protocolo TCP/IP o UDP, puertos series, paralelos, o incluso, un puerto de Joystick. El driver del dispositivo I/O es usado por Matlab para el intercambio de parámetros entre el espacio de memoria de Simulink y la memoria accesible de la aplicación en tiempo real.

Una de las ventajas más importantes que tiene el Toolbox RTWT, desarrollado por Matlab, es la capacidad de implementar bloques directamente programados en C, que tengan funcionalidad específica dentro del diagrama de bloques, o bien, en el lazo de control que se quiera implementar. Es así como puede resultar útil para desarrollar cualquier diseño de control basando en técnicas digitales para un problema de tipo regulador o bien un servo problema.

A esto se le suma la capacidad que tiene el adquisidor de muestrear a grandes velocidades permitiendo por ejemplo la construcción de observadores, para el diseño de controles basados en variables de estado, con variables de tipo no-observables, es decir, no mensurables.

Sin duda esto lo hace, desde el punto de vista didáctico, totalmente flexible y se conviene en una herramienta poderosa para comprender la acción de los distintos tipos de control, interactuando directamente con Simulink y ejecutando la aplicación en tiempo real.

2.7. Dispositivo final

La fig. 1 muestra el panel frontal del dispositivo terminado donde se encuentra el botón de encendido del dispositivo, un LCD para poder visualizar el estado actual del dispositivo y el actuador, y 4 pulsadores. Uno de los 4 pulsadores cambia el modo de operación de la interfaz entre automático y manual, mientras que los tres restantes comandan el motor paso a paso en el modo manual. Los botones de avance y retroceso producen un movimiento de un paso, mientras que el botón de cero produce que la varilla de control fino se ubique en la posición central.

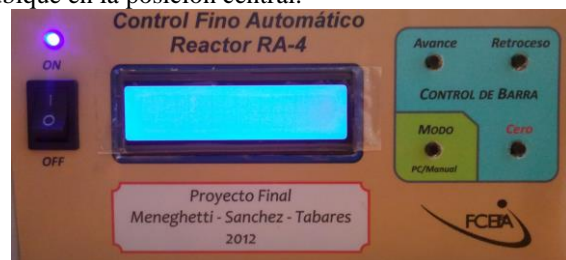


Figura 2. Frente del dispositivo

En el panel trasero, de la Fig. 3, se encuentran accesibles las conexiones para: comandar el actuador, entrada de línea, entrada de señal y la conexión USB hacia la PC. Además hay un fusible que se usa como primera protección de 250mA.



Figura 3. Parte trasera del adquisidor

A continuación mostramos imágenes correspondientes al actuador donde se puede apreciar el diseño constructivo (correspondiente a un proyecto anterior), el motor paso a paso (el cual ha sido reemplazado del utilizado originariamente), los fines de carrera del actuador y el sensor óptico de la posición central del sistema.

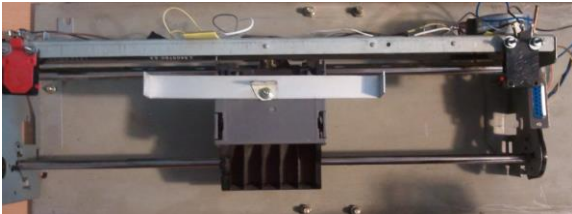


Figura 4. Actuador

Mientras que el actuador se monta sobre un canal tangencial al núcleo por donde ingresa la barra de control fino del mismo, el adquisidor se ha montado en el panel de control del operador. La señal analógica de entrada al mismo se obtiene directamente de la consola del reactor nuclear, mientras que el conexionado desde el adquisidor hasta el motor paso a paso esta hecho debajo del piso técnico que tiene el reactor, con un cable de tipo UTP, con dos terminales DB-15.

3. CONCLUSIONES

En esta sección mostraremos los resultados de los ensayos realizados al reactor, utilizando el control fino automático. Se han realizado dos tipos de ensayos diferentes, clasificándolos por su comportamiento de control. En un primer ensayo se procedió a un control del tipo “regulador”, mientras que en una segunda oportunidad se ha pretendido que el mismo se desempeñe como control del tipo “servo”.

Si bien las diferencias son sustanciales, ya que en el primer caso el control debe mantener un set-point de potencia a expensas de las perturbaciones que puedan presentarse en el sistema y en el segundo el usuario decide la potencia de trabajo deseada y el control fino lleva a esa potencia al reactor, inicialmente el operador del RA-4 debe llevar manualmente al reactor a un punto crítico del sistema (un punto de equilibrio según la teoría de control) ya que nuestro modelo matemático obedece

a esta situación particular. Recordemos además que todos los valores de potencia son puntos de equilibrio, ya que el reactor puede alcanzar el crítico en cualquier valor de ésta.

El diagrama de bloques diseñado y ensayado resulta ser el mostrado en la Fig. 5.

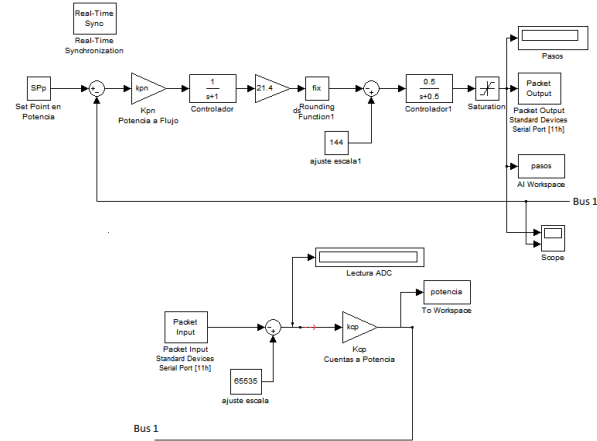


Figura 5. Diagrama de bloques del control en tiempo real implementado en Simulink

Se observa en el diagrama de bloques la existencia de un saturador que limita la cantidad de pasos que el sistema le envía al actuador. El límite inferior se ha fijado en 0, mientras que el límite superior se fijó en 288 pasos. Si bien este bloque se ha puesto en carácter de seguridad, el microcontrolador que comanda el motor paso a paso prevé que no se puedan superarse los límites establecidos mediante los sensores de fin de carrera.

Las gráficas de la Fig. 6, tituladas “Señales adquisidor RA-4”, son gráficas obtenidas de un adquisidor digital instalado hace unos años en el reactor y que permite monitorear diversas señales de interés para el operador. En este caso hemos optado por visualizar el flujo neutrónico, proporcional a la potencia desarrollada, y la posición de la placa de control número 2.

Hasta la muestra 55000 se ha ejecutado el controlador como regulador donde el reactor se mantenía en el régimen crítico a una potencia de trabajo de 87mW. Puede observarse como la potencia (o flujo neutrónico), se mantiene constante a expensas de la posición de la placa 2, quien, en este caso, cumple el rol de perturbación. Entre las muestras 40000 y 45000 puede observarse una perturbación de la placa del orden de los 4mm, quien produce una saturación en el actuador y esto se traduce en una disminución en la potencia de trabajo, lo cual no puede ser compensada directamente por la barra de control fino. Estos límites son propios de la cantidad de reactividad máxima, que puede adicionar o extraer, la barra de control fino en el reactor.

Luego de la muestra 55000 comienza el comportamiento del controlador como servo, introduciendo en Simulink, en primer caso, un valor de potencia deseado de 90mW y luego un valor de 70mW.

Es evidente el comportamiento exponencial que tiene el sistema, tal como se predice en la teoría, llegando a los puntos de trabajo establecidos por el dispositivo de control fino. Vale observar, en la gráfica proveniente de Simulink, la saturación negativa primero, y luego positiva, del actuador, hasta que el mismo se estabiliza en el valor promedio que tuvo durante todo el ensayo.

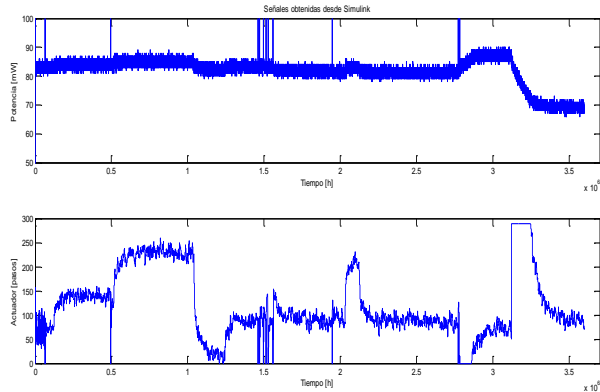


Figura 6. Resultados obtenidos.

La interfaz diseñada tiene la capacidad de funcionar como un adquirente de datos y comandar un actuador interactuando con un software externo, logrando una gran flexibilidad y un amplio nivel de adaptación para implementar una extensa gama de métodos de control mediante mínimos cambios. Además, debido a que el usuario no tiene la necesidad de programar los controladores en código de máquina, sino que lo hace directamente a través de diagrama de bloques, resulta ser sencilla la implementación en casi en cualquier entorno donde se necesite construir controladores en el dominio de tiempo continuo (a través de transformada de Laplace) o bien en el dominio de tiempo discreto (a través de la transformada z), o incluso, poder implementar ambos para luego comparar los resultados obtenidos.

Es por eso que lo hace idóneo como herramienta didáctica en el área de control, donde los alumnos de la carrera deban desarrollar habilidades en el área antes mencionada mediante, por ejemplo, la programación en Matlab. Los alumnos pueden cambiar controladores al instante, e intercambiar distintas tecnologías de control (variables de estado, SWLQR, etc) validando sus predicciones y comparando sus resultados al instante visualizando la respuesta del reactor (o del sistema que se controle) en tiempo real.

Vale notar que el dispositivo diseñado no se limita únicamente a Matlab, sino a cualquier software que permita implementar control en tiempo real con hardware-in-the-loop, como ser Scilab bajo Linux. Sólo se necesita, para una correcta ejecución, el driver del microprocesador para el sistema operativo correspondiente.

En cuanto al hardware se previó una tasa de muestreo de la señal analógica de 1ms, lo que hace apta a la interfaz, para su uso en sistemas con polos de, relativamente, altas frecuencias. La tasa de transferencia

de la interfaz a la PC puede seleccionarse de acuerdo a las necesidades que el sistema a controlar imponga.

REFERENCIAS

- [1] Milicic, B. Curso básico de física de reactores nucleares. Rosario, Argentina, UNR, 1984
- [2] Rubio Scola, H.E.; Rubio Scola, I. E.J.; A. Marezzana y Nachez, J. C. “*Técnicas Avanzadas de Control Aplicadas al Reactor Nuclear RA4 de la FCEIA –UNR.*” “IV Jornada de Ciencia y Tecnología”- UNR, Rosario, 2010.
- [3] Rubio Scola, I. E. J., Rubio Scola, H. E. . Controlador robusto con detección activa de fallas. 15th Latinamerican Control Conference, IFAC, CLCA 2012, Octubre 23-26, 2012, Lima, Perú.
- [4] Glasstone, S., A. Sesonske. *Ingeniería de los reactores nucleares*. Editorial: Reverté (1990).
- [5] Lee, Y.L., The Control Rod Speed Design for the Nuclear Reactor Power Control Using Optimal Control Theory. Journal of the Korean Nuclear Society. Volume 26, Number 4, 1994.
- [6] Tabares, I. Sanchez, G. Menghetti, H. Control fino automático de reactores nucleares. Rosario, Argentina, UNR.

RECONOCIMIENTOS

Trabajo realizado dentro del Proyecto de investigación y desarrollo (PID-UNR) “Instrumentación y control en procesos de generación de energía”. Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR), Argentina.