

# ROBOT POSICIONADOR PARA EL ESPEJO SECUNDARIO M2 DEL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO

POSITIONER ROBOT TO THE SECONDARY M2 MIRROR OF THE GREAT MILLIMETRIC TELESCOPE

JUAN CARLOS A.  
JÁUREGUI C.  
jcjaur@ciateq.mx

OSCAR M.  
GONZÁLEZ BRAMBILA

JESÚS EDUARDO  
VILLAGÓMEZ OROZCO

ALEJANDRO  
GARCÍA ARREDONDO

CARLOS S.  
LÓPEZ CAJÚN

VICTOR IVÁN  
DE ANDA FLORES

CIATEQ, A.C.  
Querétaro, Qro.

## Introducción

El desarrollo de sistemas mecatrónicos de alta exactitud requieren de la integración de cuatro disciplinas: diseño mecánico, diseño electrónico, control y algorítmica. Para lograr las funciones que debe cumplir el mecanismo, es necesario identificar la contribución individual de cada disciplina al error de posición. Cada elemento del mecanismo tiene a su vez componentes cuyas desviaciones contribuyen con el error de posición. En ese sentido, el diseño de este mecanismo es un ejemplo de la metodología de diseño de sistemas mecatrónicos y muestra los pasos a seguir para diseñar, construir, ajustar y calibrar sistemas de alta exactitud. En este sentido es importante distinguir que este trabajo demuestra las capacidades para integrar tecnologías de vanguardia y la conformación de equipos de trabajo multidisciplinares.

El Gran Telescopio Milimétrico es un instrumento científico de alta precisión que podrá detectar ondas electromagnéticas con longitudes de onda sub-milimétricas de bajo nivel energético, conocidas como ondas de radiación fría, que se generaron al inicio del universo durante el big-

## Resumen

El robot posicionador es un mecanismo que sirve para alinear y mantener enfocado el espejo secundario del Gran Telescopio Milimétrico (GTM). Para lograr que el espejo mantenga la distancia focal y el alineamiento, se requiere que este robot logre mantener la posición del espejo en el espacio con una exactitud menor a  $2\mu\text{m}$ . Además, este instrumento debe poder funcionar a una altura de 4600m sobre el nivel medio del mar, y estar expuesto a temperaturas y condiciones ambientales extremas. Para cumplir estos requerimientos se ha diseñado un hexápodo con seis actuadores lineales de super-precisión diseñados especialmente, un sistema de control de lazo cerrado con encoders lineales de ultra-precisión y se ha desarrollado un método de calibración externo por medio de compensación electrónica ya que mecánicamente no es posible alcanzar la precisión definida.

**Palabras clave:** Hexápodo, actuador lineal, encoders de alta precisión, compensación electrónica, telescopio.

## Abstract

The positioner robot is a precise instrument which will be used to align and maintain the position of the secondary mirror of the Large Millimeter Telescope (LMT). In order to achieve these specifications, this robot requires moving and maintaining the position of the secondary mirror in a space within an exacted below  $2\mu\text{m}$ . Furthermore, this instrument must be able to perform at a height of 4600 meters above sea level, and be exposed at harsh environmental conditions. To accomplish these requirements, the robot was designed with six linear actuators specially designed for this application, a closed loop control system with ultra-precision linear encoders. Also, an electronic compensation- calibration method was developed in order to achieve the precision since it is not possible to achieve it by mechanical means.

**Keywords:** Hexapod, linear actuator, ultra precision encoders, electronic compensation, telescope.



Figura. 1. Ubicación de los espejos en el GTM

bang. Con este instrumento la comunidad científica podrá entender mejor el universo. El Gran Telescopio Milimétrico es el radio telescopio más grande de su tipo en el mundo, está formado principalmente por un espejo parabólico de 50 m de diámetro, el espejo primario, un espejo secundario de 2.6 m de diámetro y un espejo plano terciario.

El espejo secundario está posicionado entre los otros dos espejos y debe mantenerlos enfocados y esta es la razón por la que el espejo secundario debe estar montado en un mecanismo de alta precisión que lo mantenga en la posición correcta. La distancia focal entre el espejo primario y el secundario es de 17.5 m. El espejo secundario tiene la forma de un hiperboloide de revolución, por lo que sólo se necesitan controlar cinco grados de libertad para mantener su posición: tres corresponden con las posiciones ortogonales y dos con las orientaciones angulares.

La mejor manera de lograr la posición del espejo secundario es con un robot paralelo tipo (Stewart; 1965), (comúnmente llamado hexápodo) formada por dos plataformas (una fija y la otra móvil) articulada en base a seis actuadores eléctricos conformados por un servomotor, un tornillo con tuerca embalados y un reductor de velocidad ambos de súper precisión; así como un encoder lineal para cumplir con la precisión requerida. Todo este sistema está controlado por una computadora industrial con una tarjeta de control de movimiento con seis ejes de interpola-

ción simultánea donde se programar el algoritmo de movimiento y se interconecta mediante una red de comunicaciones específica.

Para cumplir con los requisitos ambientales es necesario que los actuadores eléctricos sean de acero inoxidable y para minimizar el peso de las plataformas (fija y móvil) éstas se fabricaron en aluminio. Además, todos los actuadores son herméticos para evitar la entrada de humedad y polvos a las partes móviles. Las partes comerciales y los cables de comunicación, potencia y conectores cumplen con la norma IP65.

También se diseñó una estructura interfase para fijar el hexápodo a la estructura del telescopio, con la que se asegurará la distancia focal del espejo secundario con el espejo primario. Además se diseñó un sistema de guardas que protegerá al hexápodo del medio ambiente.

### *Diseño mecánico*

El desarrollo de un sistema mecatrónico como el que aquí se presenta inicia a partir del análisis de las especificaciones de funcionamiento. De este análisis se plantea una solución que inicia con un concepto del mecanismo. En este caso, las especificaciones de funcionamiento son muy restrictivas, de hecho están en el límite máximo alcanzable con la tecnología disponible a nivel mundial. El primer paso es determinar el meca-

nismo que cumple con el movimiento requerido, después se debe tener en cuenta la contribución de cada elemento (mecánico, electrónico y algorítmico) a la exactitud de la posición y velocidad. En este sentido, la capacidad de poder controlar el mecanismo y el tiempo de respuesta del control y el algoritmo de posicionamiento tienen mucha relevancia. En el diseño de los sistemas mecánico y electrónico se incluyeron los componentes más precisos disponibles en el mercado, de esa manera se logró aumentar la exactitud en la construcción del mecanismo. Una de las contribuciones importantes en el desarrollo de este mecanismo fue la estrategia para compensar las desviaciones mecánicas a través de un proceso de ajuste y después con un modelo de corrección en base a funciones de corrección integradas al algoritmo de control. Con esta filosofía se logró cumplir con las especificaciones del diseño.

En la Fig. 2 se muestra la cinemática del robot posicionador. Éste está formado por una plataforma móvil, unida por seis actuadores lineales (piernas retractiles) a la plataforma fija mediante

una junta esférica y una junta universal unidas a cada extremo de cada actuador.

### Ingeniería Conceptual

Para el concepto del mecanismo se propuso una plataforma de Stewart con seis actuadores eléctricos, lo que resulta en un mecanismo de seis grados de libertad y seis puntos de apoyo.

Dicho mecanismo está compuesto por:

- Una plataforma base, fija.
- Seis juntas esféricas con tres grados de libertad.
- Seis actuadores eléctricos móviles (cinemáticamente se componen de dos elementos deslizantes y una junta prismática).
- Seis juntas universales con dos grados de libertad.
- Una plataforma superior, móvil.

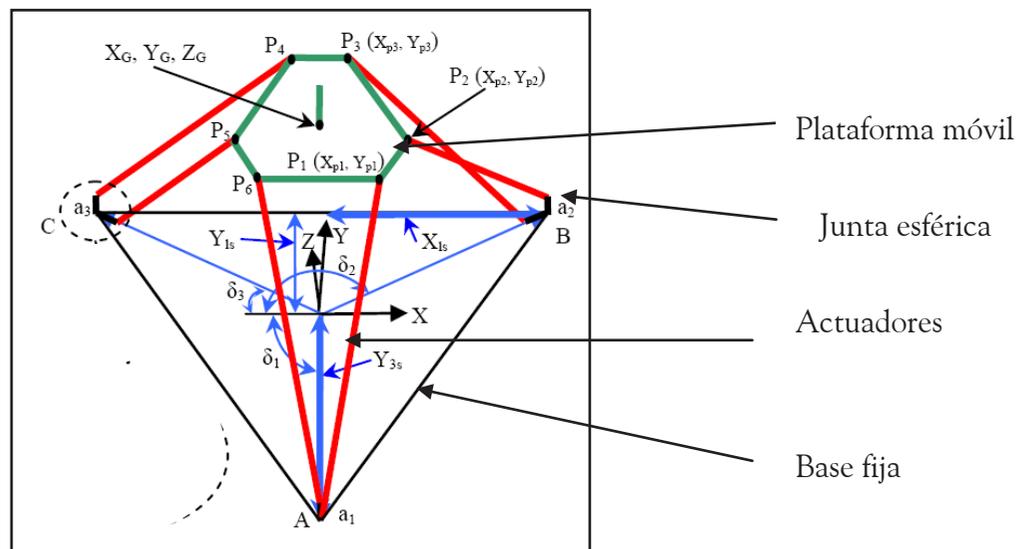


Figura. 2. Croquis del mecanismo propuesto.

La primera parte del diseño consiste en la determinación de los grados de libertad de la plataforma móvil, esto se calcula tomando en cuenta las restricciones y los grados de libertad de cada uno de los elementos que forman la cadena cinemática. (Schipani, 1997)

En la siguiente tabla se muestra un resumen:

Descripción	Cantidad	Restricción	GDL
Actuador	6	5	1
Junta Universal	6	4	2
Junta Esférica	6	3	3

Cada actuador está formado por una parte deslizante y una guía, por lo tanto tiene dos elementos móviles y un solo grado de libertad, por lo tanto se identifican 13 partes móviles, (6 émbolos, 6 guías y 1 plataforma). De esta manera se tendrían:

$$GDL = 13 \times 6 = 78$$

De la tabla anterior se determina que la suma de restricciones es

Descripción	Cantidad	Restricción	Total
Actuador	6	5	30
Junta Univeral	6	4	24
Junta Esférica	6	3	18
Total			72

Por lo tanto, el robot posicionador tiene 78 grados de libertad individuales menos 72 restricciones

$$GDL_{tot} = 78 - 72 = 6$$

Una vez determinados los grados de libertad del robot posicionador, se estimó el error máximo permitido por el mecanismo (Merlet, 2000, Hiiseyin *et al.* 2004)). Para ello se calculó la contribución del error individual de cada actuador al error final de posición, por lo que puso como objetivo que cada actuador tuviera un error RMS máximo de  $2 \mu m$ . El diseño mecánico de cada actuador se hizo tomando en cuenta esta restric-

ción, sin embargo, los elementos mecánicos disponibles a nivel mundial no permiten construir un actuador que cumpla con esta especificación, por lo tanto fue necesario utilizar un lector óptico (encoder lineal) que permitiera tener un sistema de control redundante en cada actuador y así corregir las desviaciones de los elementos mecánicos (García-Sanz, 2006).

La última parte del diseño mecánico consistió en la optimización del diseño estructural. Las deformaciones elásticas también contribuyen al error global y están fuera de la corrección que puede hacer el control, por lo tanto se tienen que minimizar desde el diseño.

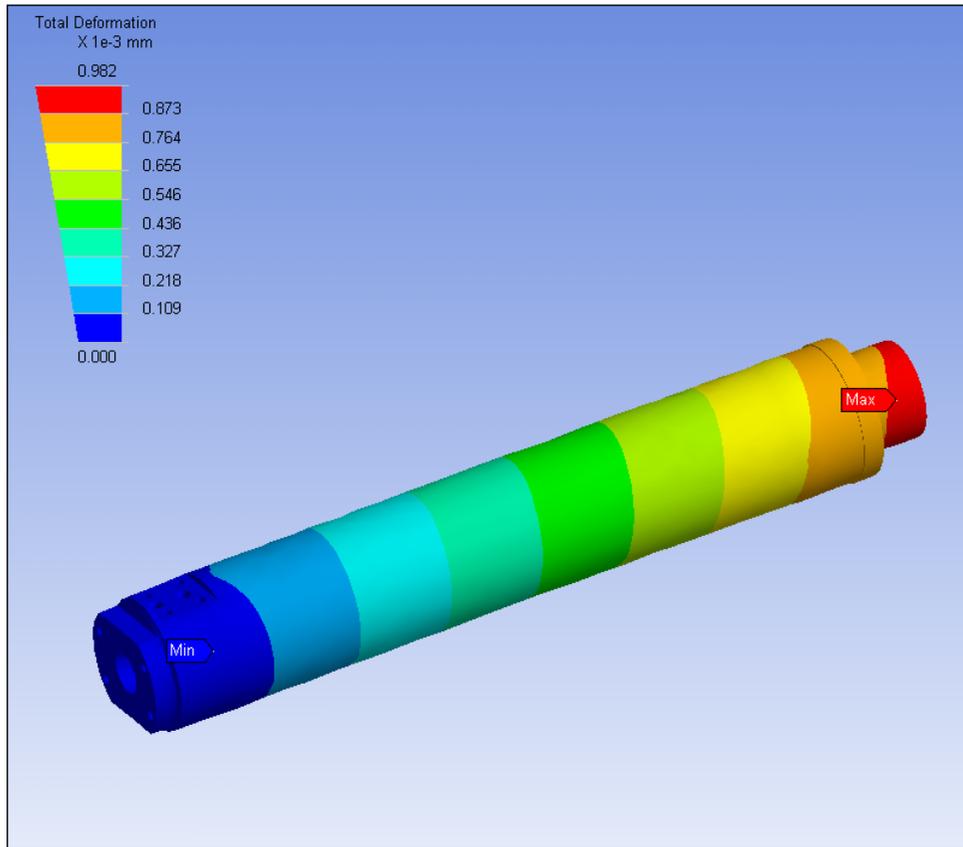


Figura. 3 Deformación en el vástago

En la Fig. 3 se muestra el análisis de las deformaciones en el vástago del cilindro, bajo una carga de 500N y se puede observar que es de  $0.7 \mu\text{m}$ . Este valor es inferior al error máximo permitido.

El mismo proceso se siguió con las estructuras de aluminio que forman las plataformas fija y móvil. Por simplicidad su diseño fue similar, sin embargo, no están sometidas a las mismas condiciones de carga ya que en una se montan las juntas universales y en la otra las juntas esféricas. Se puede observar en la Fig. 4 la plataforma diseñada tanto para ser la base fija como la móvil. También se pueden observar los seis puntos de fijación para el espejo secundario. La plataforma móvil se muestra en la Fig. 5 y se pueden observar los seis puntos de apoyo donde se sujetan cada uno de los actuadores.

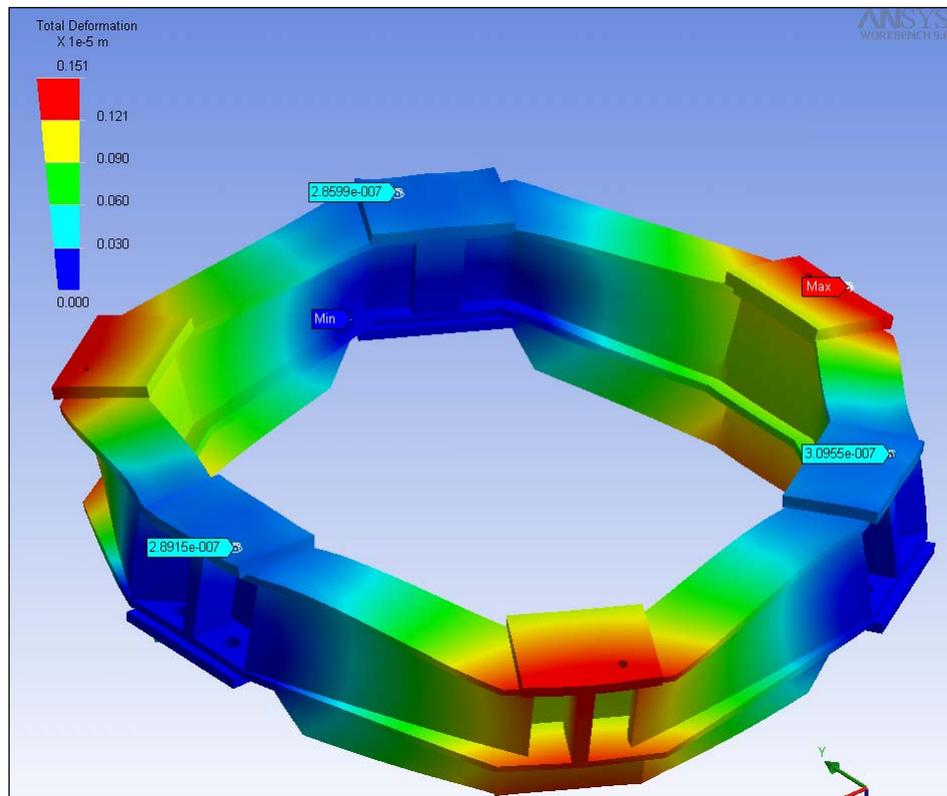


Figura. 4. Análisis de la plataforma fija

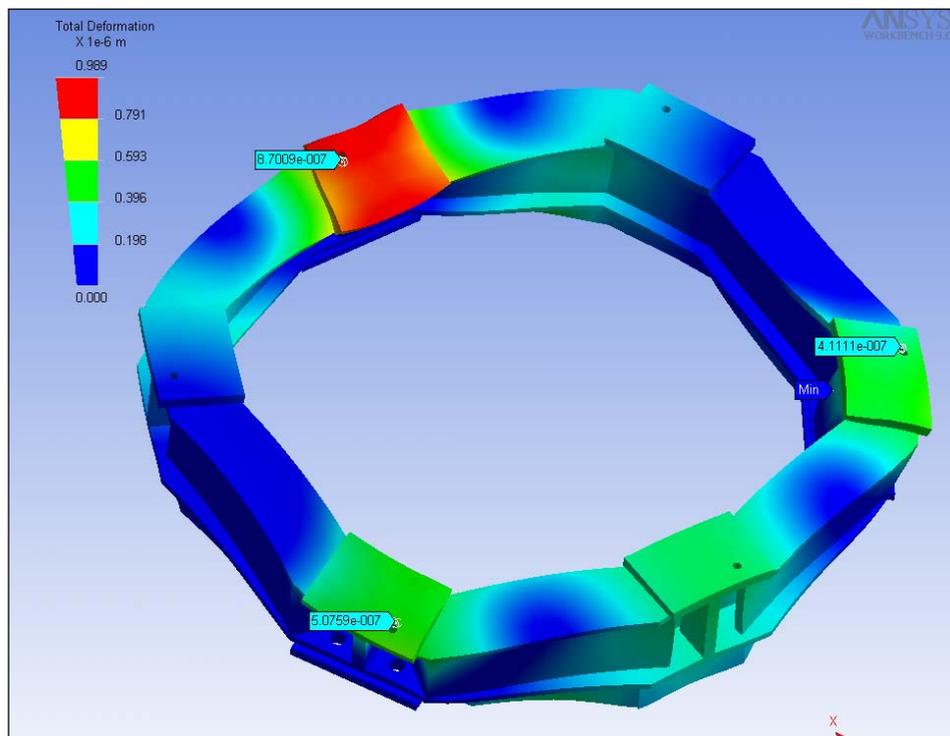


Figura. 5. Análisis de la plataforma móvil

En la Fig. 6 se puede ver el robot posicionador con los seis actuadores, seis juntas esféricas inferiores, seis juntas universales superiores, la plataforma fija inferior y la móvil superior, montado en el telescopio.

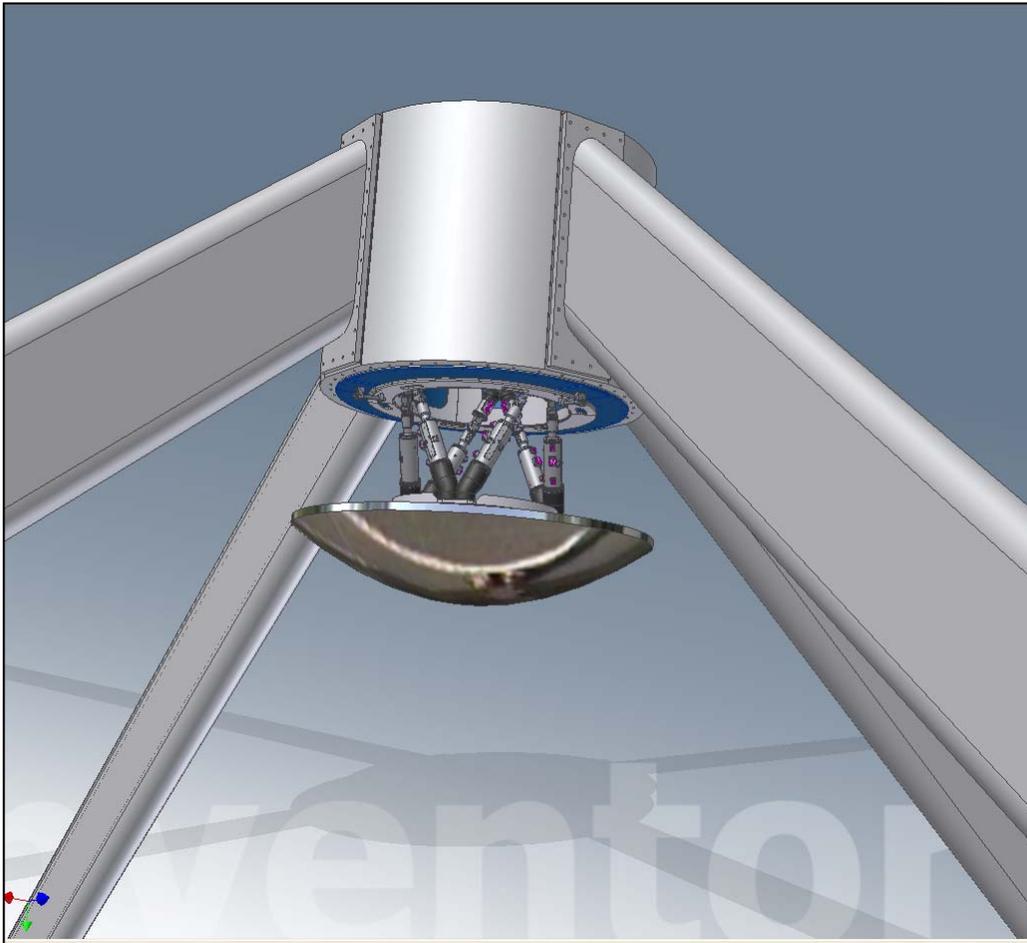


Figura. 6. Robot posicionador montado en el GTM con el espejo secundario

### *Diseño de control*

El control del actuador lo integra un servomotor con su encoder (sensor de posición) acoplado a la flecha del mismo motor. Además integra un segundo encoder lineal para la medición directa del desplazamiento del actuador. Ambos encoders forman un lazo completo de retroalimentación de la posición del actuador lineal.

Otra de las restricciones de diseño fue la comunicación con el control central del telescopio. El ACU (Antena Control Unit), control

principal del telescopio, se comunica a través de una red de comunicación llamada ProfiBus a la computadora de control del hexápodo. En esta computadora se localiza la tarjeta de control de movimiento insertada en un slot PCI de la misma. La comunicación de la tarjeta de control de movimiento a cada uno de los amplificadores de los servomotores se realiza utilizando una red de comunicación serial de alta velocidad. A través de esta última red se pueden monitorear y comandar los parámetros de cada servomotor correspondientes a velocidad, posición, torque, interruptores de límite, entre otros.

De esta manera, los equipos de control que se integraron al robot son:

- Seis servomotores con encoder (sensor de posición rotativo)
- Seis Servo-amplificadores con capacidad de comunicación al sistema de control.
- Seis encoders lineales de alta precisión.
- Doce interruptores de límite de carrera.
- Una tarjeta de control de movimiento para 6 ejes.
- Una computadora industrial.
- Una tarjeta de comunicación ProfiBus.

#### *Operación general del sistema de control*

La operación general del sistema de control se basa en una red de comunicación de alta velocidad que permite la actualización de todos los parámetros que intervienen en el movimiento del robot posicionador. Esta red de comunicación se puede ver en la Fig. 7.

A continuación se describe la operación general del sistema de control y la comunicación al control principal del telescopio:

- El ACU (unidad de control del telescopio) envía, a través de una red de datos, a la com-

putadora de control las coordenadas deseadas para posicionar el espejo secundario.

- La computadora calcula los seis diferentes movimientos para los actuadores que corresponden a la coordenada solicitada y los envía a la tarjeta de control de movimiento.
- La tarjeta de control de movimiento envía los movimientos sincronizados a cada servo-amplificador.
- Cada servo-amplificador controla el movimiento de un actuador lineal usando dos encoders, el rotativo (del servomotor) y el lineal (del propio actuador) para formar un sistema de control cerrado.
- Durante el movimiento y al final de éste, cada servo-amplificador envía la posición del actuador a la tarjeta de control de movimiento.
- La tarjeta de control de movimiento todo el tiempo compara las posiciones comandadas y actuales de los sensores de posición para hacer los ajustes necesarios y/o determinar si puede existir un error y al mismo tiempo mantiene actualizada en tiempo real la información correspondiente a cada eje los parámetros de posición, velocidad, par, límites de switch, finales de carrera programados, hacia el control principal del telescopio, ACU.
- La computadora calcula la posición final del hexápodo utilizando la posición final de cada actuador lineal y la envía al ACU.

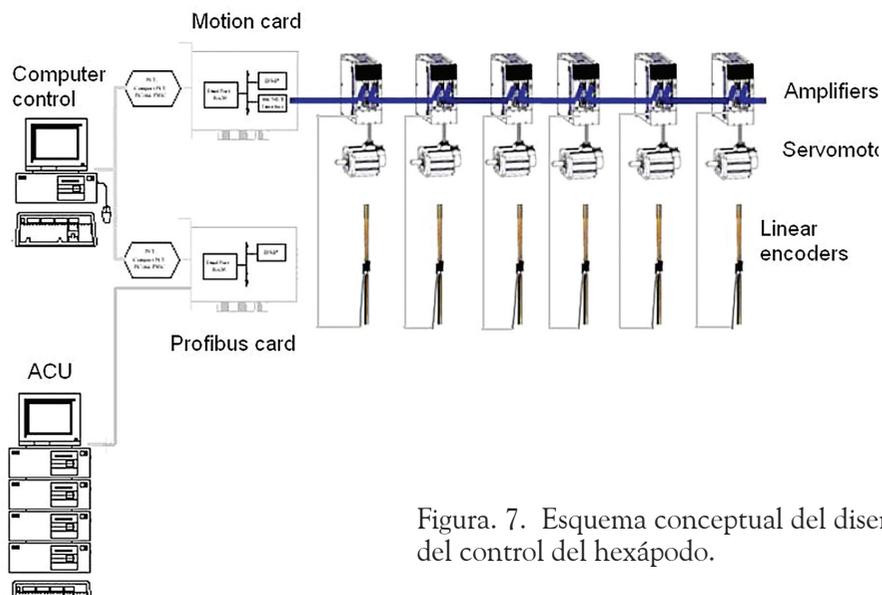


Figura. 7. Esquema conceptual del diseño de comunicación del control del hexápodo.

### Calibración del algoritmo

De acuerdo con las condiciones de operación, a partir de la posición del centróide del espejo y de su orientación, se calcula la longitud (posición relativa) de cada uno de los actuadores, esto se logra a través del cálculo de la cinemática inversa (Delfí, 2005). Por razones de espacio no se incluyó el desarrollo en este trabajo.

El montaje del encoder lineal (Fig. 8) debe cumplir una serie de tolerancias en su ensamble en el actuador lineal para garantizar la medición del desplazamiento dentro de la resolución y la exactitud proporcionada por el proveedor del equipo. El encoder lineal es de tipo incremental óptico con la marca al centro de la escala. Cuenta con 2500 pulsos/mm lo cual permite una

resolución de  $0.4 \mu\text{m/pulso}$ . El lector óptico del encoder lineal envía las señales senoidales a una tarjeta electrónica incorporada al final del cable del mismo donde se encuentran los comparadores para convertir las señales a pulsos cuadrados utilizando el protocolo diferencial RS422. En esta tarjeta se realizan los ajustes de ganancia, fase y simetría de las señales incrementales y de referencia del encoder lineal.

Para asegurar la posición del acuator y siempre tener una referencia, se determinó un método para regresar al origen. En este caso se ha utilizado la señal de referencia que proporciona el mismo encoder lineal lo cual permitirá una variación de  $0.4 \mu\text{m}$  cada vez que se envíe el actuador a la posición de origen (Mc. Carlly, 1991).



Figura. 8. Encoder lineal montado en actuador.

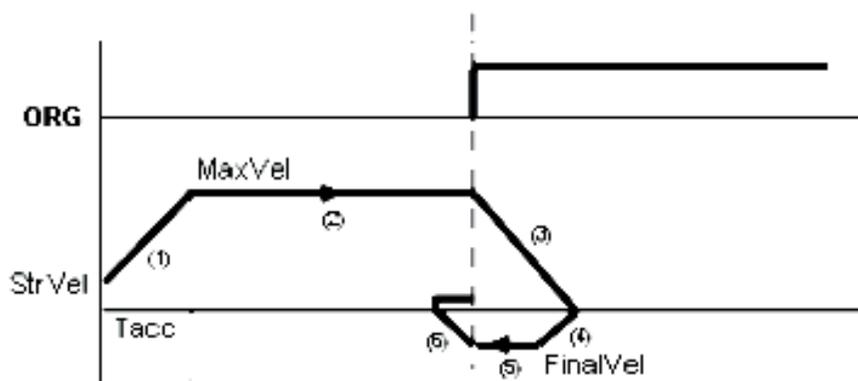


Figura. 9 Método de regreso a origen

Este método garantiza un error de  $0.4\mu\text{m}$  cada vez que se muevan a origen los actuadores lineales debido a la resolución del encoder lineal y a la velocidad final de movimiento, equivalente a un pulso/ciclo de scan de la red SSCNet, para encontrar la señal de la marca. Así, la señal de la marca del encoder lineal es utilizada al equivalente del “proximity dog” con una muy alta precisión para colocar los actuadores lineales en origen.

Para hacer uso de la señal de la marca del encoder lineal como sensor de origen, se tuvo que diseñar una tarjeta de interface para transformar la señal del formato de línea diferencial (RS422) a una señal simple de 15 VDC como entrada a la tarjeta de control de movimiento (Fig. 10).

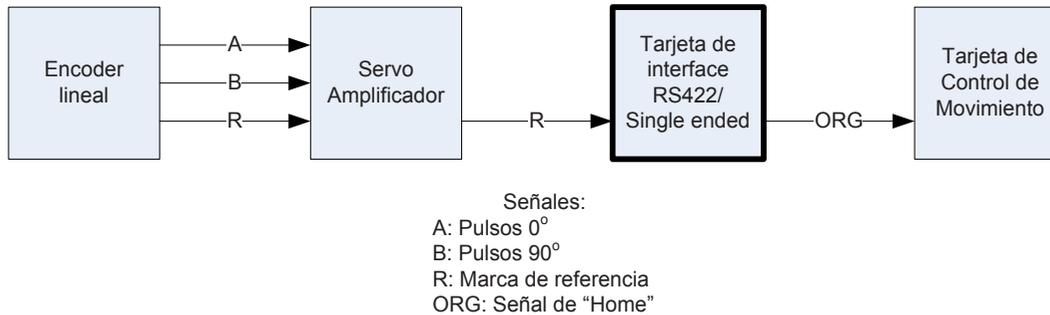


Figura. 10. Diagrama a bloques del circuito de interface para la señal de referencia.

### Medición del desplazamiento del actuador lineal

Una vez determinado el algoritmo de control se corrigieron las funciones de posición de cada actuador, Esta es la parte medular con la que se logró tener un mecanismo de la más alta exactitud posible. Para ello se mapeo la posición de cada actuador se construyeron funciones de corrección que minimizaron el error (Won, *et al.* 2003)

La medición del desplazamiento de cada uno de los actuadores lineales se realiza utilizando un equipo que tenga mayor exactitud que la medición del encoder lineal del actuador. Para ello se ha utilizado un equipo de medición utilizando el principio de interferometría óptica por medio de láser. El equipo utilizado cuenta con una exactitud de  $0.1\mu\text{m}$  y que compensa la medición tomando en cuenta la temperatura del objeto a medir, la temperatura del medio ambiente, la humedad relativa y la presión de aire.

La Fig. 11 muestra la diferencia entre la posición comandada por el control del robot y la posición medida en el laboratorio. La función de corrección debe lograr que el error RMS de cada actuador sea menor a  $2\mu\text{m}$ .

La medición del error muestra un comportamiento particular que puede caracterizarse a través de una función que permita la corrección de la posición final. De acuerdo a las mediciones mostradas en la Fig. 11, éstas pueden ser representadas por la función mostrada en la ecuación 1.

$$e(x) = p(x) + a \cos(\omega_0)(x-x_0) \quad (1)$$

donde:

$$p(x) = b_1x^n + b_2x^{n-1} + \dots + b_nx + b_{n+1} \quad (2)$$

La ecuación 2 es obtenida por el método de regresión lineal utilizando mínimos cuadrados. El periodo de la señal senoidal, de acuerdo a las mediciones del error, corresponde al paso del tornillo del actuador  $5\text{mm/rev}$ , de esta manera, el periodo de la ecuación 1 es:

$$t_0 = 5\text{mm}, \omega_0 = 2\pi/t_0 = 2\pi/5 \quad (3)$$

Así, para colocar la señal senoidal de la ecuación 1 en fase con la señal del error medido se debe realizar un corrimiento en tiempo con  $x_0$ .

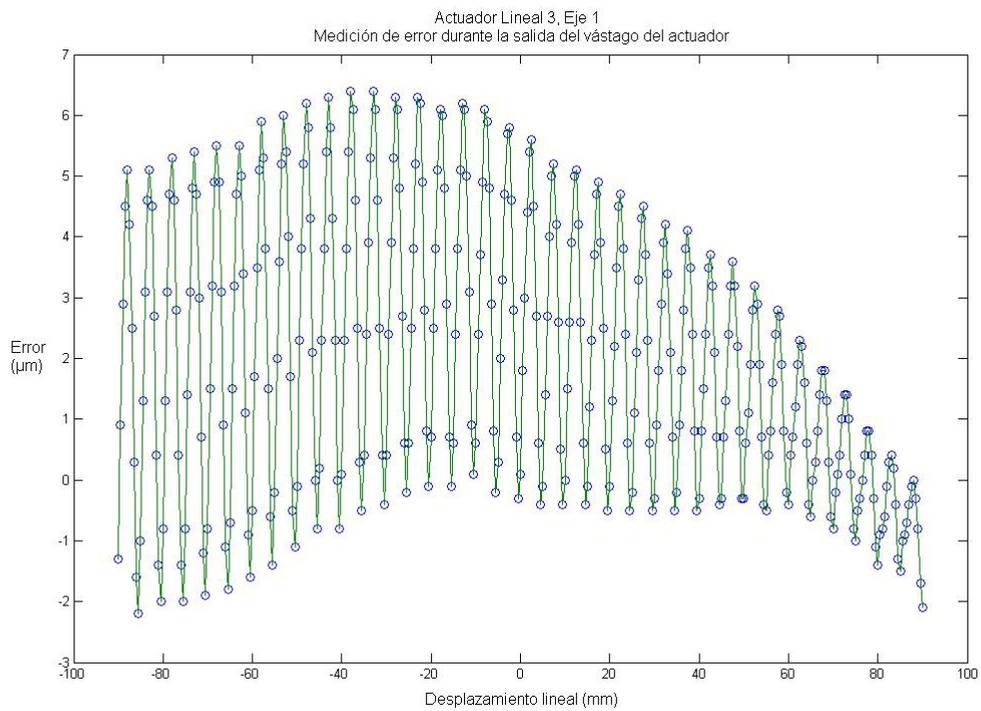


Figura. 11. Medición del error de actuador lineal 3 cuando sale el vástago del actuador.

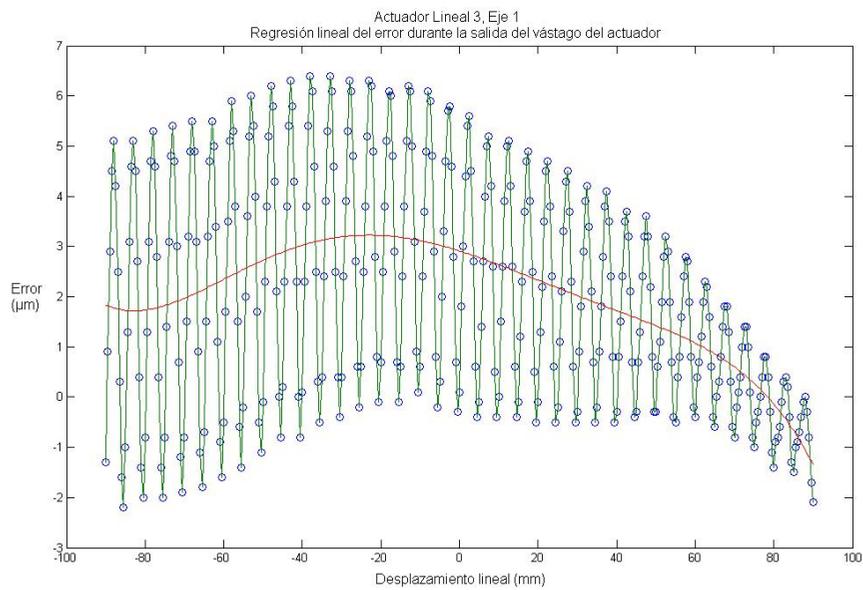


Figura. 12. Aproximación lineal de los datos de la medición del error del actuador lineal 3 durante el recorrido de salida del vástago.

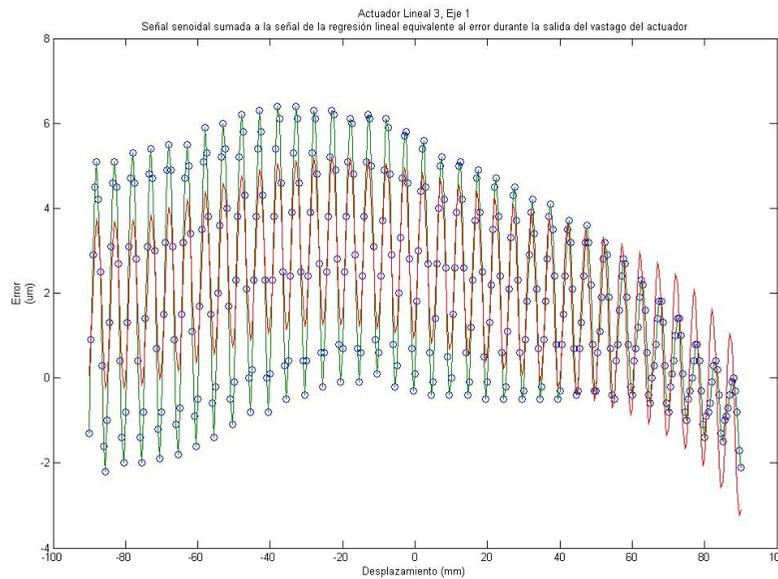


Figura. 13. Aproximación de la función de la medición del error del actuador lineal 3 durante la salida del vástago.

Debido a que el error esta determinado por la ecuación 4,

$$E = \text{Valor medido} - \text{Valor real} \quad (4)$$

se puede realizar la corrección de la posición del actuador lineal utilizando la ecuación 5.

$$y(x) = x - e(x) + c \quad (5)$$

donde  $y(x)$  representa la posición de comando ajustada al amplificador del actuador lineal,  $x$  representa la posición deseada del actuador,  $e(x)$

la función del error (ecuación 1), y  $c$  valor de ajuste de offset.

Se puede representar la ecuación 5 de una manera más práctica:

$$y_{CMD}(pos_x) = pos_x - e(pos_x) + c \quad (6)$$

La Fig. 14 muestra el error final calculado por software utilizando la ecuación de ajuste (ecuación 6).

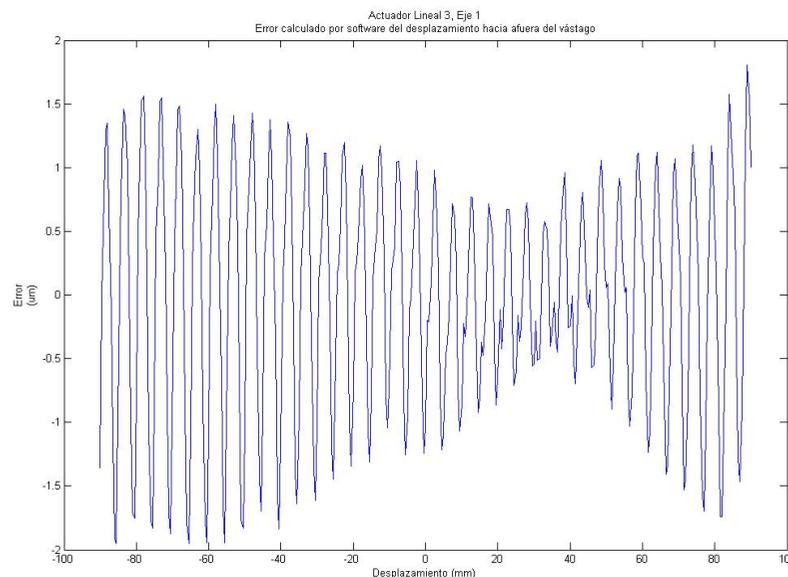


Figura. 14. Error calculado del desplazamiento del actuador lineal 3 cuando sale el vástago una vez implementada la función de corrección del error.

El error RMS esta dado por la ecuación 7:

$$Error_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x^2}{n}} \quad (7)$$

Para las mediciones de la Fig. 13 se calculó el error RMS que representa el equivalente al valor de la desviación estándar de las mediciones.

La gráfica del valor del error rms calculados se muestra en las Fig. 15.

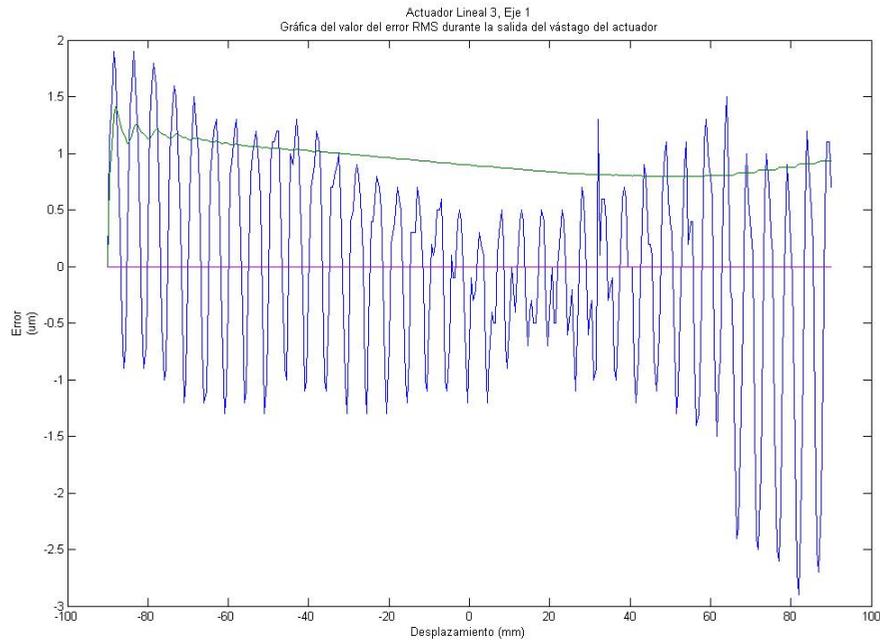


Figura. 15. Error RMS del desplazamiento del vástago corregido durante su salida.

### Conclusiones

El montaje logrado y el ajuste de los parámetros del encoder lineal garantiza la operación confiable de la medición de retroalimentación necesaria para la exactitud requerida de los actuadores lineales de  $2 \mu\text{m}$  RMS.

El ajuste de los parámetros del amplificador de cada servomotor le permitirá un buen desempeño para la velocidad de operación  $1\text{mm/s}$  y la inercia de la carga del sistema de cada actuador lineal, para la cual tomando en cuenta principalmente la inercia del reductor, un valor de 4 veces la inercia del servomotor.

El método de regreso a origen utilizado durante las mediciones ha garantizado un error de  $\pm 0.4 \mu\text{m}$  lo cual permite una buena precisión cada vez que tenga que moverse a origen cada

uno de los actuadores lineales.

Las características de exactitud de este mecanismo y su capacidad de carga lo hacen único, de acuerdo con la información que se tiene, sólo se podría construir un mecanismo similar en dos o tres países desarrollados. La capacidad de este mecanismo cumple con las condiciones especificadas por la empresa alemana que diseñó el Gran Telescopio Milimétrico. Con este mecanismo es posible lograr que el telescopio enfoque la radiación captada por la superficie parabólica y los instrumentos que captan y procesan las señales. Por otro lado, este mecanismo demuestra la capacidad tecnológica mexicana en el diseño y construcción de sistemas mecatrónicos de alta exactitud, capaz de competir a nivel mundial

### **Beneficios**

El primer beneficio es que se desarrollo tecnología de vanguardia en México, evitando que se importara el mecanismo posicionador. La oportunidad de crear este mecanismo, permitió que se formara un grupo interdisciplinario e interinstitucional, con el que se pudieron integrar en un solo sistema: mecanismos de alta exactitud con cero huelgo, un control digital con una arquitectura abierta en la que se combinan controladores especializados, y una computadora en la que se programan los algoritmos de movimiento del robot y los algoritmos de ajuste de la posición individual de cada actuador.

Los beneficios para el usuario del telescopio son múltiples, por un lado contar con un mecanismo que cumple con los requerimientos técnicos, lo que garantiza el correcto enfoque de las radiaciones emitidas por el espacio, por otro lado un proveedor nacional que puede atender en un corto tiempo cualquier problema que presente el mecanismo y la posibilidad de mejorar la tecnología del telescopio.

### **Referencias Bibliográficas**

- Dieck, R. 2005. Measurement Accuracy. CRC Press LLC.
- D. Stewart, 1965. A platform with six degree-of-freedom. In Proc. Inst.Mech. Eng. 180: 371–386.
- Elmas Anli, Huseyin Alp, Sait N. Yurt, Ibrahim Ozkol. 2004. The Stewart Platform Mechanism – A Review. Transactions On Engineering, Computing And Technology V2.
- García-Sanz M., Motilva M. 2003. Herramientas para el estudio de robots de cinemática paralela: Simulador y prototipo experimental. Universidad Pública de Navarra.
- Hüseyin ALP, Elmas ANLI, Sait N. YURT and Hıbrahim Özkol. 2004. Workspace Analysis of the 6-4 Stewart Platform Mechanism. Transactions On Engineering, Computing And Technology V2.
- McCarthy K., 1991. Accuracy in positioning systems. The Motion Control Technology Conference Proceedings, March 19-21.
- Merlet, J. 2000. Parallel Robots. Kluwer Academic.
- P. Schipani, L. Marty. 1997. Stewart platform kinematics and secondary mirror aberration control. INAF - Istituto Nazionale di Astrofisica Osservatorio Astronomico di Capodimonte Salita Moiarriello, 16 - 80131 Napoli – Italy.
- Won Y. Y., Wenwu C., Tae-Sang C., Morris J. 2003. Applied Numerical Methods Using Matlab. Wiley -Interscience.