



Diseño y Simulación de las Interfaces para la Adquisición de Datos y el Control de la Posición de Radiotelescopios

G. Alvarez Bestard, Y. M. Ortega Corteguera, S. Vásquez Hernández,
P. Sierra Figueredo, A. Carrillo Vargas, S. E. Kurtz Smith

Resumen: Las observaciones astronómicas, empleando radiotelescopios, tienen como principal objetivo medir las emisiones en varias frecuencias que provienen del medio interplanetario, fundamentalmente del Sol. El trabajo aborda una propuesta de diseño de un sistema para supervisar y controlar los radiotelescopios de la Estación Radioastronómica de La Habana. Se presenta el diseño de las interfaces que deben muestrear con alta resolución temporal, procesar en tiempo real, almacenar y transmitir por un bus RS-485, más de 3GB diarios de mediciones obtenidas de las señales radioeléctricas detectadas por estos sensores. También deben ocuparse del seguimiento de las trayectorias predefinidas mediante algoritmos de control de posición, realimentados por inclinómetros o sensores de posición angular; del gobierno de motores de paso y de corriente directa; y tener un funcionamiento totalmente autónomo. Para su implementación se propone el empleo de un DSP en la interfaz principal, de un microcontrolador en la pasarela RS-485/USB y otro en un dispositivo inalámbrico para la configuración y la puesta a punto del sistema. También se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación del controlador en Proteus.

Palabras Clave: adquisición de datos, DSP, posicionamiento de radiotelescopios, seguimiento de trayectorias.

Abstract: The radio astronomy observations with radiotelescopes are aimed to measure emissions at various frequencies coming from the interplanetary medium, primarily of the Sun. This paper discusses a design proposal for a system to monitor and control the radiotelescopes of the Radio Astronomy Station of

Havana. This presents the interfaces that should sampling with high temporal resolution, processing in real-time, storing and transmitting more than 3GB of measurements obtained daily from the radio signals, by an RS485 bus. In addition, they must deal with the monitoring of predefined paths through position control algorithms with inclinometers or angular position sensors, the government of step motors and direct current, and have a fully autonomous operation. This solution proposes the use of a DSP in the main interface, a microcontroller for the RS485/USB protocol conversion and another in the wireless device for configuration and tuning of the system. We also show some results obtained by simulating the controller in Proteus.

Keywords: data acquisition, DSP, radiotelescopes, path tracking.

Introducción

Las observaciones radioastronómicas tienen como principal objetivo medir la radiación electromagnética emitida en varias frecuencias por un astro, y construir su espectro de emisión. De este se obtiene información sobre los procesos que están actuando y puede inferirse su posible acción en el medio interplanetario y en la Tierra [1]. El Sol es una potente fuente de radioemisión pero no es la única que llega a la Tierra, también lo son otras estrellas, planetas, satélites naturales y artificiales, y otros cuerpos celestes.

El instrumento que se emplea para medir la emisión en ondas de radio de un objeto cósmico es el radiotelescopio [2]. Los radiotelescopios son sistemas de medición compuestos por un elemento colector y sensor de la emisión (antena), un elemento transductor que se ocupa de elaborar una señal de salida relacionada con la emisión recibida (receptor, modulador, generadores y amplificadores), y un elemento de indicación y almacenamiento de esta salida.

En el transductor la señal de muy baja amplitud, recolectada por la antena, es modulada por la señal que entrega un generador de modulación. Posteriormente se le aplica en contrafase la señal producida por un generador de compensación o de ruido, lo cual permite

Guillermo Álvarez Bestard. Instituto de Cibernética, Matemática y Física. La Habana, Cuba. guille@icimaf.cu

Yarán M. Ortega Corteguera. Instituto de Cibernética, Matemática y Física. La Habana, Cuba. baran@icimaf.cu

Samuel Vásquez Hernández. Instituto de Geofísica y Astronomía. La Habana, Cuba. samuel@iga.cu

Pablo Sierra Figueredo. Instituto de Geofísica y Astronomía. La Habana, Cuba. sierra@iga.cu

Armando Carrillo Vargas. MEXART, Unidad Académica Michoacán. México. armando@geofisica.unam.mx

Stanley Eugene Kurtz Smith. Centro de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM. Morelia, México. s.kurtz@crya.unam.mx



discriminar las pequeñas variaciones de intensidad de la radioemisión solar de la radiación de fondo emitida por el cielo y de las variaciones de amplificación.

La señal modulada pasa primero por un amplificador de alta frecuencia y después por el de baja frecuencia, obteniéndose a la salida de este una señal de corriente directa, representativa de la radioemisión solar que llega al elemento sensor. Este bloque se denomina “downconverter” o bloque de baja frecuencia, y tiene la función de transformar la señal de alta frecuencia modulada, en una de baja frecuencia que represente con suficiente precisión el comportamiento de la primera.

En dependencia del tipo de antena y del receptor utilizado, los radiotelescopios pueden medir diferentes tipos de radiación. Las antenas parabólicas (ver figura 1a y 1b) pueden recolectar ondas polarizadas circularmente, por lo que si su receptor también lo permite se denominan radiopolarímetros. De esta manera se distinguen dos magnitudes: la *Intensidad de la Radioemisión Total* y la *Intensidad de la Radioemisión Circularmente Polarizada*. En lo adelante, a la primera se le llamará solamente *Intensidad* y a la segunda se le denominará *Polarización*. En el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) de Cuba, se encuentra ubicada la Estación Radioastronómica de La Habana (ERH), la cual posee dos radiotelescopios (ver figura 1a y 1c) y un radiopolarímetro (ver figura 1b).

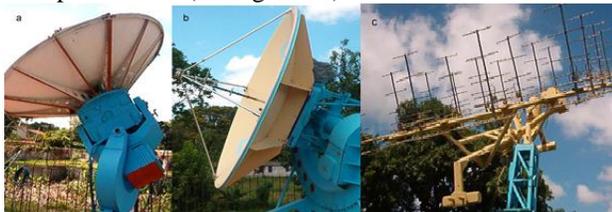


Fig. 1 Radiotelescopios de la Estación Radioastronómica de La Habana: RT2 (a), RT3 (b) y RTM (c).

En la actualidad el desarrollo de estos instrumentos se encamina hacia dos direcciones: el aumento de la resolución espacial y el aumento de la resolución temporal. La primera implica la construcción de grandes y costosos instrumentos. En cambio, el aumento de la resolución temporal se puede lograr con antenas medianas y permite hacer estudios de casos particulares. En nuestras condiciones económicas no es posible instalar nuevos radiotelescopios, pero sí podemos mejorar la resolución temporal de los ya existentes, que es de 1 segundo. En cualquier caso es imprescindible contar con un sistema de control de trayectorias para obtener una medición útil.

Con la intención de estudiar estos temas, se incluyeron varias tareas dentro del Proyecto Nacional “Análisis y

caracterización de eventos solares tipo pulsantes con estructura temporal fina y del sistema dinámico Viento Solar-Magnetosfera-Ionosfera”, financiado por el programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”. También se cuenta con el apoyo de varios colaboradores de la UNAM, que han suministrado materiales y componentes imprescindibles para esta labor. El proyecto define tres objetivos vinculados a esta temática, de los cuales solo los dos primeros se abordarán en este trabajo. Estos son: diseñar un sistema de control automático que sea capaz de seguir trayectorias no eclípticas, diseñar un sistema de adquisición de datos con alta resolución temporal e integrar ambos sistemas en un SCADA.

Requerimientos y métodos de diseño

En la adquisición de datos y el control de un radiotelescopio participan un conjunto de variables analógicas y digitales, que a su vez tienen asociadas una o más señales o canales. Un resumen de ello se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Variables, tipos y cantidad de señales requeridas para la adquisición de datos y el control de un radiotelescopio.

Tipo	Variable [Rango de medición]	Cant.	
Entradas	Analógicas	Radioemisión I [±5V]	1
		Luminosidad del cielo, Radioemisión2 o Temperatura Ambiente [±5V]	1
		Temperatura en el receptor [0-50°C]	1
		Posición E/W [±80°]	1
		Posición N/S [±80°]	1
	Digitales	Intensidad de la corriente en motores E/W	1
		Intensidad de la corriente en motor N/S	1
		Tensión en la fuente de alimentación de motores	1
		Límite E [0-12V]	1
		Límite W [0-12V]	1
Salidas	Digitales	Límite N [0-12V]	1
		Límite S [0-12V]	1
		Generador de Compensación o Antena Conectada [0-9V]	1
		Generador de Modulación1 [0-9V]	1
		Generador de Modulación2 o de Calibración [0-9V]	1
		Bobinas del motor de paso E/W [0-24V]	4
		Tensión de alimentación del motor de CD E/W [±24V]	2
Tensión de alimentación del motor de CD N/S [±12V]	2		
Tensión de alimentación del motor del Atenuador [±12V]	2		
Tensión de alimentación de la Termorregulación	1		

Es necesario aclarar que las variables Radioemisión2, Antena Conectada y Generador de Calibración, se emplean solamente en RTM. Por otra parte el Generador de Compensación se emplea en los radiotelescopios RT2 y RT3, y el de Modulación2 solo en RT3. Todos los



generadores son salidas digitales que deben conformar una onda cuadrada con una determinada frecuencia, que actualmente está entre 200Hz y 2KHz. También vamos a requerir de la comunicación con un nivel superior de control mediante un bus RS-485, y que el operador pueda ajustar la posición y otros parámetros del radiotelescopio de forma manual.

Adquisición y procesamiento de las mediciones. Los radiotelescopios manejan magnitudes eléctricas de muy baja amplitud, de dinámica rápida, y sensibles a los ruidos electromagnéticos. Su receptor entrega una señal modulada que debe ser acondicionada para su conversión a digital. En la observación del Sol la amplitud puede aumentar hasta 16 veces en un día de gran actividad solar y no ser simétrica en el eje de amplitud. Esto hace necesario utilizar un sistema con ajuste dinámico de rango y de offset, para mantener la precisión y la resolución adecuada.

Como se observa en la figura 2, el valor de la intensidad de la radioemisión solar en un radiotelescopio es la diferencia entre el valor promedio de la señal de salida del receptor en cada semiciclo de modulación y el valor de referencia.

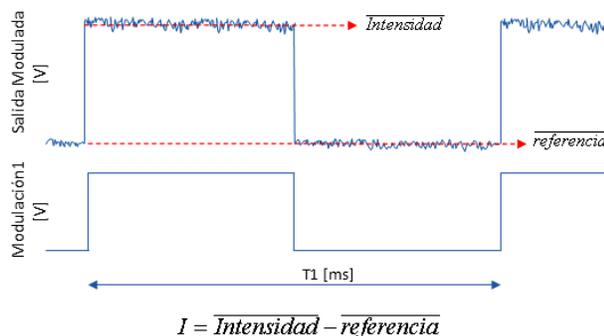


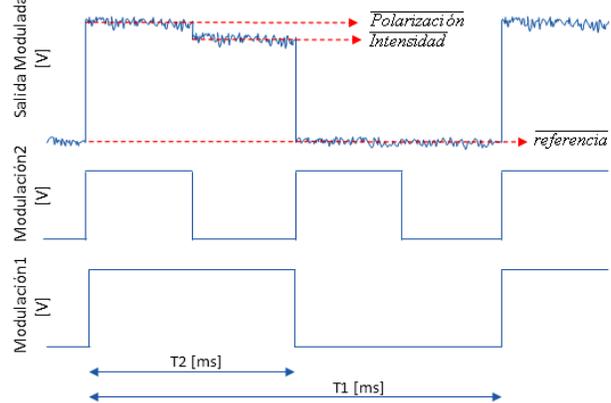
Fig. 2 Procesamiento de la señal modulada en un radiotelescopio

En un radiopolarímetro el procesamiento es similar, pero los valores de Polarización y de Intensidad se modulan sobre una misma señal, pero con frecuencias diferentes, como se observa en la figura 3.

El valor de referencia en ambos casos, se obtiene del promedio de la señal en el semiciclo en que la modulación es cero. En nuestro caso se desea que la medición de cada variable se realice 1000 veces por segundo (1kHz), pero debido a la modulación se debe realmente muestrear a una frecuencia de 4kHz. La frecuencia de modulación T1 y T2 varía en cada radiotelescopio, pero para lograr este tiempo de muestreo será necesario adoptar una frecuencia de modulación igual o superior a 1KHz. En la actualidad el procesamiento de estas señales en la ERH se realiza en

bloques de baja frecuencia totalmente analógicos, con una resolución temporal de 1 segundo. Estos presentan frecuentes fallos y serias dificultades en la reparación.

Por otro lado, para lograr un control adecuado, es necesario medir la posición angular del radiotelescopio en los planos N/S y E/W. Esta variable tiene un rango de $\pm 90^\circ$, que puede estar reducido por edificaciones o por las posibilidades de movimiento del radiotelescopio, y el error de control debe ser inferior a 0.1° .



$I = \text{Intensidad} - \text{referencia}$ $P = \text{Polarización} - \text{referencia}$
Fig. 3 Procesamiento de la señal modulada en un radiopolarímetro.

Teniendo en cuenta la información brindada hasta ahora, podemos estimar la capacidad necesaria para almacenar las mediciones y otros indicadores de estado del sistema, así como la velocidad de comunicación necesaria (baudrate) en el bus RS-485. En un día de observación, que dura alrededor de 11 horas, se deben almacenar 1000 muestras por segundo de las variables principales y 250 muestras por segundo de las variables de diagnóstico, según se detalla en [3]. Al final de la observación tendremos aproximadamente 1 GB de datos en un solo radiotelescopio y 3GB en total. Si tenemos en cuenta que para transmitir un byte son necesarios al menos 10 bits, se requeriría un “baudrate” mayor que 813 KBPS en el canal de comunicación.

Estrategia de control automático y control manual desde un dispositivo portátil. Los radiotelescopios de la ERH deben seguir el movimiento del Sol sobre la bóveda celeste, cuya trayectoria (denominada Eclíptica) varía en función de la fecha. Esto permite emplear un sistema de seguimiento que mueva al radiotelescopio a una velocidad constante de $0.25^\circ/\text{min}$ de Este a Oeste y realizar correcciones, si fueran necesarias, en declinación (δ) con movimientos en la dirección Norte-Sur. El ajuste de la posición inicial se puede realizar buscando el valor máximo de la señal de intensidad [2]. Este es el



algoritmo de control que se emplea actualmente y tiene la ventaja de ser sencillo, pero no permite el seguimiento de otros cuerpos celestes con trayectorias no eclípticas y las correcciones por declinación pueden afectar la medición de un evento solar.

Después de estudiar varias variantes, discutidas en [1] y [3], se decidió incorporar un sensor para medir el ángulo de inclinación de la antena en los planos N/S y E/W. Entonces las ecuaciones de movimiento del cuerpo celeste se evalúan en la interfaz, según la fecha y hora precisa, y se pasa este valor como referencia al controlador de posición de cada eje. Para ello es necesario que el controlador posea un reloj de tiempo real (real timer clock o RTC) que le sirva de referencia para evaluar dichas ecuaciones. Esto permite iniciar automáticamente la observación a partir del momento en que el astro sea visible desde la ubicación del radiotelescopio.

La implementación actual para el control manual de la posición está basada en una botonera ubicada en la base de la antena, lo cual obliga al operador a desplazarse y subir a esta. La perspectiva que obtiene desde ese punto es poco útil. En cambio, si le permitimos mediante un dispositivo portátil, gobernar y configurar el sistema de control de cada radiotelescopio, sería de gran ayuda para su trabajo.

Accionamiento. El movimiento de la antena en el plano E/W está gobernado por un motor de paso unipolar y por un motor de corriente directa (CD). El de paso permite mantener el movimiento de seguimiento con gran precisión, y el de CD permite alcanzar posiciones alejadas en corto tiempo. Ambos comparten un mecanismo de reducción de la velocidad y de incremento del torque. En el movimiento N/S participa un motor de CD que es capaz de mantener el seguimiento en ese plano. El rango de este eje es mucho menor y los movimientos son más lentos y menos frecuentes.

En los radiotelescopios RT2 y RT3, dos señales actúan sobre el *generador de compensación* y el *generador de modulación* (ver tabla 1). La primera solamente activa o desactiva el generador, pero la segunda debe ser capaz de mantener una frecuencia constante en función del receptor a que está conectada. En el RTM estas dos variables se denominan *antena conectada* y *generador de calibración*, y aunque tienen un comportamiento similar a las anteriores, se utilizan con propósitos diferentes.

Autonomía total, protecciones, detección y diagnóstico de fallos. Aprovechando el RTC, necesario para el sistema de control de posición, podemos automatizar completamente el inicio y la parada de la observación. Si se conocen las ecuaciones que describen

el movimiento del astro observado, es posible determinar cuándo será visible desde nuestra posición y cuando dejará de serlo. De esta forma el movimiento de seguimiento y la adquisición de los datos pueden comenzar de forma automática.

Se deben implementar varias protecciones entre las que se encuentran el aislamiento galvánico de todas las entradas y salidas, y un breaker o fusible en cada entrada de alimentación. Para el diagnóstico de fallos se debe medir la tensión en las fuentes de alimentación, la intensidad de la corriente en cada motor para detectar su deterioro, y almacenar el valor del ángulo en que se activan los detectores de límite en cada eje para verificar si su variación está dentro de un rango aceptable o si los sensores tienen fallos. También se debe verificar si al variar la variable manipulada, en una magnitud considerable, la posición cambia consecuentemente, y así detectar atascos.

Resultados y Discusión

Con el objetivo de cumplir los requerimientos definidos con anterioridad se ha diseñado un sistema adquisición de datos y de control de posición para los radiotelescopios, el cual está formado por un controlador en cada radiotelescopio, un conversor de protocolo o pasarela RS-485/USB y un control remoto portátil, lo cual se puede apreciar en la figura 4. Además, para lograr un control preciso de la trayectoria, se ha diseñado y programado un controlador PID digital, que ha mostrado un comportamiento adecuado en simulación. A continuación se muestran algunos de estos resultados.

Interfaz de control. La interfaz está compuesta por un bloque analógico y un bloque digital. El bloque analógico acondiciona todas las señales medidas que llegan al bloque digital, el cual se encarga de controlar todo el sistema, de sensar y almacenar todas las variables, de calcular la ley de control de posición, y de manejar los buses de comunicación.

En el **bloque analógico** las señales llegan al conversor analógico-digital AD7680 [3] y este las envía al DSP [3] ubicado en el bloque digital. La señal más compleja es la Radioemisión, y se toma después del Detector Cuadrático del receptor, eliminando así toda la circuitería innecesaria de los receptores. De esta forma es imprescindible que el canal de medición varíe su amplificación, ajuste el offset y mantenga la señal que llega al AD7680 con una amplitud cercana al 75% de su rango de medición, y así conseguir una resolución aceptable. Para ello al inicio del canal de medición se utiliza un amplificador de instrumentación AD620 [4] al cual se le varía el offset mediante un conversor digital-



Según se analiza en [3], en un radiopolarímetro (ver figura 3) habría que muestrear 3 veces en cada ciclo de modulación la señal de radioemisión y una vez las de posición. Las variables de temperatura y de diagnóstico se obtendrían cada 5 ciclos. Además, en un ciclo de modulación hay que transmitir por el bus SPI 732 bits para almacenar estas mediciones en la tarjeta SD, modificar el canal del PGA y su amplificación, cambiar el offset de los amplificadores, el rango del AD7680 y acceder al RTC. Si consideramos una frecuencia de muestreo de 1 kHz serían 732Kbits en un segundo, por lo que se toma una velocidad de comunicación de 2MBPS, y una frecuencia de reloj de 2MHz en el bus SPI.

Control remoto portátil y comunicación con el nivel superior de control. Un dispositivo de comunicación por radiofrecuencia modelo XB24-API-001, ubicado en el bloque digital, y que emplea el protocolo IEEE 802.15.4, se enlazará con otro similar ubicado en un controlador manual portátil. Este permitirá configurar, diagnosticar y poner a punto el sistema de control de todos los radiotelescopios. Este control remoto será gobernado por un microcontrolador PIC16F648, y poseerá un LCD y tres pulsadores. Mediante ellos se escogerá un radiotelescopio y se realizarán las acciones deseadas, mostrando la información necesaria en el LCD. La comunicación de la interfaz del controlador con el nivel superior se realizará a través de un bus RS-485 half dúplex, a través de un MAX485 [8] según se aprecia en la figura 4. Debido a la gran cantidad de información a transmitir se utilizará una velocidad de 1 MBPS en el bus de comunicaciones, al cual se conectarán los controladores de los tres radiotelescopios.

Para el otro extremo del bus, se desarrollará un conversor del protocolo RS-485 a USB. Este se basa en un PIC18F14K50 que posee un USART y un puerto USB 2. Este último se conectará a la computadora donde corre el sistema supervisor, que a su vez enviará datos a un servidor a través de Ethernet.

Resultados de la simulación con el algoritmo de control. Para realizar el diseño del regulador y simular el comportamiento de todo el sistema, se utilizó en una primera etapa la herramienta Simulink de Matlab.

En el modelo del sistema de accionamiento para el eje E/W, acoplado a la antena, se incluyen dos motores, el de CD y el de paso, que poseen entradas independientes. El motor de CD se representa a través de una función transferencial de 1^{er} orden, sin retardo de tiempo y el de paso como una ganancia, dado que su respuesta es muy rápida comparado con el intervalo de muestreo [1]. Los reductores mecánicos también se asumen como constantes proporcionales. Posteriormente se integra la

velocidad para obtener la posición angular de la antena, la cual es medida por el sensor. El sensor de posición es tratado en la simulación como un pequeño retardo en el sistema.

Por las características de integrador que presenta este proceso se pensó utilizar para el controlador un algoritmo Proporcional Derivativo (PD) o inclusive uno Proporcional (P). Pero después de realizar varias pruebas en simulación el algoritmo que brindó los mejores resultados fue el Proporcional Integral (PI). Con el algoritmo PD, a pesar de cumplir con los requerimientos de ser capaz de mantener el error en estado estacionario menor que 0.1° , se observó que la señal de control presentaba interoscilaciones entre los límites de control cuando el sistema estaba expuesto a perturbaciones. Esta característica es típica en estos controladores ya que se amplifica el ruido presente en el sistema, debido a la presencia de la acción derivativa. El algoritmo P no cumplió con los requerimientos referidos al error en estado estacionario, a pesar de probar con varios valores de ganancia.

Como resultado de estas pruebas se decidió utilizar el algoritmo de control PI. Este arrojó resultados convincentes en todos los aspectos. Se utilizó en su forma paralela para evitar así la influencia de la ganancia proporcional sobre la acción integral. Además por requerimientos del sistema, la salida del controlador está limitada dentro del rango ± 255 que representa el ciclo útil de los motores que mueven la antena. Para evitar la saturación de la acción integral se implementó un método antiwindup derivado del backcalculation.

El procedimiento de ajuste para los diferentes controladores evaluados consistió primeramente en utilizar la herramienta Tune de Matlab para un ajuste inicial y posteriormente se variaron los parámetros K_p , K_i y K_d , según el controlador, utilizando un criterio heurístico, hasta obtener los mejores resultados posibles para cada regulador.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se procedió a implementar un controlador con estructura PI, utilizando para ello el software Proteus versión 7.7 sp2. Esta etapa de desarrollo tiene como objetivo simular algunas características que tendrá el sistema, una vez implementado físicamente. Con el objetivo de comprobar la calidad del regulador implementado y además realizar una primera incursión en el desempeño de todo el sistema, se programó una aplicación de alto nivel. Para esto se utilizó el entorno de desarrollo Qt SDK y el lenguaje de programación C++ nativo de esta plataforma. Para poder estudiar el comportamiento de todo el sistema, la aplicación programada simula el



comportamiento del proceso. Este proceso responde a un modelo de primer orden sin retardo de tiempo cuya función transferencial en el dominio de Laplace corresponde con:

$$\frac{Y(S)}{Ucd(S)} = \frac{0.00196}{0.8S+1} \quad (1)$$

En la figura 5 se muestra la interfaz de usuario de la aplicación programada. En el área principal se observa un gráfico de la salida del sistema (posición) respecto al tiempo. A través de este gráfico se aprecia la evolución de esta variable durante el tiempo de simulación. En la parte inferior de esta misma área se representa el diagrama en bloques del sistema de control. En este diagrama se observa la ubicación de las principales

variables de interés (Ref, Yvel y Ypos) y también las posibles perturbaciones que pueden introducirse para analizar el comportamiento del sistema. La aplicación brinda la posibilidad de observar los principales valores numéricos de interés, tales como: la posición, el valor de la referencia, el valor del error y el valor de la señal de control. También se puede acceder al valor de la referencia a través de un elemento deslizante. Además se cuenta con la opción de realizar cambios sobre los parámetros del modelo del sistema (Kcd, T1, Grcd, Kstp y Grstp) y sobre los parámetros presentes en el controlador (Kp, Ki, Umáx y Umín) en tiempo de ejecución [9].

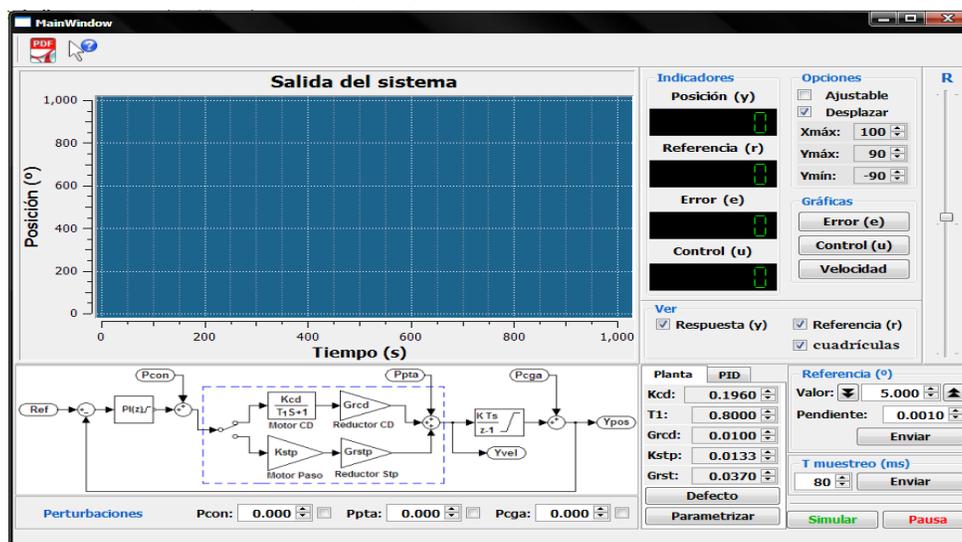


Fig. 5 Interfaz de usuario de la aplicación de alto nivel.

Los resultados obtenidos en la simulación del sistema de control ofrecieron una idea aproximada de cómo sería el comportamiento del sistema real y nos acercaron a los parámetros de ajuste del regulador.

La figura 6 muestra el comportamiento del lazo de control de la trayectoria E/W al introducir por la referencia un paso escalón de 45° más una pendiente de 4.17x10⁻³/s, equivalente a la velocidad de movimiento del Sol respecto a la Tierra. Se amplió la zona de convergencia con la referencia, apreciándose dentro del círculo discontinuo la conmutación del accionamiento hacia el motor de paso, con una consecuente reducción de la velocidad y un ajuste más preciso de la posición. Se puede ver también que el tiempo de establecimiento, para este estímulo que es ¼ del recorrido total de la antena, es inferior a los 3 minutos.

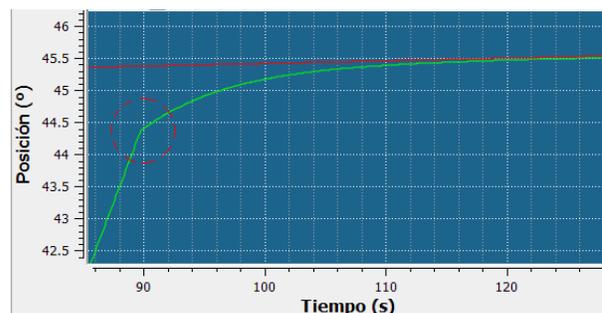


Fig. 6 Comportamiento del control ante un cambio en la referencia.

También se estudió la influencia de perturbaciones y se aplicó un paso escalón sobre la variable Velocidad, simulando la influencia del viento sobre la antena. En la figura 7 se muestra el comportamiento del sistema ante una perturbación de -0.01°/s, o sea que el viento se opone



al movimiento de la antena y provoca una disminución de la velocidad de aproximadamente dos veces la velocidad de seguimiento.

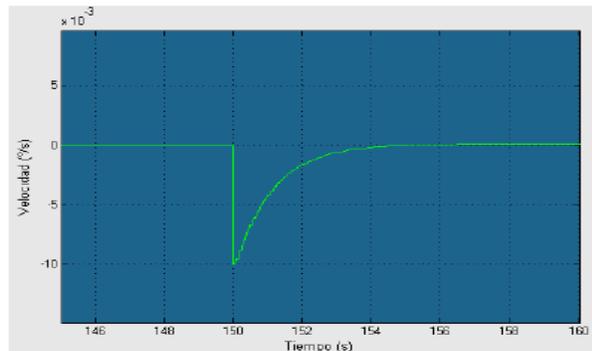


Fig. 7 Comportamiento de la Velocidad ante una perturbación.

Se observa además, en la figura 8, cómo la perturbación influye directamente sobre la variable Posición. La misma restablece su valor en aproximadamente 1 minuto.

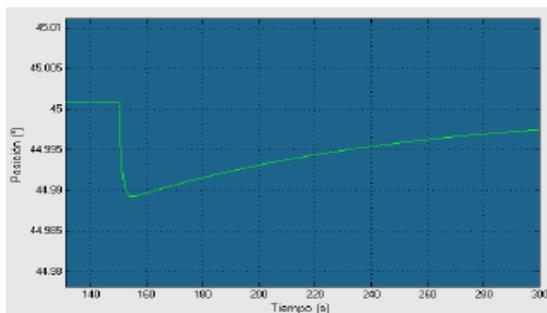


Fig. 8 Comportamiento de la Posición ante una perturbación.

A continuación, en la figura 9, se observa el comportamiento del error de la posición. Este parámetro es esencial para evaluar el comportamiento del sistema de control. En la imagen se aprecia que la magnitud del error alcanza valores admisibles (menores a 0.006°) en un tiempo aproximado de 1 minuto.

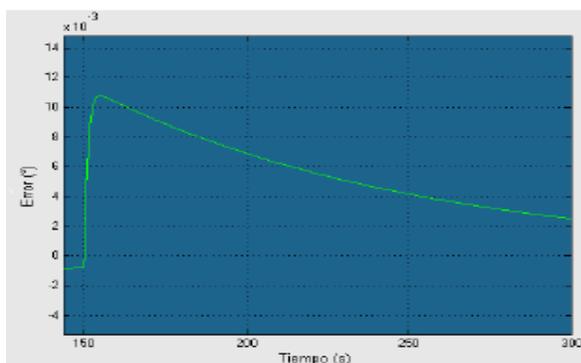


Fig. 9 Error de control ante una perturbación.

Por último se analiza el comportamiento de la variable de control. Como se observa en la figura 10, la señal del controlador presenta una forma suave al abandonar el valor de saturación, hasta alcanzar un valor estable correspondiente al posicionamiento del radiotelescopio. A los 150 segundos se aprecia la respuesta del control ante la acción de la perturbación. Una vez más ocurre de forma suave y no presenta interoscilaciones.

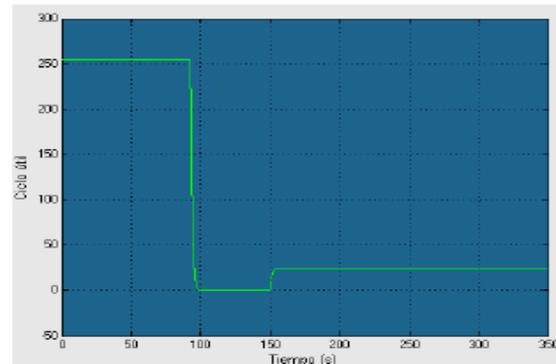


Fig. 10 Salida del controlador ante una perturbación.

Conclusiones

El empleo de un DSP, para el seguimiento de trayectorias no eclípticas y la medición de señales de dinámica rápida, en los radiotelescopios es una solución viable y económica.

Un regulador con estructura PI, como ley de control, puede facilitar las tareas de ajuste y permitir el seguimiento de trayectorias diferentes a las que recorre el Sol, posibilitando el estudio de otros astros y la calibración por radiofuentes.

Dotar al controlador con la capacidad de predecir la referencia es fácilmente realizable y contribuye a reducir el uso del bus de comunicaciones y a aumentar la rapidez con que responde el regulador.

La aplicación realizada permite analizar con mayor precisión las características del sistema software-regulador-proceso y observar en tiempo real el comportamiento del sistema de control ante la influencia de perturbaciones o la variación de sus parámetros.

El diseño propuesto es la base para el trabajo futuro en el proyecto. En él se encuentran los principios básicos a seguir para la implementación del sistema de supervisión y control de trayectorias para los radiotelescopios de la ERH.

Referencias

- [1] G. Álvarez Bestard y otros. *Control de la trayectoria de radiotelescopios con Microcontroladores PIC*. X Simposium Internacional de Automatización SIA2011. Informática 2011. La Habana, Cuba, 2011.



- [2] G. Álvarez Bestard. *Astrodata. Sistema de Supervisión y Control de la Estación Radioastronómica de La Habana*. La Habana, Cuba, ISPJAE, 2003. Tesis de Maestría.
- [3] G. Álvarez Bestard y otros. Propuesta de diseño de las interfaces para la adquisición de datos y el control de posición de radiotelescopios. Jornada Científica ICIMAF 2013. La Habana, Cuba, 2013. ISBN 978-959-7056-31-7.
- [4] Analog Devices, Inc. *AD620 Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier*. 2011, Disponible: www.analog.com
- [5] Microchip Technology Inc. *MCP6S21/2/6/8 Single-Ended, Rail-to-Rail I/O, Low Gain PGA*. Rev. DS21117A, 2003, Disponible: www.microchip.com
- [6] VTI Technologies. *SCA121T Series Stand Alone Inclinometer Dual Axis Analog Output*. Rev. 4, 2006, Disponible: www.vti.fi
- [7] Microchip Technology Inc. *dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers*. 2010, Disponible: www.microchip.com
- [8] MaxStream. *XBee/XBee-PRO OEM RF Modules*. 2006, Disponible: www.maxstream.net/support/downloads.php
- [9] Y. M. Ortega Corteguera, G. Álvarez Bestard. *Control de Posición en los Radiotelescopios de la Estación Radioastronómica de La Habana*. Jornada Científica ICIMAF 2013. La Habana, Cuba, 2013. ISBN 978-959-7056-31-7.

Currículo corto de los autores

MSc. Guillermo Álvarez Bestard: Ingeniero en Automática egresado del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría en 1998. Defiende el título de MSc. en Informática Industrial y Automatización en el 2003. Es Investigador Auxiliar y Profesor Auxiliar, y ha participado o dirigido 17 proyectos de I+D+i, con más de 65 publicaciones en eventos nacionales e internacionales, revistas y capítulos de libros.

Ing. Yarán Manuel Ortega Corteguera: Ingeniero en Control Automático, egresado del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, ubicado en La Habana, Cuba, en 2010. Cursa la “Maestría Cibernética Aplicada, Mención Control Avanzado”. Obtiene la categoría científica de “Aspirante a Investigador”. Ha realizado publicaciones y participado en eventos, tanto de alcance nacional como internacional.

Ing. Samuel Vázquez Hernández: Ingeniero en Dispositivos Radiotécnicos egresado del Centro de Enseñanza Militar “Cmdate Camilo Cienfuegos” de las FAR en 1986. Múltiples cursos de post grados y colaborador del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART de la UNAM, donde participa en varios proyectos de investigación. Especialista de la Estación Radioastronómica de La Habana, del IGA.

Ing. Pablo Sierra Figueredo: Ingeniero Eléctrico en Telecomunicaciones, graduado en la Ciudad Universitaria “José Antonio Echeverría” (CUJAE) de La Habana en 1980. Se ha desempeñado durante más de 30 años en la especialidad de Radioastronomía, colaborando con diferentes instituciones homólogas mexicanas (INAOE, Instituto de Geofísica) en la formación de especialistas jóvenes y en el desarrollo de instrumental radioastronómico. Actualmente colabora y trabaja en dos proyectos del IG de la UNAM. Ha cursado post-grado en Radioastronomía, Microprocesadores, Receptores de Microondas, entre otros.

Dr. Armando Carrillo Vargas: Técnico Académico Titular “B” de Tiempo Completo en el MEXART, Unidad Académica Michoacán, en México. Responsable técnico del observatorio de centelleo interplanetario en Coeneo. Trabaja en los temas de perturbaciones transitorias de gran escala en el medio interplanetario, técnicas de centelleo interplanetario, perturbaciones ionosféricas, instrumentación en radiotelescopía y arreglos dipolares de gran área.

Dr. Stanley Eugene Kurtz Smith: Dr. Titular “C” del Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Campus Morelia de la UNAM, en México. En 1993 realiza estudios de doctorado en la Universidad de Wisconsin. Trabaja en los temas de astrofísica, radioastronomía instrumental, interferómetros, investigaciones solares y planetarias, y estudio de Máseres.