

Capítulo 6

Desarrollo de nuevas tecnologías

6.1. Introducción

El desarrollo de la astronomía moderna está ligado estrechamente a la innovación tecnológica. El deseo de los astrónomos de entender el universo que nos rodea hace que se requieran detectores de mayor sensibilidad, mayor resolución espectral y mayor resolución angular. A su vez, los avances tecnológicos frecuentemente traen consigo nuevas e inesperadas oportunidades para el desarrollo de la investigación. Por ejemplo, el crecimiento de la radioastronomía se debe en gran parte a la tecnología del radar desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial. En el caso del GTM, para que el telescopio alcance las especificaciones deseadas, se han desarrollado soluciones tecnológicas innovadoras. Asimismo, para resolver los problemas astronómicos expuestos en los capítulos anteriores ha sido indispensable el desarrollo

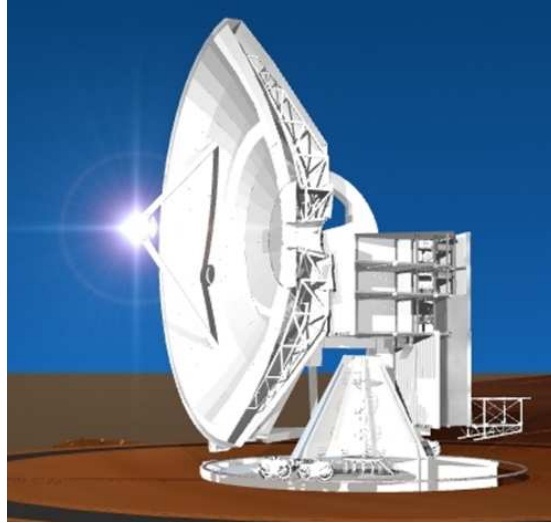


Figura 6.1: Modelo virtual del Gran Telescopio Milimétrico.

de instrumentación con una sensibilidad sin precedentes.

6.2. Superficie activa

En cualquier telescopio es vital que la forma precisa de la óptica, conocida también como la figura, se mantenga en todas las orientaciones del telescopio. Debido a que el reflector primario tiene 50 m de diámetro el requerimiento es extremadamente difícil de alcanzar. El reto se debe a que los efectos de la gravedad, de los cambios térmicos y del viento provocan flexiones en la estructura del telescopio. Para que el telescopio funcione adecuadamente, se requiere que el efecto de las flexiones de la estructura, en la figura de la óptica, se mantenga dentro de un presupuesto de errores total de 75 micras rms, equivalente a $1/20$ de una longitud de onda de 1.5 mm. De este presupuesto

total de errores, 55 micras rms es el error permitido en el reflector primario.

6.2.1. Corrección por efectos gravitacionales

Generalmente, la mayor fuente de error en la superficie reflectora la provocan las flexiones de la estructura de soporte, conforme cambia la orientación, debido a la gravedad. Los primeros diseños de radiotelescopios buscaban una estructura suficientemente rígida para mantener la figura de la superficie, dentro de la fracción necesaria de la longitud de onda de operación. Sin embargo, las flexiones gravitacionales crecen rápidamente con el diámetro del telescopio haciendo este enfoque impráctico para telescopios grandes.

Para resolver este problema Von Hoerner^[1] propuso el uso de un diseño homólogo para radiotelescopios reflectores. En un diseño homólogo la estructura no se optimiza para minimizar las flexiones absolutas. En su lugar, se optimiza para minimizar las flexiones de una parábola ideal. En un sistema homólogo perfecto la forma del reflector siempre es parabólica para cualquier ángulo de elevación, aunque la longitud focal de la parábola puede cambiar. Como los cambios en la longitud focal del reflector primario se pueden corregir reposicionando el secundario, tales flexiones prácticamente no tienen efecto en el desempeño del telescopio. Los telescopios reales no pueden alcanzar una homologación perfecta, pero un diseño apropiado puede reducir los errores en la superficie efectiva por un factor mayor que cinco.

Mientras que por muchos años los telescopios se han diseñado usando el principio de homologación, tal enfoque no es suficiente para el GTM. Las flexiones del espejo primario conforme cambia el ángulo de elevación del cénit



Figura 6.2: Panel de fibra de carbono, una de las opciones para los paneles del GTM.

al horizonte, son del orden de varios milímetros. Aún así las desviaciones respecto al mejor ajuste a la parábola ideal son de algunos cientos de micras rms. Como tales cantidades son mucho mayores que el presupuesto de errores para el reflector primario, se requirió de un nuevo enfoque.

Se diseñó un sistema activo, es decir, un sistema que permite modificar la posición de los paneles individuales, de tal forma que las flexiones se pueden corregir continuamente mediante una computadora. Dicho enfoque permite que la estructura sea optimizada para un peso y una rigidez dada, en lugar de para un homólogo, y hace que el requerimiento de mantener la posición del reflector pase de una estructura pasiva a un sistema de control activo.

La superficie del reflector primario está dividida en 180 segmentos distribuidos en 5 anillos. El primer anillo tiene 12 segmentos, el segundo tiene 24 y los 3 restantes tienen 48 cada uno. En el concepto de la superficie activa del GTM cada segmento está sostenido por cuatro actuadores lineales, uno

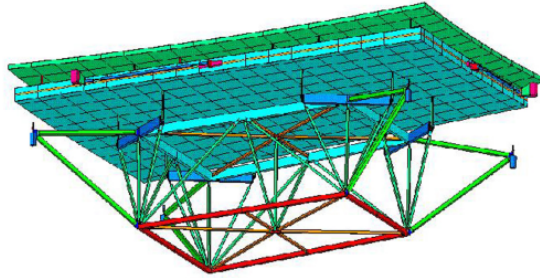


Figura 6.3: Diseño esquemático de un segmento del GMT. La subestructura abierta tiene 4 actuadores para ajustar la orientación del panel.[Cortesía D. Smith, MERLAB/OGTM].

en cada esquina. Debido a la alta precisión requerida en la superficie, no es práctico compartir actuadores entre segmentos. Mientras que lo anterior resulta en un número relativamente grande de actuadores, 720 en total, tiene la ventaja de que la posición de cada segmento se puede controlar individualmente.

En principio, con sólo tres actuadores se puede posicionar un segmento. No obstante, la forma aproximadamente trapezoidal de los segmentos requiere un soporte más uniforme. Se diseñó una estructura de soporte, llamada submarco, que se fija al segmento por medio de los cuatro actuadores. El submarco, a su vez, sostiene la superficie del panel en ocho puntos interiores. El soporte de cuatro puntos también permite ligeros ajustes de alabeo para compensar errores residuales.

El GMT usará una corrección de lazo abierto para mover los actuadores a la posición adecuada, como función del ángulo de elevación. Será el primer telescopio que dependerá de una superficie activa para alcanzar las especificaciones.

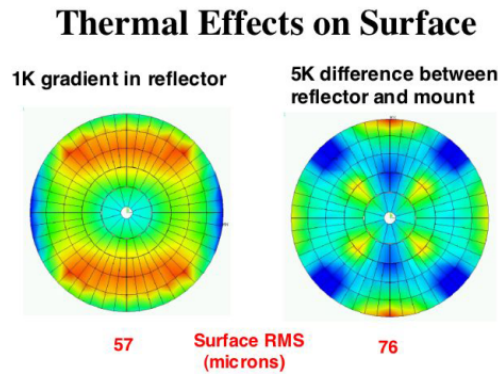


Figura 6.4: Distorsiones térmicas de la superficie del GTM, para dos gradientes de temperatura. [Cortesía de D. Smith, MERLAB/OGTM].

caciones operativas. Como tal, representa una innovación en la tecnología de estructuras inteligentes para telescopios.

6.2.2. Corrección por errores inducidos térmicamente

Otra fuente importante de errores en la superficie del reflector primario, son los efectos térmicos en la estructura de soporte. De manera similar al caso de los errores gravitacionales, los inducidos térmicamente aumentan conforme crece el diámetro del telescopio. El enfoque tradicional para contrarrestar los errores inducidos térmicamente ha sido minimizar las variaciones de temperatura pasivamente. Lo anterior se logra recubriendo la estructura con una pintura altamente reflejante, cubriendo el reflector con un aislante y haciendo circular aire dentro del volumen encerrado.

El GTM hará uso de todas las técnicas tradicionales, pero además, como

el telescopio tendrá una superficie activa, podrá corregir los errores inducidos térmicamente en la superficie. Para lograrlo, se instalarán más de 100 sensores de temperatura en distintas posiciones del reflector. Las lecturas de estos sensores se usarán para calcular los cambios requeridos en la posición de los actuadores y así corregir la figura del reflector, dado el estado térmico de la estructura. En vista de que la constante de tiempo térmica de la estructura es muy grande, se garantiza que tales correcciones serán lentas.

La determinación experimental de las correcciones térmicas es más complicada que en el caso de la carga gravitacional. No obstante, la relación inicial entre cada elemento sensor y la posición del actuador requerido, se calculará a través de un modelo de elemento finitos de la estructura del telescopio. Se espera reducir los errores térmicos por un factor de 2 mediante una corrección de lazo abierto.

6.2.3. Corrección de errores debidos al viento

Cuando el telescopio esté operando, la fuente más importante de errores en el primario será el viento. Este efecto se traduce en un problema de apuntado. El enfoque tradicional para alcanzar la precisión de la superficie bajo las cargas del viento depende de la rigidez de la estructura. Los análisis indican que la precisión de la superficie del GTM se puede mantener dentro del presupuesto de errores sin corrección adicional. Por otro lado, como se tiene una superficie activa, en principio, es posible hacer correcciones para la componente estacionaria del viento.

6.3. Apuntado del telescopio

El problema más difícil en el diseño y operación del Gran Telescopio Milimétrico será alcanzar la precisión requerida en el apuntado. El diámetro del haz del telescopio a 250 GHz es de 6 seg de arco, por lo que la especificación en la precisión del apuntado es de 1 seg de arco, con la meta 0.6 seg de arco. Se trata de un requerimiento difícil de alcanzar porque la gran área colectora del telescopio, de alrededor de 2000 m², hace las veces de una vela de cara a los vientos incidentes, provocando que el telescopio sea más susceptible a errores de apuntado. Por otro lado, la frecuencia natural de la estructura es baja, lo que dificulta mantenerla en la posición deseada en presencia de cargas de viento.

Para alcanzar un buen apuntado se deben medir y compensar los errores de apuntado repetibles y estáticos usando un modelo, que se construye a partir de una tabla de errores. La tabla se genera siguiendo una fuente astronómica y comparando continuamente la posición del telescopio con la posición deseada. Los datos resultantes se ajustan a un modelo, que aplica una corrección adecuada en cada posición. No obstante, se espera que los errores residuales, después de aplicar el modelo de apuntado global, aún sean mayores que el presupuesto de errores total, debido a la resolución limitada de los datos del modelo, así como a las variaciones en las condiciones ambientales durante las medidas de apuntado.

El modelo de apuntado básico será complementado con un procedimiento estándar de verificación local. Tales correcciones requieren usar una fuente

de apuntado cercana para hacer una corrección adicional, antes de mover el telescopio a la posición deseada. La gran área colectora del GTM, y de ahí su gran sensibilidad, garantizan que se encontrarán fuentes de apuntado locales. Las correcciones adicionales contribuyen además a eliminar la mayoría de los errores de apuntado inducidos térmicamente.

Para extender el tiempo requerido entre dos verificaciones de apuntado el diseño incluye una red de varios cientos de sensores de temperatura, que forman parte del sistema de compensación flexible. Los sensores realizan un seguimiento de la temperatura de la plataforma de rotación, o alidada, y de las patas del cuadrupodo, para llevar a cabo el cálculo de la deformación de la estructura. Inicialmente, las correcciones serán comparadas con las predicciones del modelo de elementos finitos. A largo plazo, se desarrollará una tabla de error que correlacionará las lecturas de los sensores de temperatura con las correcciones de apuntado.

Las deformaciones estructurales son más difíciles de corregir porque no hay una medida directa del error. Para corregir tales deformaciones, además de los sensores de temperatura, el sistema de compensación incluye inclinómetros biaxiales en cada balero de elevación, un telescopio óptico cerca del reflector primario y un sistema adicional de seguimiento directo de la posición del reflector secundario, basado en un láser. El objetivo es combinar la información de todos los sensores para generar correcciones adicionales en tiempo real, cuando ocurran cargas de viento. Los sensores permitirán un seguimiento directo y una comparación con los errores de posición en el cielo y aquellos predichos por el sistema de compensación. Se espera que, con el tiempo, el

nivel de corrección aumente.

Mantener los codificadores dentro de la precisión requerida exige que el desempeño del sistema de control sea mucho mejor que el de los controladores de telescopios estándares. El sistema de control del GTM^[2] ha aplicado varias de las técnicas más avanzadas, desarrolladas por el grupo de control del proyecto Red Espacial Profunda (DSN) del JPL. Los experimentos en las antenas del DSN han mostrado la factibilidad de usar controladores basados en modelos. Las simulaciones indican que los errores medidos en los codificadores se pueden corregir hasta una fracción de segundo de arco aún en el caso de ráfagas de viento.

6.4. El sistema de control y seguimiento

Los telescopios modernos son sistemas distribuidos complejos que consisten en dispositivos e instrumentos que deben ser controlados en un esquema coordinado para realizar tareas científicas, como es la adquisición de datos astronómicos. Se debe, por lo tanto, dar seguimiento en tiempo real al estado de todos los dispositivos. Para el GTM se ha diseñado un sistema de programación generado automáticamente. El sistema se ha beneficiado de los avances en la tecnología de la computación para el desarrollo de los programas de control e integración de dispositivos nuevos.

6.4.1. Enfoque general

El enfoque tradicional para crear un sistema de control y seguimiento ha sido desarrollar controladores de dispositivos individuales y después ponerlos

en un sistema de cliente/servidor para llegar a la coordinación deseada. Los problemas en este enfoque son la complejidad y la inflexibilidad. Los protocolos de comunicación deben ejecutarse, mejorarse y las adiciones requieren modificaciones del código e incluso cambios en el diseño.

El GTM, ha automatizado la creación de un esquema de control y seguimiento describiendo las componentes del sistema en Lenguaje Extensible (XML)¹ y después generando *automáticamente* el código fuente para clases base extensibles e interfaces de usuarios. El diseño del sistema de control y seguimiento es flexible y adaptable.

Para simplificar el mecanismo de coordinación de los diferentes subsistemas, se ha empleado un sistema de estado global en el modelo de comunicación. Un solo objeto de estado global, que contiene referencias a todas las componentes del sistema, se describe en XML, y el código fuente correspondiente se crea automáticamente para acceder a objetos de estado global. El uso de XML en astronomía se inició en los trabajos realizados en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA^[3]

6.4.2. Diseño orientado a objetos y automatización

El GTM consiste de un gran número de sistemas complejos de control: el servo sistema de los ejes principales, con 16 motores en acimut y 4 motores en elevación; el posicionador del reflector secundario; los 720 actuadores de los paneles de la superficie activa y la óptica del terciario. Además, el GTM

¹World Wide Web Consortium (2002), Extensible Markup Language, <http://www.w3c.org/XML>

tiene instrumentos científicos como los receptores, los espectrómetros y los sistemas de adquisición de datos.

Ya que los sistemas de los telescopios están naturalmente restringidos al mundo de los objetos reales, un diseño orientado a los objetos para el sistema de control y seguimiento se sigue naturalmente. Cada subsistema se puede definir como un objeto de programación con atributos que describen las propiedades de los objetos reales y los métodos que alteran el estado de estos atributos.

XML genera la automatización deseada por medio de un conjunto de reglas para estructurar los datos, tales como una hoja de cálculo, direcciones y parámetros de configuración. Esto simplifica las tareas de la computadora de generar y leer datos así como asegurar que la estructura de los datos no sea ambigua. Las propiedades de cada subsistema del telescopio se especifican en un archivo de configuración XML. Cada uno de estos archivos describe una clase, que incluye tipos de campo y métodos de acceso. Dichos archivos son procesados para generar automáticamente clases base extensibles, métodos de comunicación en C⁺⁺ y Java, y definiciones en el lenguaje de definiciones de interfaz (IDL) para generar códigos de comunicación en la arquitectura de objetos comunes CORBA². Se trata de una arquitectura e infraestructura asociada que las aplicaciones de computadora usan para trabajar en red. Usando los protocolos estándar IIOP, un programa basado en CORBA de cualquier proveedor, en casi cualquier computadora, sistema operativo, lenguaje de programación y red, puede inter-operar con otro programa basado

²Object Management Group, (2002). CORBA, <http://www.corba.org>.

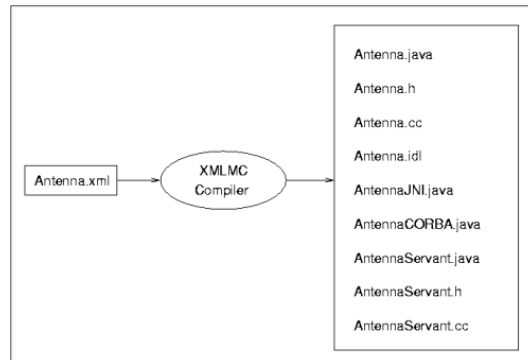


Figura 6.5: Diagrama de flujo del compilador de control y seguimiento del GTM.

en CORBA del mismo o de otro proveedor, en casi cualquier computadora, sistema operativo, lenguaje de computación y red.

El compilador de control y seguimiento XML del GTM es una herramienta de programación tal, que dado un conjunto de archivos de configuración, crea clases base extensibles e interfaces de usuarios, formando un marco de trabajo para el control y seguimiento. El compilador procesa los archivos de configuración y genera clases base en Java, C⁺⁺, la interfaz nativa de Java (JNI) y CORBA. Java es el lenguaje que se usará para las interfaces con los usuarios.

En resumen, las clases base en Java se usan para manejar la interfaz de usuario en Java y las clases base en C⁺⁺ controlan los manejadores de dispositivos de sistemas de tiempo real y los controladores. Las clases JNI permiten la comunicación entre las clases en Java y las clases en C⁺⁺ en el área de red local. Las clases CORBA permiten la comunicación entre las clases en Java y C⁺⁺ entre computadoras. Además, el compilador crea un

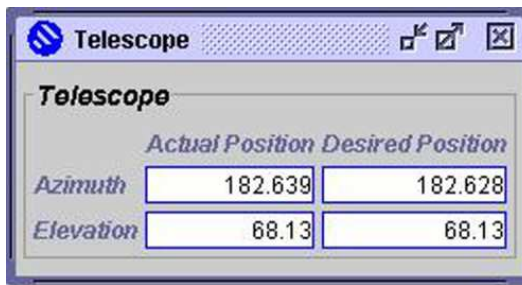


Figura 6.6: Una muestra del menú de control del GTM en la pantalla de la computadora.

solo objeto en Java y C⁺⁺ que contiene referencias a todos los elementos del sistema para realizar un estado del sistema global.

Para garantizar una apariencia consistente del sistema de control y seguimiento del telescopio, se usa un conjunto de archivos de configuración para describir la interfaz de usuario y la salida de los paneles de control y seguimiento.

6.4.3. Sistema de estados globales

Se usa para facilitar el acceso entre las componentes de distintos sistemas y simplificar el protocolo de comunicación. Cada subsistema declara su estado en el sistema global y de ahí toma el estado de otro subsistema. Un controlador del secuenciador de estados finitos coordina las actividades entre los diferentes subsistemas a través del mismo sistema global. El único requerimiento para hacer este enfoque factible consiste en que para cada elemento del sistema global sólo puede existir un escritor. Esto asegura que dos o más procesos no pueden inscribirse simultáneamente o actualizar un elemento da-

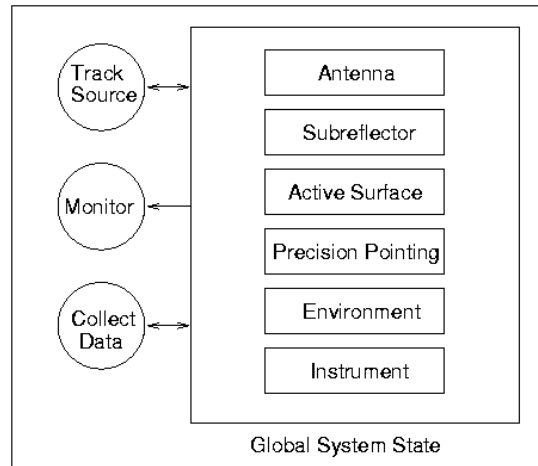


Figura 6.7: Enfoque de estados globales.

do. Por otro lado, un número ilimitado de lectores puede acceder al mismo elemento del sistema global.

En un sistema de computación distribuido, como es el caso del GTM, se usa un esquema de memoria compartida replicada. Se instalan tarjetas de memoria individual en cada sistema y se interconectan usando una conexión de fibra óptica. Todo lo escrito en una de las memorias se manda instantáneamente a todas las tarjetas de memoria replicada de la red. Cuando no hay acceso directo a la memoria compartida, como en el caso de las observaciones remotas, se usa un servidor CORBA para tener acceso a la memoria.

Elegir el ambiente computacional idóneo para el GTM fue una tarea difícil. La elección final fue usar un sistema de anfitrión/objetivo: una estación de trabajo corriendo en Solaris y una poderosa computadora personal Motorola basada en el canal de datos VME, embebida en un sistema ope-

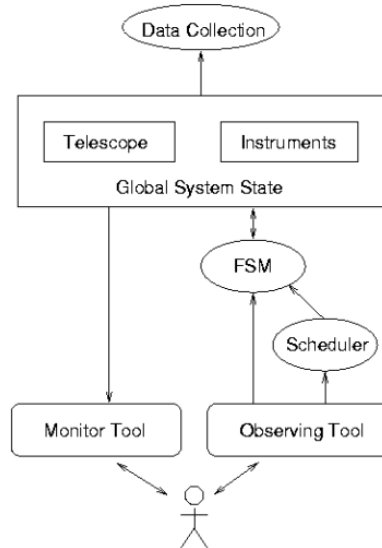


Figura 6.8: Diagrama de bloques del sistema de control y seguimiento.

rativo VxWorks, que es el líder en sistemas operativos de tiempo real. Tal elección ofrece la ventaja de disponer de una conversión directa entre Unix y VxWorks así como una gran disponibilidad de manejadores de dispositivos en ese ambiente.

6.4.4. Sistema de control y seguimiento del GTM

El sistema descrito hasta ahora se ha usado para construir el sistema de control y seguimiento del telescopio. Dicho sistema está compuesto de varios módulos que incluyen herramientas de observación y seguimiento, un controlador del secuenciador de estados finitos y un calendario, entre otros.

Las herramientas de observación permiten al usuario diseñar programas de observación. Tales programas se pueden ejecutar en línea o se pueden en-

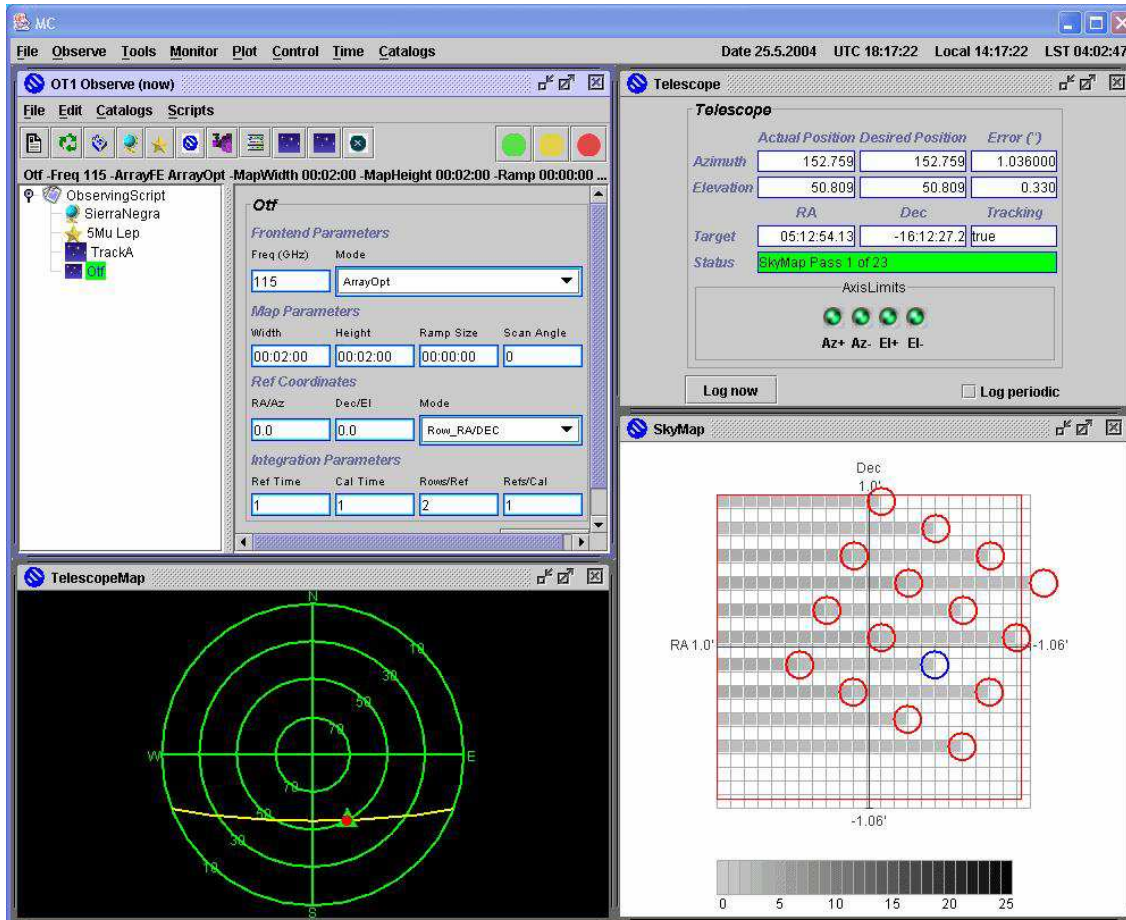


Figura 6.9: Interfaz del usuario en el sistema de control y seguimiento del GTM.

viar a un agendador para una ejecución óptima. También se puede salvar o cargar un archivo y se puede editar manualmente usando un editor de textos. Cada programa de observación debe contener las restricciones del tiempo de observación, las posiciones del objeto, el receptor, el instrumento y el método de observación. Las herramientas de observación generan comandos para controlar los diferentes subsistemas basados en el programa de observación. También se pueden usar para generar comandos de una manera más interactiva con propósitos tanto científicos como de ingeniería.

Las herramientas de observación pueden, asimismo, ejecutar funciones tales como apuntar a una fuente, desplazarse teniendo como referencia la fuente, controlar los radiómetros, modificar el modo de observación y el tiempo de integración. También dan acceso a funciones de ingeniería como el control de la antena, del reflector secundario, del terciario y de los instrumentos. Se dispone de otros recursos para el usuario tales como catálogos de objetos en línea, condiciones meteorológicas, ayuda, mapas de configuración y una estimación de los tiempos adicionales, requeridos para llevar a cabo la tarea principal. Un controlador del secuenciador de estados finitos traduce los programas de observación en estados del telescopio y de los instrumentos. Ejecuta cada comando mientras le da seguimiento al estado de error del sistema.

Las herramientas de seguimiento se usan para ver el estado del sistema en tiempo real mientras se ejecutan los comandos de observación y se adquieren los datos científicos y de ingeniería. Su función es ejecutar una verificación de la integridad de los datos y de la operación adecuada del sistema, desplegando el estado del sistema al usuario. La información puede incluir, por ejemplo,

el estado de observación indicando la etapa en curso, el tiempo transcurrido y el tiempo restante. También indica el estado del telescopio: posición y temperatura, entre otros parámetros. Incluye además el estado del instrumento, como es la configuración, el ancho de banda y la tasa de muestreo. Asimismo, reporta el estado del modelo de apuntado, el estado de la superficie activa, el estado del subreflector, las condiciones meteorológicas, las señales de error y las bitácoras.

6.4.5. Adaptación a telescopios existentes

Como preparación al lanzamiento del sistema de control y seguimiento del GTM, se han construido, y en algunos casos actualizado, diversos sistemas para probar su arquitectura. Los resultados han demostrado la adaptabilidad y reusabilidad del sistema. Como una primera aproximación para verificar la operación del sistema, se desarrolló un simulador del telescopio que reproduce el comportamiento del telescopio real y de los instrumentos. Disponer de un simulador permite, además, enseñar el funcionamiento del sistema a los futuros usuarios.

Los programas y toda la electrónica Sun-Solaris/VME-PC se han instalado para uso regular en el Arreglo de Telescopios Infrarrojo IOTA, ubicado en Mount Hopkins, Arizona, y en el telescopio de 14 m del FCRAO en UMass Amherst. El sistema está funcionando exitosamente en dichos telescopios.

6.5. La máquina de medición por coordenadas

Con el apoyo del proyecto GTM, el INAOE ha construido una máquina de medición por coordenadas (MMC), para llevar a cabo metrología dimensional de piezas de gran tamaño, como son los paneles del telescopio y el reflector secundario. Se trata de una máquina de pórtico: un puente deslizante de 8.5 m de largo está sostenido, en cada extremo, por dos rieles paralelos de 10 m de longitud. Una plataforma deslizante horizontal se mueve a lo largo del puente. El movimiento combinado del puente y la plataforma permite posicionar un palpador en un plano horizontal X-Y. El movimiento del palpador en la dirección vertical (Z), lo provee un pilar deslizante que es soportado por la plataforma. El movimiento de la máquina se efectúa mediante un mecanismo de corona y piñón con precargas activas, que se aplican vía motores de corriente directa, acoplados en pares. El puente y el husillo usan cuatro motores cada uno, mientras que la sección vertical usa sólo dos motores. El control de la máquina usa códigos G, que son estándares en las máquinas de control numérico, provistos por la computadora de control que corre bajo el sistema operativo Hard en tiempo real.

El volumen de medida de la MMC es de aproximadamente de 5 m×6 m horizontales por 4 m verticales. El peso máximo del objeto de prueba es de 30 toneladas. La posición aproximada de la máquina se puede obtener vía codificadores rotatorios en cada motor. No obstante, la operación normal de la máquina usa tres transductores de desplazamiento, lineales y ortogonales, que



Figura 6.10: La máquina de medición por coordenadas en el INAOE.

son interferómetros ópticos, para obtener la posición de la cabeza medidora con una resolución de submicras.

La MMC cuenta con diversos palpadores para llevar a cabo las medidas. El de desplazamiento lineal permite hacer medidas de hasta 100 mm, en la dirección vertical, cuando está instalada en la cabeza posicionadora. Se usa para un barrido continuo de la superficie, con la punta en contacto permanente con la superficie. La información de las coordenadas de los tres interferómetros (X,Y,Z) y del palpador Z se combinan en intervalos de tiempo programables, mientras se hace el barrido sobre la superficie de prueba. El barrido continuo es ideal para medir superficies ópticas grandes como los espejos de un telescopio, donde la figura de la superficie es generalmente más

importante que cualquier detalle de construcción.

También se cuenta con un palpador convencional tridimensional, que se usa cuando los objetos no requieren medidas continuas, es decir, cuando se quieren localizar los rasgos característicos de la pieza de trabajo, o cuando el barrido continuo pueda dañar la superficie.

Todas las medidas de prueba se han hecho en modo continuo usando el palpador de desplazamiento lineal. El contacto continuo con la superficie de prueba y el registro de los datos resultan en un error de hasta 20 micras rms, para todas las superficies medidas, excepto superficies de vidrio pulido. También se han llevado a cabo medidas con palpadores de disparo. El uso de este tipo de palpadores ha facilitado la comparación con otras máquinas MMC y ha ofrecido la ventaja adicional de que el error típico ha disminuido hasta 12 micras.

La MMC fue diseñada y construida completamente por personal y estudiantes de posgrado del INAOE. Como resultado, se ha desarrollado un conocimiento básico de metrología de gran escala. Asimismo, ha representado una oportunidad para entrenar estudiantes de posgrado e ingenieros de alto nivel. La máquina hace uso de conceptos estándares de ingeniería. No obstante, el volumen tan grande ha requerido el desarrollo de técnicas novedosas especializadas para su caracterización y calibración. La MMC empezó a operar en el 2003 y ha estado bajo un programa de mejoramiento continuo que la ha transformado en un proyecto de investigación e ingeniería del INAOE. En México, el acceso a máquinas de medición por coordenadas

está limitado a unos cuantos instrumentos de tamaño pequeño a intermedio. Se espera que la MMC ayude a cubrir la demanda de medidas precisas de las dimensiones de piezas grandes.

En el campus del INAOE se construyó un laboratorio especial para albergar la MMC, que también alberga la gran máquina de pulido del INAOE. La máquina de pulido puede rectificar y pulir los moldes del reflector secundario que usan materiales compuestos, como la fibra de carbono, o bien puede tallar tejos de espejos de hasta 8 m de diámetro. El sistema de aire acondicionado del laboratorio en combinación con el aislamiento térmico del edificio mantienen las variaciones de temperatura dentro de 1°C pico a pico.

6.6. Desarrollo de instrumentos

Entre los avances tecnológicos más innovadores propiciados por el GTM se encuentra el desarrollo de sistemas receptores de frontera. Los instrumentos astronómicos son sistemas únicos construidos especialmente para cubrir una necesidad específica de investigación. Debido a que el objetivo principal es la recepción y medida de señales extremadamente débiles provenientes, por ejemplo, de galaxias que se formaron en el Universo temprano, se requiere el desarrollo de nuevas tecnologías mediante la interacción de especialistas en distintos campos de la física e ingeniería. Muchas veces dichos desarrollos han llevado a la creación de empresas que utilizan las nuevas tecnologías con propósitos comerciales, contribuyendo de esta manera, al beneficio de la sociedad.

Tanto el INAOE como UMass Amherst tiene grupos de científicos instrumentistas. El proyecto GTM ha sido muy exitoso en la fabricación de sistemas de receptores extremadamente sensibles. Algunos de ellos ya están funcionando en el telescopio de 14 m del FCRAO. Los instrumentos desarrollados y planeados para el GTM se describen en el siguiente capítulo.

Referencias

- [1] Von Hoerner, S. (1967), “Design of Large Steerable Antennas”, *Astron. J.*, 72, 35.
- [2] Gawronski, W. y Souccar, K. (2004), “Control System of the Large Millimeter Telescope”, *Proc. SPIE*, 5495, 104.
- [3] Ames, T. et al. 2000, “Using XML and Java for Telescope and Instrumentation Control”, *Proc. SPIE*, 4009, 2.

