

# Evaluación de performance de un sistema de posicionado angular de bajo costo

Ing. Nicolás F. Rivero Rodríguez  
Laboratorio de Fotometría - IIE - FI - UDELAR  
Email: nicolas@fing.edu.uy

**Resumen**— Actualmente los sistemas de control se vuelcan cada vez más al software como componente principal. Costosos sensores son sustituidos por programas con mayor inteligencia, que en muchos casos suplen adecuadamente las funciones que tradicionalmente se realizaban agregando sensores más complejos o un mayor número de ellos. El peso mayor de la componente de software permite además una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a nuevos requerimientos.

En este trabajo se evaluará el desempeño de un sistema de posicionado angular de bajo costo.

Dicho sistema se utiliza para el control de un goniofotómetro de fabricación casera, cuyos componentes mecánicos (incluidos sensores y actuadores) están dados.

El goniofotómetro es de tipo  $C$ - $\gamma$ . El movimiento de los ejes se realiza con motores asíncronos, cada uno con su caja de reducción, manejados por variadores de frecuencia. Los motores están montados sobre los ejes del equipo.

Las medidas de posición angular se realizan con encoders incrementales. Los encoders también están montados sobre los ejes del equipo.

El software de control y adquisición de datos reside en un computador PC, el cual cuenta con periféricos dedicados a cada función. Estos incluyen una tarjeta adquisidora para los encoders, además de una tarjeta para comunicación con otros instrumentos. Para manejar los actuadores del sistema se utiliza el puerto paralelo del PC.

El objetivo es determinar si las limitaciones inherentes a los componentes del sistema (tanto mecánicos como de instrumentación) se pueden atenuar o eliminar por medio del software de control. Se indicarán las desventajas asociadas a los equipos existentes y la forma de resolverlas, en los casos en que es posible; o las condiciones que deben cumplirse para que sean tolerables, en los casos en que no se pueden resolver.

## I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

### I-A. Goniofotómetro

Un goniofotómetro es un equipo destinado al relevamiento de curvas fotométricas<sup>1</sup> de luminarias o lámparas. Para lograr determinar la intensidad luminosa en cada dirección, existen diversas formas de hacer llegar la luz al sensor de medida utilizado, así como también distintos sistemas de coordenadas. Estas variantes y otras de tipo constructivo dan lugar a la existencia de distintos tipos de goniofotómetro.

En este caso, se trata de un goniofotómetro de tipo  $C$ - $\gamma$ <sup>2</sup>. En la figura 1 se muestra un esquema del mismo, indicando el eje correspondiente a la coordenada  $C$  y el correspondiente

<sup>1</sup>Una curva fotométrica contiene la información sobre intensidad luminosa emitida por una fuente para cada dirección. Para su determinación se miden iluminancias a una cierta distancia y luego se calculan las intensidades.

<sup>2</sup>Sistema de coordenadas normalizado para especificación de curvas fotométricas.

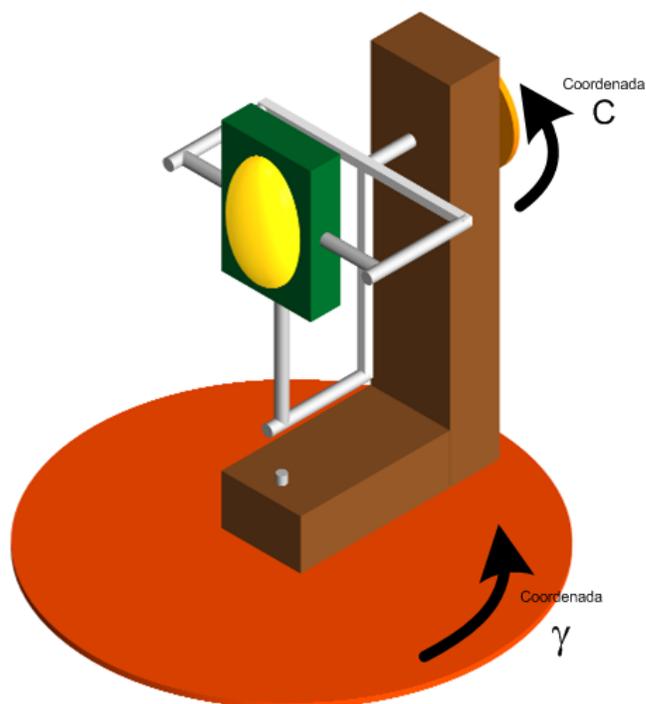


Fig. 1. Esquema del goniofotómetro.

a la coordenada  $\gamma$ . El sensor permanece fijo, ubicado al otro extremo de la habitación, y su eje óptico pasa por el punto de corte de los dos ejes del goniofotómetro. Se muestra además el lugar previsto para la instalación de la luminaria, representado por el prisma de color verde. Sobre el disco de color rojo se mide la posición en la coordenada  $\gamma$  y sobre el disco de color naranja se mide la posición en la coordenada  $C$ .

El goniofotómetro tiene dos lazos de control de posición, uno para cada coordenada. Los equipos e instrumentos utilizados para cada lazo son idénticos. Dada esta característica, se optó por estudiar el comportamiento de uno de ellos, eligiendo la coordenada  $\gamma$ . Existen otros lazos de control, cuyo funcionamiento se indicará brevemente a efecto de completar la descripción del equipo.

### I-B. Control de posición

El lazo de control de posición es el objeto de estudio de este trabajo. En él intervienen los componentes que se muestran en la figura 2, en la cual se indica además como se relacionan entre sí.

El eje de giro del goniofotómetro está conectado a una caja reductora (reductor 2 en la figura 2). Esta caja reductora se



Fig. 2. Lazo de posicionado.

conecta a otra (reductor 1 en la figura 2), que a su vez se conecta al motor que mueve al sistema. El motor es manejado por un variador de velocidad, que recibe comandos desde el computador (donde reside el software de control) a través del puerto paralelo.

Al eje de giro también está conectado el encoder. El mismo envía información a una tarjeta adquisidora dedicada, instalada en el computador. El software de control toma los datos y los utiliza para decidir que acciones tomar.

### I-C. Otros lazos

*I-C.1. Medida de iluminancia:* Las medidas de iluminancia se realizan con un luxímetro de laboratorio marca LMT, modelo S1000. El mismo dispone de conectividad GPBIB. Existe en el computador una tarjeta GPBIB, que se conecta a través de un bus 485 al luxímetro.

El control de la medida de iluminancia reside en el computador. El software de control decide cuando interrogar al luxímetro (a través del bus GPBIB), y una vez recibido el dato lo almacena en una hoja Excel en la posición correspondiente.

*I-C.2. Alimentación de la lámpara:* Existe otro lazo, controlado desde otro software en un computador PC secundario, que se encarga de mantener estables los parámetros eléctricos de la lámpara, además de realizar su encendido y apagado. En particular, para este tipo de ensayo es importante mantener constante la potencia de la lámpara, sobre todo si el goniómetro cambia la orientación de la misma en el campo gravitatorio como en este caso.

El computador secundario dispone de una tarjeta GPBIB, igual a la ya mencionada. El bus está en este caso conectado también a un wattímetro, marca Yokogawa, modelo WT110, y a un multímetro, marca Fluke, modelo 45. Estos instrumentos suministran los datos a este otro software de control. La actuación se realiza mediante contactores y un autotransformador.

### I-D. Componentes del lazo de posicionado

*I-D.1. Encoders:* Son dos encoders ópticos marca Omron, modelo E6B2-CWZ3E [1] de tipo incremental, uno para cada

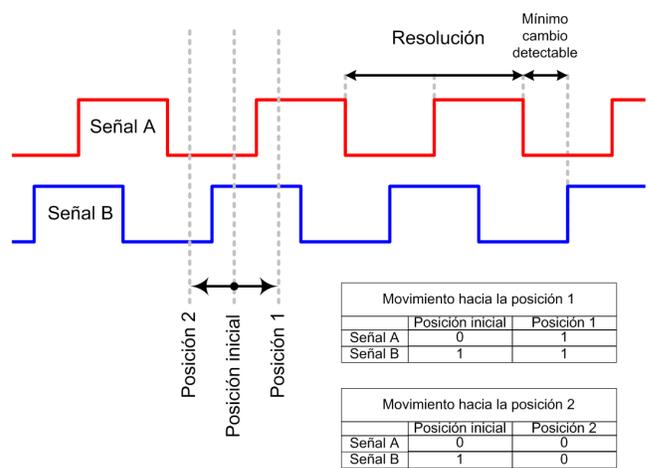


Fig. 3. Señales de salida del encoder.

coordenada. Se trata de equipos de mercado para uso industrial. Los mismos entregan pulsos rectangulares en cuadratura como se muestra en la figura 3. Esto permite conocer el sentido de rotación y es necesario para aplicaciones en las cuales el giro es en ambos sentidos.

La resolución es de 500 *pulsos/vuelta*. Se tiene entonces una apreciación de 2000 *cuentas/vuelta* (ver figura 3), lo que corresponde a 5,556 *cuentas/°*, o 0,18°/*cuenta*. La alimentación es de 5 a 12 V corriente continua. La resistencia de salida es de 2 kΩ. El consumo máximo es 100 mA.

*I-D.2. Tarjeta adquisidora para encoders:* Las señales de los encoders son recibidas por una tarjeta adquisidora marca US Digital, modelo PC7166 [2], para ranura ISA de 8 o 16 bits. Dicha tarjeta dispone de cuatro entradas para encoders incrementales, cada una con su contador en cuadratura de 24 bits. Provee alimentación de 5 V para cada encoder, y soporta un consumo de 190 mA máximo por encoder. La conexión es por cable, un tramo trenzado y otro cable plano. El computador está ubicado cerca del encoder, la frecuencia de las señales es muy baja (3 o 4 Hz), y además el laboratorio es un ambiente relativamente libre de ruido eléctrico (a diferencia del común de los ambientes industriales), por lo cual no fue necesario tomar precauciones adicionales o reacondicionar las señales.

La tarjeta dispone de drivers y código fuente de programas de demostración en lenguajes Microsoft Visual Basic 6.0 y Microsoft Visual C++ 5.0. Los registros que almacenan los valores de los contadores, así como los registros de control (configuración), son accesibles por programa utilizando las funciones públicas disponibles en los drivers que acompañan la tarjeta. Se utilizan 16 registros consecutivos, y la dirección base es configurable via dip switches.

*I-D.3. Computador:* Es un computador PC Pentium-S, con procesador de 100 MHz, 24 MiB de memoria RAM y sistema operativo Microsoft Windows 98. Cuenta con Microsoft Office 97 instalado. El motherboard dispone, entre otros, de varias ranuras ISA y un puerto paralelo.

El software de control fue creado utilizando Microsoft Visual Basic 6.0.

*I-D.4. Driver puerto paralelo:* Para manejar potencia y proteger el puerto paralelo del PC, se utiliza una placa de

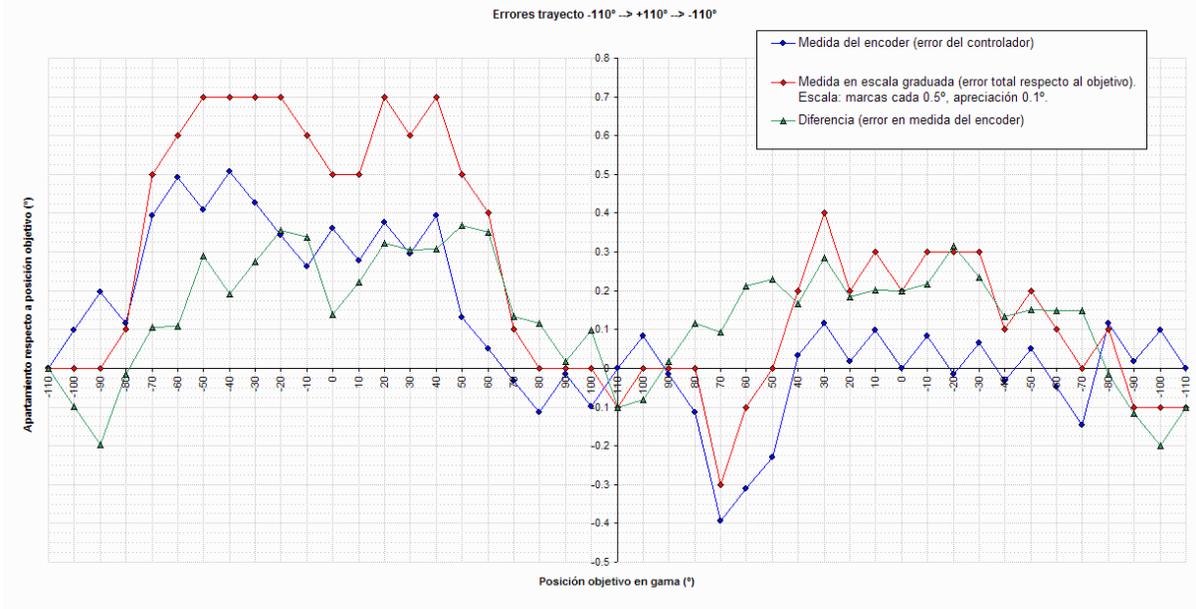


Fig. 4. Controlador 1. Errores.

fabricación casera con transistores que manejan minirelés. La misma dispone de seis salidas. Los contactos libres de tensión disponibles se utilizan para controlar los variadores de velocidad.

*I-D.5. Variadores de velocidad:* Se trata de dos variadores de velocidad marca Danfoss, modelo VLT 3002 [3], uno para cada uno de los motores. Los parámetros de régimen y transitorios de arranque se ajustaron para minimizar vibraciones en los componentes mecánicos del goniómetro. Se ajustó la detención a la opción *detención rápida*. La frecuencia en régimen para la coordenada  $\gamma$  es 11,65 Hz.

*I-D.6. Motores:* Son dos motores asíncronos de 100 W marca ABB, modelo 56B-4, uno para cada eje. La alimentación es en 230 V, y para esa tensión el consumo nominal es 0,63 A. En 50 Hz, su velocidad nominal es 1280 rpm.

*I-D.7. Reductores:* Existen cuatro cajas reductoras, dos para cada eje, formando dos conjuntos idénticos. Son marca Motovario. La primera caja reductora (reductor 1 en la figura 2) tiene una reducción de 30:1 y el modelo es NRV-030. La segunda caja reductora (reductor 2 en la figura 2) tiene una reducción de 40:1 y el modelo es NMRV/050.

## II. REQUISITOS Y LIMITACIONES

Como se adelantó en I-A, de aquí en más se hablará exclusivamente de la coordenada  $\gamma$ .

El objetivo para el control de posición es lograr trabajar con un error en la posición angular no superior a  $0,5^\circ$ . Las curvas fotométricas más densas tienen regiones con puntos cada  $2,5^\circ$ . Además la escala graduada disponible tiene una separación entre marcas de  $0,5^\circ$ , con lo cual ese es el error máximo existente al realizar ensayos en forma manual<sup>3</sup> (sin considerar el error humano).

<sup>3</sup>Se refiere a que el posicionado en cada punto de medida lo realiza el operador.

Normalmente los goniómetros de laboratorio utilizan sistemas de posicionado más robustos, y no compuestos exclusivamente por componentes de tipo industrial. Eso generalmente involucra piezas de fabricación especial, elevando los costos. Por ejemplo puede utilizarse una corona dentada, de diámetro parecido a las dimensiones de la envolvente del equipo, movida por un motor paso a paso con un tornillo sin fin. Este tipo de solución proporciona mayor estabilidad y la posibilidad de alcanzar una precisión impensable con el presente sistema.

En este caso, el trabamiento del eje viene dado esencialmente por el reductor 2 (que está montado directamente sobre el eje). Esto hace que el juego mecánico<sup>4</sup> del equipo esté entre  $0,7$  y  $0,8^\circ$ .

Respecto a los encoders existen dos tipos de limitación. Una de ellas tiene que ver con el tipo de encoders utilizados. Los encoders incrementales obligan a reajustar el cero cada vez que se utiliza el equipo. Esto podría evitarse mediante el uso de encoders absolutos, los cuales son más costosos y requieren un mayor número de hilos, ya que transmiten sus datos en paralelo<sup>5</sup>.

La otra limitación tiene que ver con la cuantización. Sin embargo en este caso, dado el juego mecánico que presenta el sistema, el valor de apertura angular de una cuenta ( $0,18^\circ$ ) parece razonable. De cualquier forma este valor es cota inferior para el error en el posicionado.

## III. ENSAYOS Y RESULTADOS

Se realizaron varios ensayos para evaluar hasta donde se justificaba llegar en la complejidad del software de control, y que beneficio se obtenía en términos de reducción de la cota

<sup>4</sup>Relevado experimentalmente en varios puntos.

<sup>5</sup>Actualmente existen soluciones con electrónica integrada que transmiten sus datos en formato digital y permiten descentralizar la complejidad.

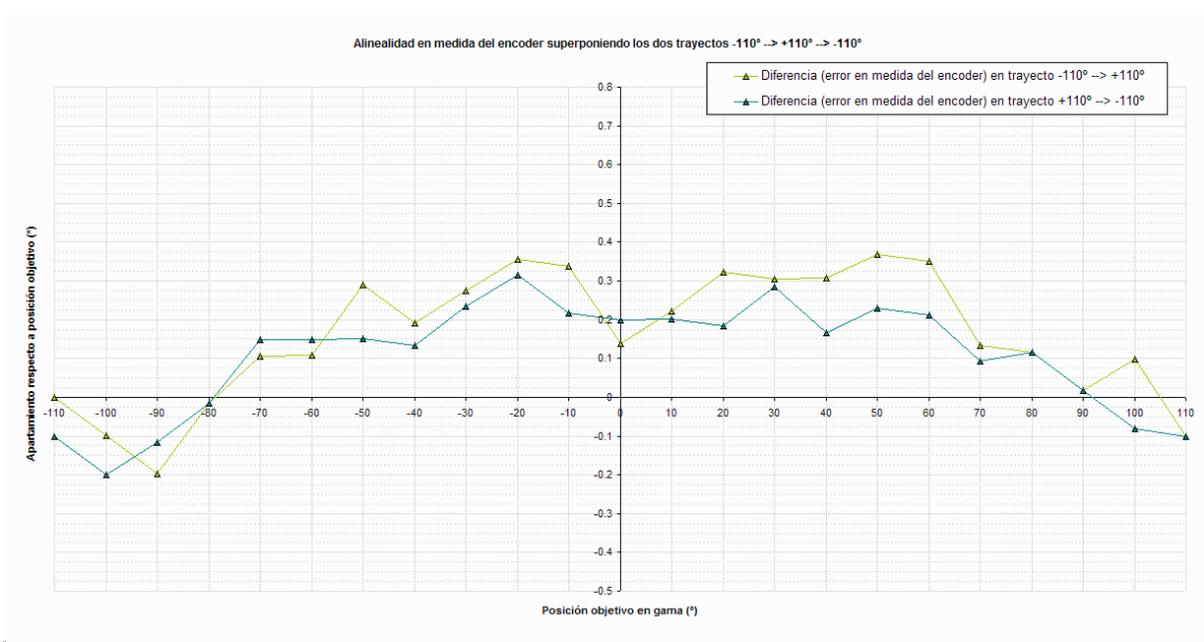


Fig. 5. Controlador 1. Error encoder en trayectos de ida y vuelta.

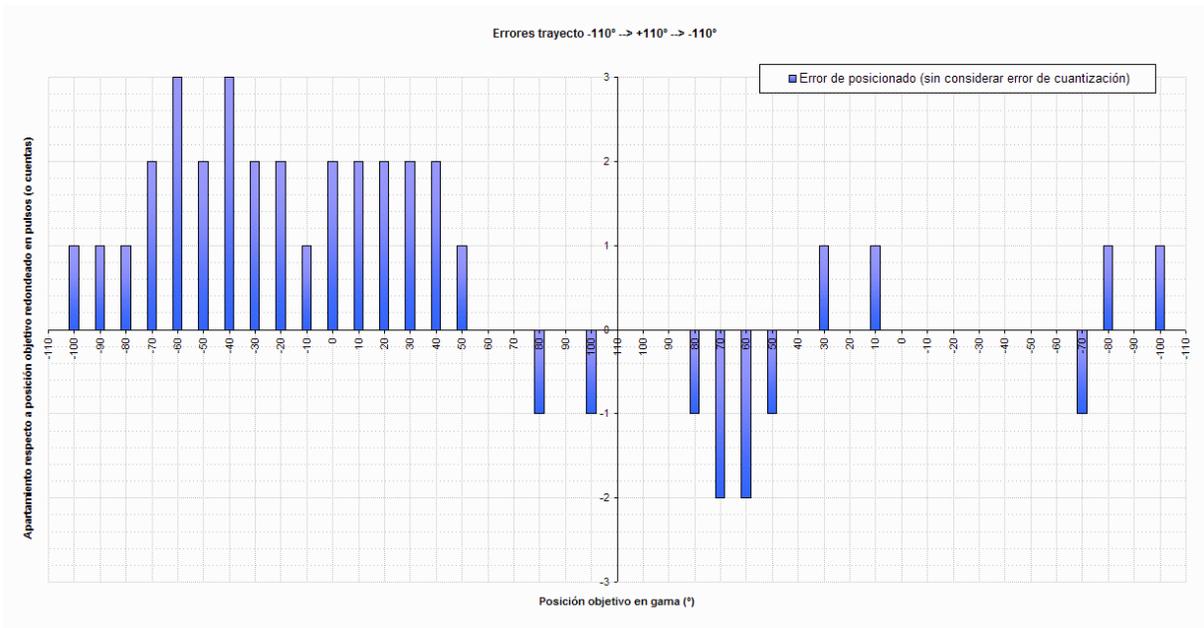


Fig. 6. Controlador 1. Error controlador.

superior del error de posicionado. Se utilizaron tres algoritmos distintos para el posicionado.

En todos los casos se tomó el rango de la coordenada  $\gamma^6$  y se recorrió en intervalos de a  $10^\circ$ . Se registraron las indicaciones del sistema de medición de posición en cada punto objetivo, así como también la posición real. Para esto se utilizó la escala graduada disponible, que tiene un espacio entre marcas de  $0,5^\circ$ . Se estimó hasta  $0,1^\circ$ , identificando hasta 5 divisiones por marca.

Se considera que la escala graduada está perfectamente ubi-

<sup>6</sup>El rango útil va de  $-110$  a  $110^\circ$ .

cada.

### III-A. Controlador 1

Es el más simple de los algoritmos probados. Su funcionamiento consiste en aplicar el comando para girar hacia el objetivo, y detenerse definitivamente una vez alcanzada la condición:

$$|posicion\_actual - posicion\_objetivo| < tolerancia$$

El valor de tolerancia se fijó, luego de algunas pruebas preliminares en  $0,3^\circ$ . En las figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos para este controlador. Las abscisas

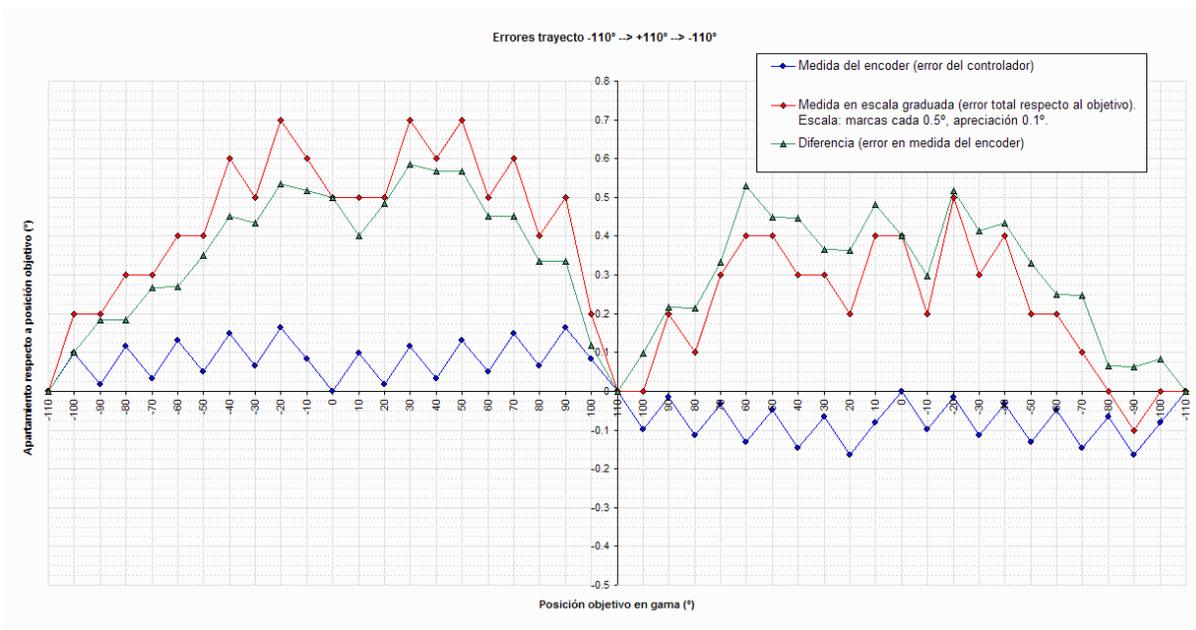


Fig. 7. Controlador 2. Errores.

corresponden en todos los casos a las posiciones objetivo. Los valores relevados (posiciones reales y medidas por el sistema) se tomaron luego de que el goniofotómetro se detenía completamente.

En la figura 4 aparece en azul el apartamiento del objetivo en la medida tomada por el sistema encoder-tarjeta-computador. En rojo se indica el apartamiento respecto a la posición real<sup>7</sup> (error total) y en verde la diferencia. La curva azul representa el error del controlador sumado al error de cuantización del encoder. La curva verde representa el error introducido por el sistema de medición.

En la figura 5 se comparan los errores del sistema de medición (curva verde de la figura 4) para los trayectos de ida y vuelta.

Por último en la figura 6 se muestra el error del controlador en pulsos (o cuentas) para cada posición.

El error total obtenido con este controlador es superior al aceptable en la mayor parte del trayecto de  $-110$  a  $+110^\circ$ . El peso del error del controlador es significativo. Parece además existir una cierta alinealidad entre la posición angular y la medida del encoder, como se evidencia en la figura 5. El error introducido por el controlador es siempre menor al juego mecánico del equipo.

### III-B. Controlador 2

Se busca en este caso minimizar el error introducido por el controlador. Se implementa un algoritmo que consiste en dos etapas. La primera (de aproximación) es igual al controlador 1. En la segunda etapa se aplican pequeños pulsos de marcha al variador para lograr un ajuste fino. Luego de cada pulso se espera un cierto tiempo y según se haya alcanzado el segundo nivel de tolerancia o no, se concluye o no la secuencia de posicionado.

<sup>7</sup>Medida en la escala graduada. Se estima un error de  $\pm 0,1^\circ$  en esta medida.

El valor de tolerancia para la aproximación inicial se mantuvo en  $0,3^\circ$ . El tiempo de duración de los pulsos de ajuste se fijó en  $180\text{ ms}$  y el tiempo de espera entre pulsos en  $1500\text{ ms}$ . La tolerancia para el ajuste fino se fijó en  $0,18^\circ$ , lo que significa que se pretendía ubicar el equipo en la ranura correcta de la escala cuantizada por el encoder.

En las figuras 7, 8 y 9 se muestran los resultados obtenidos para este controlador.

El error total continúa fuera de los valores aceptables. Sin embargo, el error introducido por el controlador se reduce sensiblemente. No se logra el objetivo de que el error del controlador sea cero (ver figura 9) sin considerar el error de cuantización. Se confirma la alinealidad entre la posición angular y la medida del encoder observada con el controlador 1 (ver figura 8).

### III-C. Controlador 3

Para el controlador 3 se utiliza el esquema del controlador 2 como base, agregando una curva de calibración para el rango<sup>8</sup>. Se agrega además la posibilidad de mantener la vigilancia sobre la posición final durante un tiempo mayor para poder reposicionar si el equipo se corre luego de haber aparentemente alcanzado el reposo.

El valor de tolerancia para la aproximación inicial se fijó en  $0,5^\circ$ . El tiempo de duración de los pulsos de ajuste se fijó en  $180\text{ ms}$  y el tiempo de espera entre pulsos en  $1700\text{ ms}$ . La tolerancia para el ajuste fino se fijó en  $0,18^\circ$  y para la estabilización se requirieron seis medidas dentro de la tolerancia fina, cada una tomada en intervalos iguales al tiempo de espera entre pulsos (total  $1700\text{ ms} * 6 = 10,2\text{ s}$ ).

En las figuras 10 y 11 se muestran los resultados obtenidos con el controlador 3. No se incluye en este caso la gráfica de

<sup>8</sup>Para eliminar la alinealidad detectada. La curva se releva una única vez posicionando manualmente el goniofotómetro para cada punto. Entre puntos se interpola linealmente.

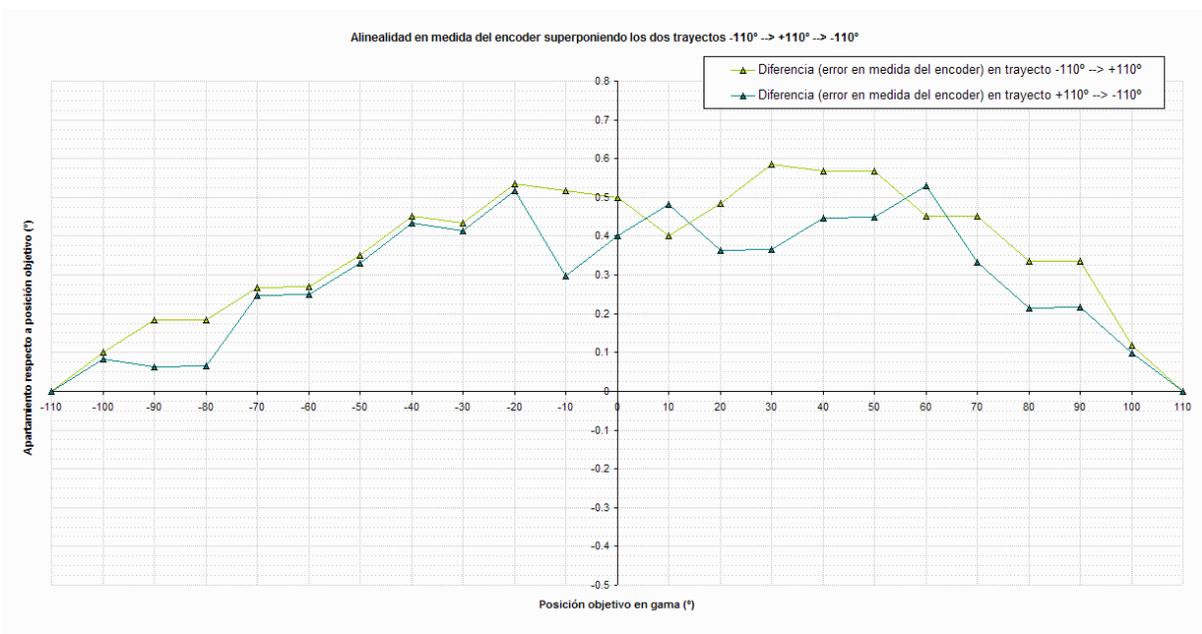


Fig. 8. Controlador 2. Error encoder en trayectos de ida y vuelta.

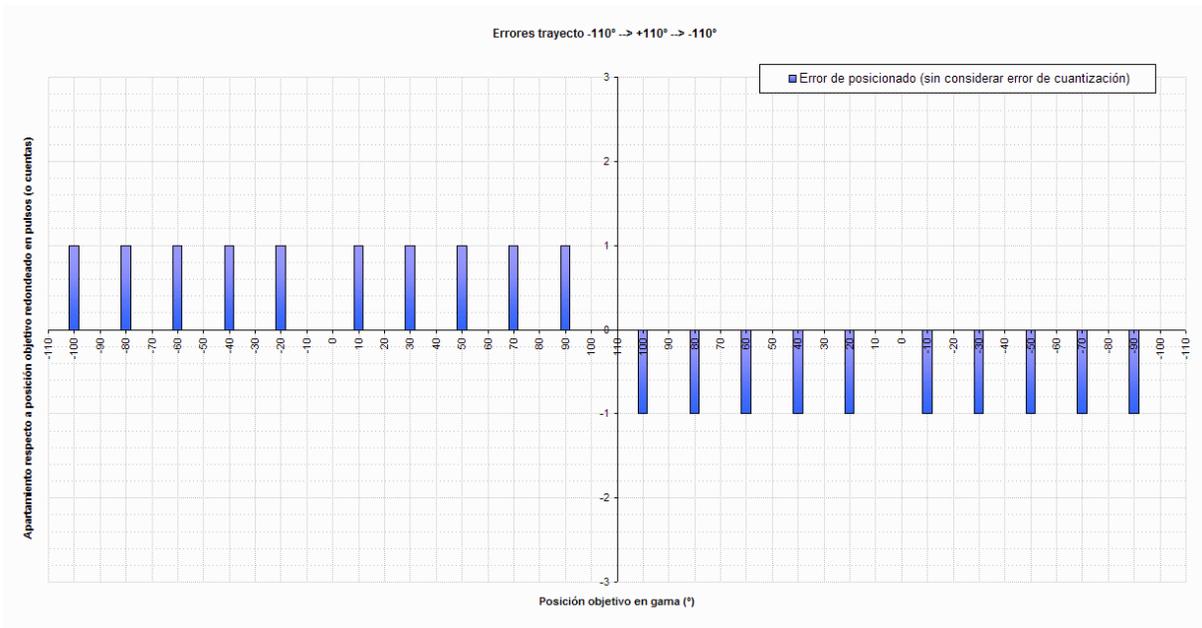


Fig. 9. Controlador 2. Error controlador.

errores en el controlador sin considerar la cuantización pues para todos los puntos relevados este error fue cero.

El error total está dentro del objetivo planteado<sup>9</sup>. El error del controlador se llevó al mínimo teórico posible. En algunos puntos el tiempo de posicionado se ve incrementado sensiblemente. Sin embargo, el tiempo de espera final puede ser utilizado durante un ensayo para registrar la medida de iluminancia; luego si la posición se pierde antes de almacenar el valor, se reposiciona y se repite el proceso.

<sup>9</sup>Aún considerando el error de apreciación en la escala graduada, estimado en 0,1°.

#### IV. CONCLUSIONES

La solución alcanzada presenta las siguientes desventajas:

1. El controlador requiere una curva de calibración. No alcanza con ajustar rango y cero. Esta curva debe ser vigilada y se debe evaluar su período de validez. Además, si es necesario desmontar el encoder o las cajas reductoras (para mantenimiento por ejemplo), se debe recalibrar.
2. Cada vez que se utiliza el equipo es necesario ajustar el cero.
3. Dado el juego mecánico del equipo, se consume tiempo para lograr el posicionado correcto en cada punto.

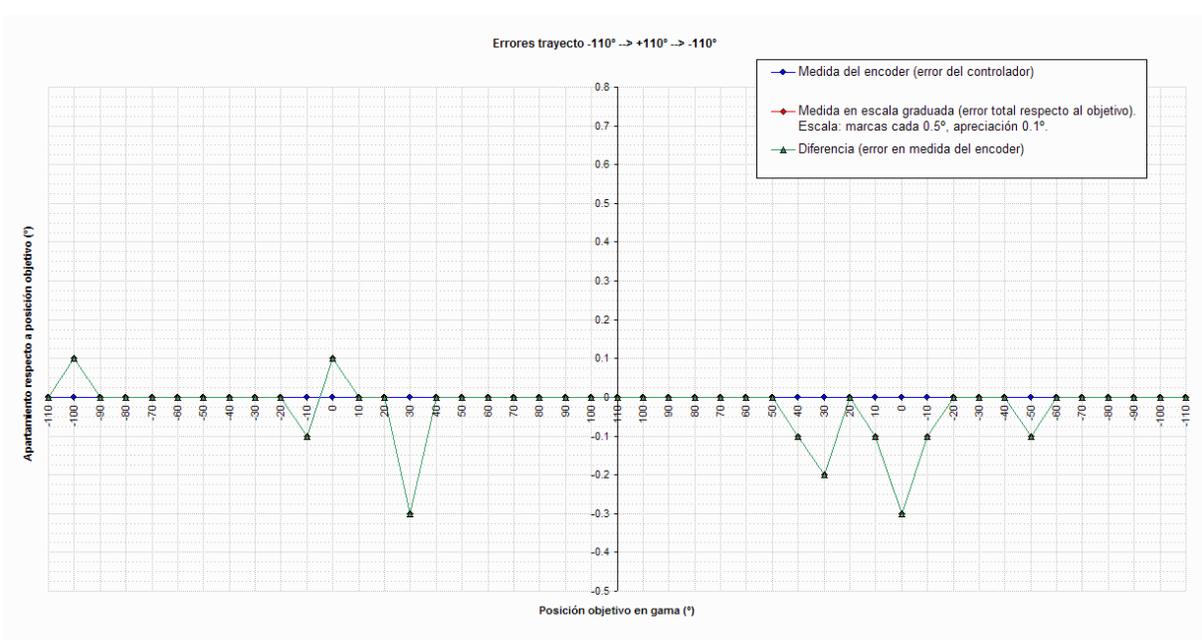


Fig. 10. Controlador 3. Errores.

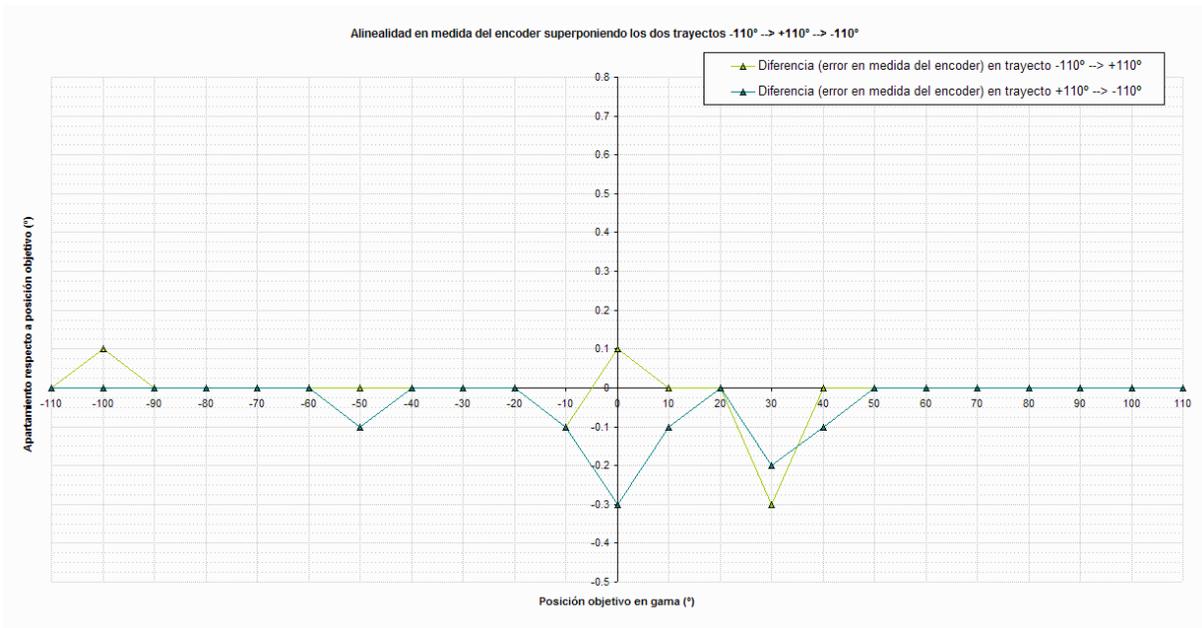


Fig. 11. Controlador 3. Error encoder en trayectos de ida y vuelta.

4. Además, la velocidad de giro debió ajustarse en el mínimo valor posible para evitar vibraciones, etc.

Sin embargo, se logró alcanzar satisfactoriamente el umbral de error deseado. Además, como se trata de un equipo de laboratorio, se dispone de los recursos para realizar calibraciones periódicas y monitorear el tiempo de validez de las mismas. Una ventaja interesante que presenta el sistema, es que toda la lógica reside en el computador, lo cual le da gran flexibilidad para futuras mejoras.

En resumen, si bien en un ambiente industrial una solución de este tipo tal vez no sería adecuada, en este caso mostró ser

una buena solución de compromiso entre resultados y costos.

#### REFERENCIAS

- [1] *Omron model E6B2 rotary encoder - Instruction manual*, Omron Corporation, 1992.
- [2] *PC7166 - PC to incremental encoder interface card - Technical datasheet*, US Digital Corporation, Diciembre 1999.
- [3] *VLT Serie 3000 - Manual del producto - Software versión 3.0*, Danfoss.