



**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Reporte técnico No. **681**

Coordinación de Astrofísica

Título:

Procedimiento para realizar la alineación de la
superficie reflectora primaria del Gran Telescopio
Milimétrico “Alfonso Serrano”

Realizado por:

Dra. Raquel Díaz Hernández
Ing. Nohemí Sánchez Medel

Diciembre de 2022

© **INAOE 2022**

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias de este reporte
técnico en su totalidad o en partes mencionando
la fuente. Santa María Tonantzintla Puebla, México.



**Procedimiento para realizar la alineación
de la superficie reflectora primaria del
Gran Telescopio Milimétrico
“Alfonso Serrano”**

Raquel Díaz Hernández, Nohemí Sánchez Medel
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,
Luis Enrique Erro 1, Sta. Ma. Tonantzintla,
72840, Puebla, México
E-mails: raqueld@inaoep.mx, sanchezn@inaoep.mx

RESUMEN

El Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”, es un proyecto de colaboración binacional entre Estados Unidos y México. Las instituciones que representan la colaboración son, por E.U., la Universidad de Massachusetts y por México el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). El proyecto ha contemplado el diseño, construcción y operación del radio telescopio de 50 metros de diámetro con su superficie primaria segmentada. El rango de longitudes de onda de operación es de 1.1 a 4 mm; se estima que ya concluido, el GTM tiene un error total en su superficie de 70µm proporcionándole una eficiencia del 45% a 1.2 mm y 70% a 3 mm.

La superficie reflectora primaria de 50m está constituida por 180 segmentos distribuidos en 5 anillos concéntricos. Cada segmento consta de 8 subpaneles de níquel electroformado fabricados por Media Lario Technologies (y son similares en su construcción a los paneles construidos por Media Lario Technologies para las antenas del telescopio ALMA). Los subpaneles están unidos y alineados a una estructura de soporte para producir un segmento individual de la superficie. Estos segmentos se conectan y se alinean a la estructura del telescopio, por medio de actuadores, para proveer al GTM de una superficie reflectora primaria parabólica y activa. Las correcciones de la superficie activa continuamente compensan las deformaciones gravitacionales en elevación de la antena. Para llevar a cabo las primeras pruebas astronómicas y la primera temporada de observaciones de ciencia temprana (ES1) en la primavera de 2013, la superficie primaria se ajustó a una elevación de 61 grados usando medidas de holografía de satélites geoestacionarios a 12 GHz. La superficie activa se instaló en el otoño de 2013, brindando la oportunidad de realizar observaciones con una ganancia óptima y constante a elevaciones entre 20 y 85 grados. En el 2017 se alinearon y caracterizaron los 50 m de la superficie primaria activa.

Palabras clave: Superficie reflectora primaria, alineación, mediciones milimétricas.

ABSTRACT

The Alfonso Serrano Large Millimeter Telescope is a binational collaboration project between the United States and Mexico. The institutions that represent the collaboration are, for the US, the University of Massachusetts and for Mexico the National Institute of Optical and Electronic Astrophysics (INAOE). The project has contemplated the design, construction and operation of the 50 meter diameter radio telescope with its primary segmented surface. The operating wavelength range is 1.1 to 4 mm; It is estimated that already completed, the GTM has a total error on its surface of 70 μ m, providing an efficiency of 45% at 1.2 mm and 70% at 3 mm.

The 50m primary reflective surface is made up of 180 segments distributed in 5 concentric rings. Each segment consists of 8 electroformed nickel sub-panels made by Media Lario Technologies (and are similar in construction to the panels built by Media Lario Technologies for the ALMA telescope antennas). The sub-panels are attached and aligned to a support structure to produce an individual segment of the surface. These segments are connected and aligned to the telescope structure, by means of actuators, to provide the GTM with an active parabolic primary reflecting surface.

Corrections of the active surface continuously compensate for gravitational deformations in elevation of the antenna. To conduct the first astronomical tests and the first season of early science observations (ES1) in spring 2013, the primary surface was adjusted to an elevation of 61 degrees using holography measurements from 12 GHz geostationary satellites. The surface activa was installed in the fall of 2013, providing the opportunity to make constant optimal gain observations at elevations between 20 and 85 degrees. In 2017, the 50 m of the active primary surface were aligned and characterized.

Keywords: Primary reflective surface, alignment, millimeter measurements.

Contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1. OBJETIVOS	5
1.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. SUPERFICIE REFLECTORA PRIMARIA.....	6
3. ¿PORQUÉ SE DEBEN ALINEAR LOS PANELES?	7
4. R.M.S.....	8
5. MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS (MMC).....	8
6. FUNCIONAMIENTO.....	8
7. APLICACIONES	9
8. LA MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS DEL INAOE.....	9
9. COMPONENTES.....	13
10. DATOS TÉCNICOS.....	14
11. CONTROL ELECTRÓNICO	15
12. PALPADORES.....	16
13. PROCESO DE ALINEACIÓN DE LA SUPERFICIE REFLECTORA PRIMARIA.....	18
14. COMPOSICIÓN DE UN PANEL	19
15. ENCENDER EL EQUIPO.....	22
16. PROCEDIMIENTO PARA ALINEAR LA SUPERFICIE REFLECTORA PRIMARIA DEL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO “ALFONSO SERRANO”	25
17. INGRESO DEL SEGMENTO (PANEL) AL ÁREA DE MEDICIÓN.....	27
18. MEDICIÓN.....	29
19. AJUSTES	29
20. LIBERACIÓN Y ENTREGA DEL PANEL MEDIDO	34
CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Alinear los segmentos (paneles) que forman la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”, mediante una máquina de medición por coordenadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener la mejor calidad en la alineación de la superficie reflectora primaria mediante una máquina de medición por coordenadas.

- Lograr uniformidad en el proceso de ajuste de los segmentos que forman la superficie reflectora primaria del GTM, para lograr una superficie óptima.

- Satisfacer las necesidades metrológicas que requiere el GTM, realizando mediciones a objetos tales como herramientas de pulido, espejos secundarios y moldes de fibra de carbono o de acero, etcétera.

2. SUPERFICIE REFLECTORA PRIMARIA

La superficie reflectora primaria de 50 m está constituida por 180 segmentos distribuidos en 5 anillos concéntricos. Actualmente se tienen 84 segmentos instalados en los tres anillos interiores, proporcionando una apertura de 32.5 m de diámetro. Cada segmento consta de 8 subpaneles de níquel electroformado fabricados por Media Lario Technologies (y son similares en su construcción a los paneles construidos por Media Lario Technologies para las antenas de ALMA). Los subpaneles están unidos y alineados a una estructura de soporte para producir un segmento individual de la superficie. Estos segmentos se conectan y se alinean a la estructura del telescopio, por medio de actuadores, para proveer al gtm de una superficie reflectora primaria parabólica y activa. Las correcciones de la superficie activa continuamente compensan las deformaciones gravitacionales en elevación de la antena. Para llevar a cabo las primeras pruebas astronómicas y la primera temporada de observaciones de ciencia temprana (ES1) en la primavera de 2013, la superficie primaria se ajustó a una elevación de 61 grados usando medidas de holografía de satélites geoestacionarios a 12 GHz. La superficie activa se instaló en el otoño de 2013, brindando la oportunidad de realizar observaciones con una ganancia óptima y constante a elevaciones entre 20 y 85 grados de elevación. En el 2017 se completarán, alinearán y caracterizarán los 50m de la superficie primaria activa [7].

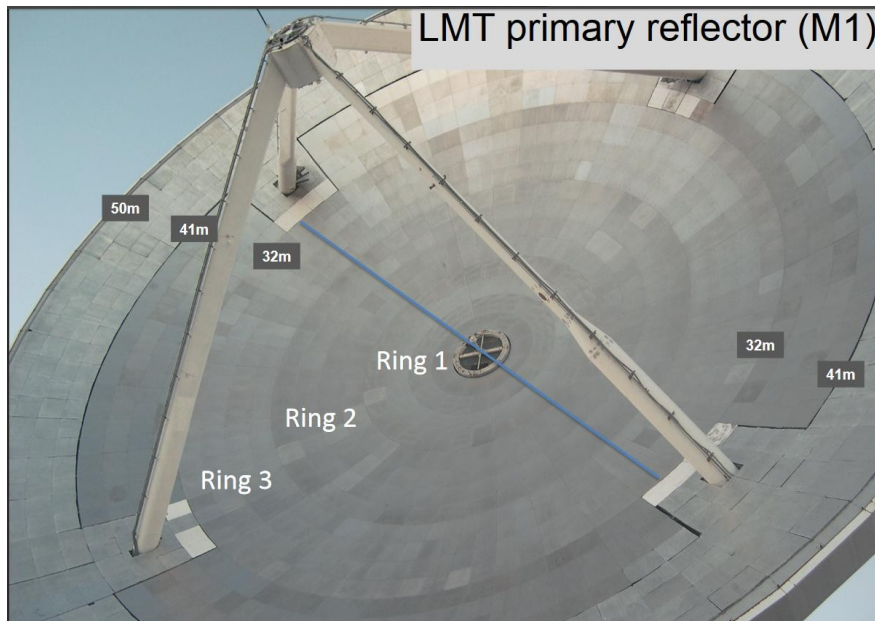


FIGURA 1. Superficie Reflectora Primaria (modificado de [7])

3. ¿PORQUÉ SE DEBEN ALINEAR LOS PANELES?

Los paneles que forman la antena del gran telescopio milimétrico deben ser alineados porque debemos eliminar el error de inclinación de la superficie. Si la superficie no tiene una perfecta alineación, los segmentos individuales no pueden producir la parabólica que se necesita para reflejar la radiación.

El reducir el rango de inclinación alineando las diferencias de nivel, nos permitirá un mejor apuntado de cada uno de los segmentos, y así podremos mantener la superficie simétrica con el fin de obtener una excelente imagen astronómica y evitar deformaciones en todas nuestras imágenes.

Superficie activa

Con las campañas de alineación y ajuste se ha logrado una precisión de los segmentos en un rango de 20-35 micras; adicionalmente, se han medido y corregido los espejos secundario y terciario con el mismo objetivo. Para llevar a cabo las mediciones de estos componentes, el proyecto hizo uso de una MMC construida y equipada en las instalaciones del INAOE por investigadores y personal del instituto.

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.

4. R.M.S.

El rms es la media cuadrática, valor cuadrático medio (del inglés root meansquare) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Puede calcularse para una serie de valores discretos o para una función matemática de variable continua. El nombre deriva del hecho de que es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores.

A veces la variable toma valores positivos y negativos, como ocurre, por ejemplo, en los errores de medida. Como en nuestro caso requerimos de valores tanto positivos como negativos para hacer los ajustes, utilizamos esta fórmula.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

5. MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS (MMC)

Una máquina de medición por coordenadas (MMC), es un equipo electrónico de medición directa en el que el instrumento recorre el objeto que se desea medir y mediante una toma de datos y su procesamiento con un software especializado se obtienen las dimensiones del objeto en cuestión.

6. FUNCIONAMIENTO

Para realizar la medición se fija el objeto a medir. Para la medición la MMC recorre el objeto con un captador o palpador de gran precisión con amplificación electrónica, que hace que desaparezcan los errores por la inercia o rozamiento que aparecen en los sistemas de amplificación mecánico.

El palpador se puede desplazar sobre unas guías en direcciones ortogonales. Esta máquina toma como datos los puntos que el operario toque con el palpador y los

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

guarda en una memoria para su posterior procesamiento. El posicionamiento del palpador no se hace directamente, sino que se utiliza un amplificador de imagen que incorpora el palpador para que tenga una mayor exactitud al seleccionar los puntos.

Una vez que se tienen las coordenadas de todos los puntos de interés, mediante el software se pueden realizar cálculos, como cálculos de áreas, cálculo de perímetros, medidas de aristas de la pieza y otras muchas funciones como mediciones de ángulos, rugosidad o posiciones relativas.

7. APLICACIONES

Estas máquinas se utilizan en los procesos de calidad, después del proceso de fabricación, con el objetivo de validar las piezas fabricadas y asegurando que cumplen la tolerancia permitida. Las MMC realizan mediciones dimensionales y mediciones de desviación de la regularidad geométrica. En la actualidad existen máquinas de medición por coordenadas con diferentes configuraciones. Cada configuración está diseñada para obtener ciertos beneficios. Algunos ejemplos de configuraciones son MMC de tipo mesa móvil y mesa cantiléver, MMC de tipo puente móvil, MMC de tipo columna o MMC de tipo brazo horizontal entre otros.

8. LA MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS DEL INAOE

La Máquina de medición por coordenadas (MMC) del INAOE, fue construida durante el periodo 1996-2003 y cuenta con un volumen de medición de 4.5m x 6m horizontal por 4.2m vertical, utiliza un interferómetro óptico lineal en cada eje para proporcionar datos de posición de la cabeza de medición. Estos datos son relativos y no absolutos, es decir, los interferómetros detectan el cambio de distancia entre dos componentes, y no la distancia absoluta entre ellos [9].

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

Por esta razón, la interrupción del sistema de medición resulta en un reseteo de los contadores de distancia a cero, perdiendo cualquier lectura previa y también el origen previamente establecido para cada eje de movimiento.



FIGURA 2. Máquina de medición por coordenadas (MMC) del INAOE

Para ayudar a minimizar la pérdida de información durante un reseteo, y para establecer puntos de referencia absolutos (fijos) en cada eje, se construyeron tres registradores de origen, colocando uno en cada eje de la máquina. Estos registradores usan un haz láser para definir el origen, y un sensor óptico para encontrar dicho origen, ambos componentes en movimiento relativo definido por los ejes de movimiento de la MMC.

Después de la instalación el error en el origen es de 2.5 - 4.5 micras, comparado con un error de 100 μ m proporcionado por el sistema electro-mecánico usado previamente.

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico "Alfonso Serrano"

La máquina de medición por coordenadas de INAOE utiliza interferómetros ópticos en cada uno de sus ejes ortogonales para proporcionar datos de posición. Típicamente un interferómetro está montado sobre el componente "fijo" mientras un retro reflector se coloca en la sección móvil. El sistema detecta un cambio en la distancia entre el interferómetro y el reflector, en base a la luz emitida del divisor y posteriormente reflejada del espejo como lo veremos en la siguiente figura.

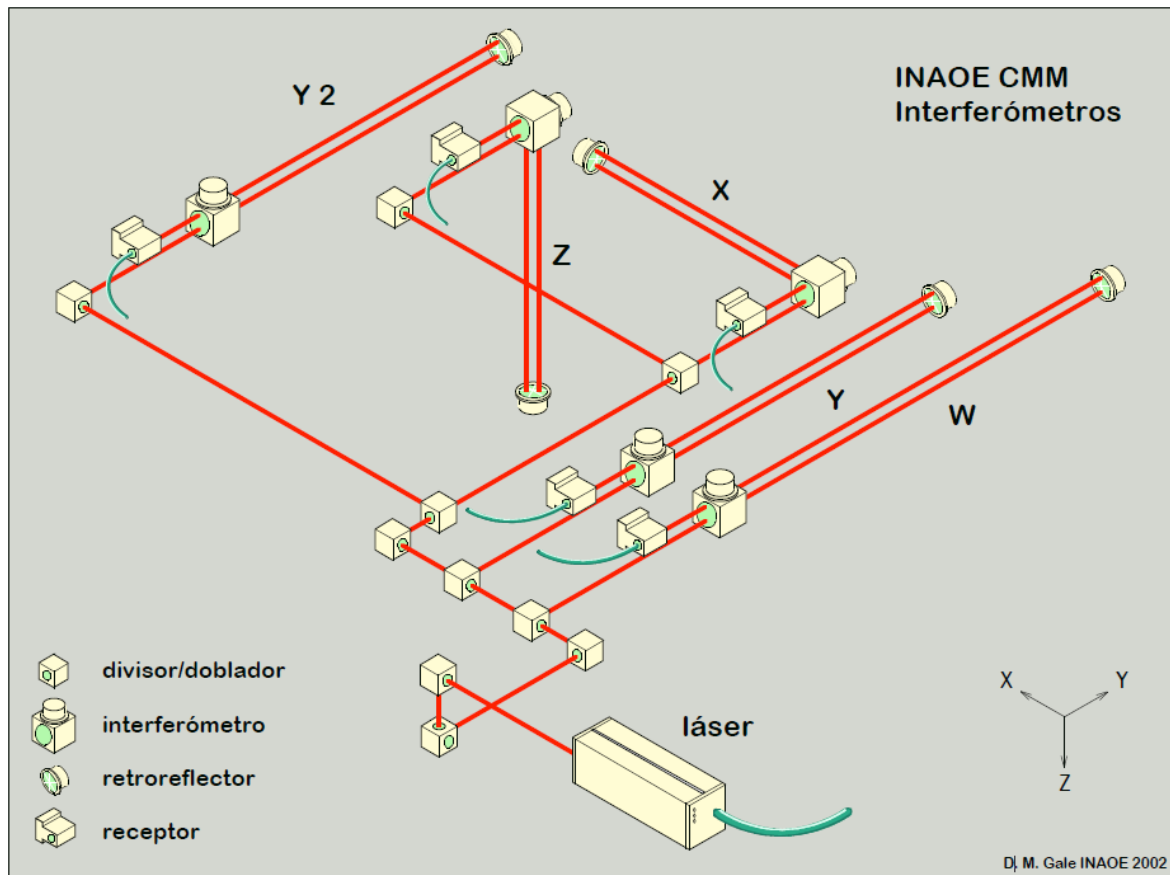


FIGURA 3. La MMC utiliza tres interferómetros lineales (X, Y, Z) para proporcionar distancia en cada eje (modificado de [14])

Al encender los interferómetros el conteo está en cero, y el conteo de distancia se inicia con cualquier movimiento de la máquina. Cuando la cabeza de medición está ubicada en un lugar adecuado (por ejemplo, con el palpador tocando un punto de referencia del objeto a medir), se puede realizar un reseteo de los

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

contadores nuevamente, y así se define el origen de medición para el trabajo en proceso.

Si se interrumpe el sistema, lo que sucede por ejemplo con un corte de energía eléctrica o el bloqueo del haz de luz del interferómetro, los contadores de distancia hacen un reseteo a cero, y se pierde información de posición de la MMC. También se pierde el punto de origen previamente definido. Esto implica re-iniciar el proceso de medición desde el principio.

Para evitar las problemas asociados con la pérdida del conteo de los interferómetros, se incorporaron puntos de referencia fijos en cada eje, los cuales proporcionan un origen para cada escala interferométrica de medición. Si se interrumpe el sistema basta mover la MMC para encontrar los orígenes en cada eje, y sincronizar los contadores con estos puntos de referencia fija.

9. COMPONENTES

En la siguiente figura se muestran los principales componentes de la Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) localizada en el Laboratorio de Superficies Asféricas del INAOE.

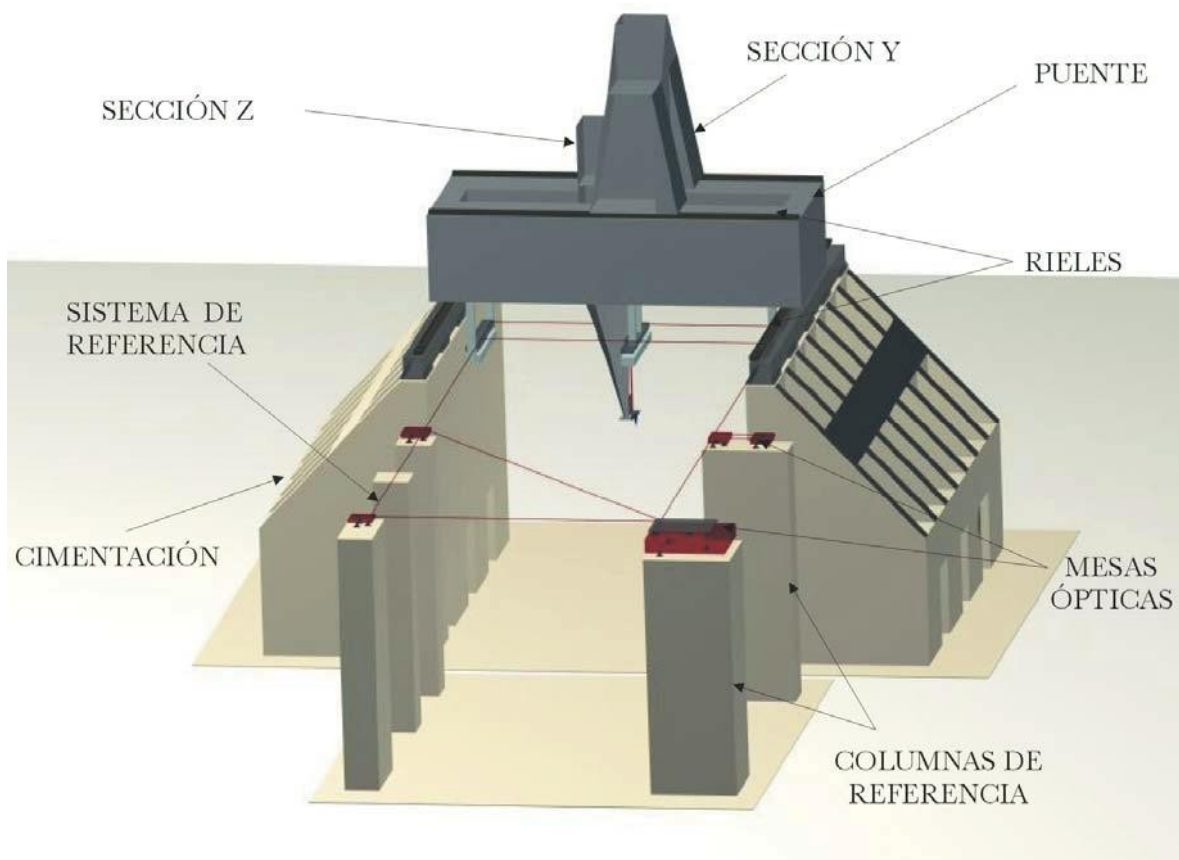


FIGURA 4. Componentes de la MMC (modificada de[14])

**Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del
Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”**

10. DATOS TÉCNICOS

Modelo	GTM1
Rango de medición	
Eje X	4500 mm
Eje Y	6000 mm
Eje Z	4200 mm
Dimensiones	
Ancho	10000 mm
Largo	15530 mm
Altura	13364 mm
Peso máximo de la pieza a medir	30 toneladas
Diseño	Máquina de medición por coordenadas de alta precisión en diseño puente-mesa. El puente se mueve sobre dos guías sólidas de concreto armado
Método de guiado	Cojinetes de bolas
Motores	Motores de DC con reductor integrado y freno
Transmisión de potencia	Piñones y cremalleras precargados en todos los ejes
Máxima velocidad de posicionamiento	100 mm/s
Máxima aceleración	10 mm/s ² en cada eje
Protección de colisiones	Protección total en todos los ejes con sistemas electrónicos de paro automático y topes mecánicos
Sistema de medición de longitudes	Interferómetro modelo HP5517A
Resolución	0.001 mm
Repetibilidad	0.008 mm
Sistema de palpado	<p>Palpador Heidenhain modelo CT 6002 con un rango de medición vertical de 60 mm y precisión de ±0.1 micra.</p> <p>Palpador Heidenhain modelo MT 101 K con un rango de medición de 100 mm y precisión de ±1 micra.</p> <p>Palpador Heidenhain modelo 3D TS 230 con una precisión ±1 micras y repetibilidad de ±1 micra</p>

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

Método de medición	Exploración continua y punto a punto
Frecuencia de palpado	1000 puntos/s
Control electrónico	Control digital con una computadora, tarjetas interpoladoras de encoders, salidas analógicas para los amplificadores e interfaz rápidas para leer los interferómetros

Voltaje de operación	220 V con 3 fases
Presión de aire	8 Kgf/cm ²
Consumo de aire	100 litros/min
Rango de temperatura	17°C a 22°C
Variación máxima de la temperatura	
Por hora	0.3°C
Por día	1.5°C
Gradiente de temperatura	
Horizontal	0.09°C/m
Vertical	0.04°C/m
Error de medición en una superficie plana de 5 m x 4 m	0.003 mm
Error de posicionado	0.050 mm

TABLA 1. Datos técnicos de la MMC (modificada de[14])

11. CONTROL ELECTRÓNICO

El sistema de control electrónico de la MMC es un control digital usando una computadora con las interfaces apropiadas, tales como: tarjetas interpoladoras de encoders, salidas analógicas para el comando a los amplificadores de los motores, interfaz rápida para leer las posiciones de los interferómetros, interfaz GPIB para programar el interferómetro y entradas y salidas para los límites. Adicionalmente, se usan los periféricos estándar de una computadora, tales como seriales, video, red, etcétera [9]. La computadora que se utiliza, debe contar con un sistema operativo de tiempo real y se encarga hasta del último detalle del control de la máquina, así como de la interfaz con el operador. Esta computadora también se usa para el desarrollo de los programas de control, captura de datos, y comunicaciones de red [9].

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

En la siguiente imagen se muestra el chasis de potencia de control, donde se tienen los amplificadores y sus fuentes, alimentación eléctrica, relevadores y protecciones, etcétera; para cada uno de los ejes.

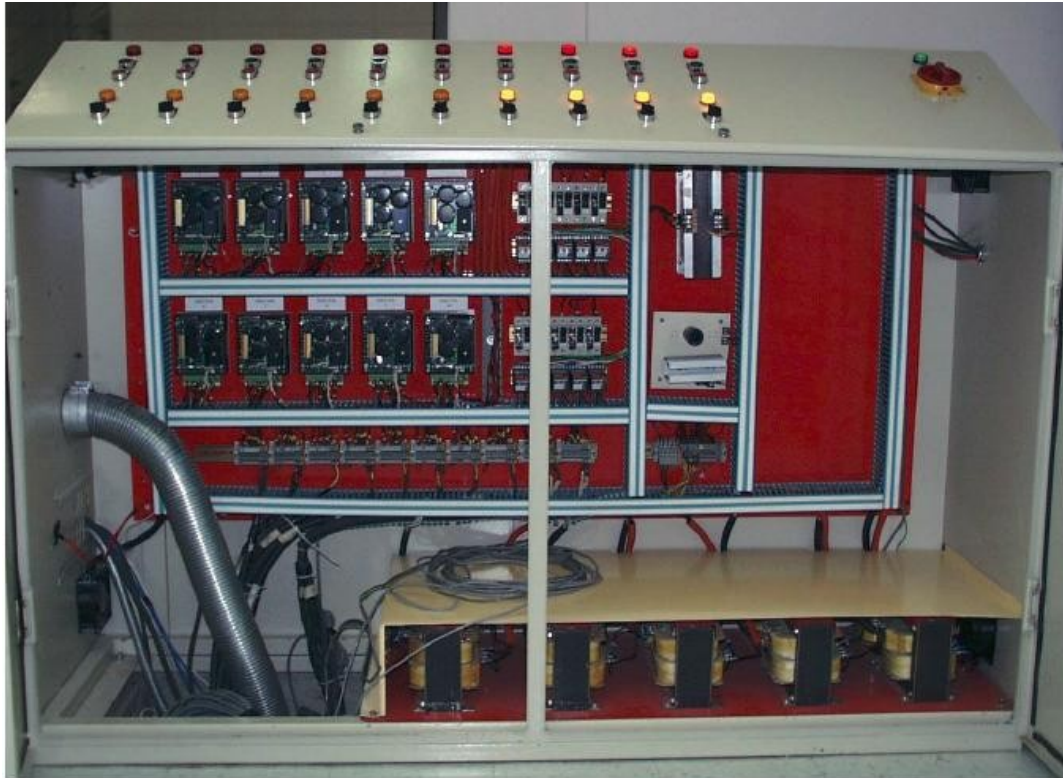


FIGURA 5. Chasis de control de potencia de la MMC

12. PALPADORES

El sistema de palpación es el que permite registrar puntos de interés sobre el objeto del cual se quieren conocer dimensiones y geometría, asociando a cualquier punto una terna de coordenadas. Para especificar los puntos sobre el objeto se utilizan palpadores de contacto que proveen una señal eléctrica al sistema de control. La MMC cuenta actualmente con 4 palpadores, tres de ellos de exploración continua y uno de exploración discreta. Todos los palpadores son de la marca *HEIDENHAIN* [14].

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

El principal trabajo para la MMC fue la **medición de los paneles del GTM**, estos paneles son superficies parabólicas fuera de eje de aproximadamente 5 m x 3 m, pero son superficies muy cercanas a un plano ya que su máxima sagita, desviación de un plano, es de 8.5 cm, por esto, la técnica de medición de los paneles será medir las sagitas de las superficies y compararlas con las sagitas ideales, para esto necesitamos solamente un medidor de longitudes de alta precisión que sea trasladado por la MMC, de tal manera, que la MMC proporcionará las coordenadas X y Y, y el medidor de longitudes proporcionará la coordenada Z.



FIGURA 6. Palpadores CT 6002 y MT 101M (obtenida de[14])

Los palpadores MT 101M, MT 101K y CT 6002 son sistemas de medición de longitud, con rangos de medición grandes, con una alta precisión lineal y resolución en el rango de los nanómetros.

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

Los palpadores MT 101M, MT 101K y CT 6002 de HEIDENHAIN funcionan de acuerdo al principio de Abbe, es decir, la escala de medición y el husillo del palpador están exactamente alineados, todas las componentes del palpador están diseñadas en términos de su estabilidad térmica y mecánica para obtener la mayor precisión posible.

Ya que las variaciones de temperatura afectan las mediciones, HEIDENHAIN usa materiales especiales con bajos coeficientes de expansión térmica, tales como ZERODUR e INVAR, para garantizar la precisión sobre un rango de temperaturas relativamente grande. Además, las vibraciones y las cargas de choque no tienen influencia negativa en la precisión, los husillos toleran altas fuerzas radiales y se mueven con muy baja fricción.

Con estos palpadores se aumentaron las capacidades de la MMC para medir, inspeccionar y digitalizar superficies en 3 dimensiones, teniendo una repetibilidad menor a 1 micra y el estilete permite de flexiones hasta de 5 mm en todas direcciones.

13. PROCESO DE ALINEACIÓN DE LA SUPERFICIE REFLECTORA PRIMARIA

Cada segmento (panel) consta típicamente de 8 subpaneles de níquel electroformado, cada uno de los cuales se monta en una estructura de aluminio en forma de panel llamado *base-plate*, que a su vez está soportado por ocho barras axiales y montado sobre una base llamada *subframe*, una vez armado el panel completo, es colocado (montado) en 4 tripies (uno en cada esquina).

Cada subpanel tiene 5 ajustadores y es precisamente ahí donde se hacen las mediciones a todos los segmentos.



FIGURA 7. Subpanel con sus 5 ajustadores (modificado de[18])

14. COMPOSICIÓN DE UN PANEL

Los paneles reflectores primarios del GTM tienen una estructura en forma de sándwich con las partes frontal y posterior hechas de láminas de níquel electroformado siendo el núcleo un panel de aluminio hexagonal. Ambos revestimientos, el reflectante y el respaldo, son replicas del molde maestro de acero inoxidable. El espesor de cada cara es de aproximadamente 0.5 mm. El núcleo del sándwich tiene prácticamente la forma de un “panel de abejas” y está hecho de una aleación de aluminio, el cual es utilizado para aplicaciones aeroespaciales, y tiene un tratamiento especial de resistencia a la corrosión.

Las perforaciones que presenta el panel permiten la ventilación y aseguran un equilibrio entre la presión interna y externa. El espesor del panel es de 30 mm. El sellado de los bordes del panel está asegurado con “silicón blanco”, y toda la parte posterior se cubre primero con “armaflex” y se tapa con “papel militar”, dejando descubiertos los 5 puntos de montaje llamados flenchs, ahí se fijarán los

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

ajustadores, y acoplando estas 2 partes se pueden realizar los desplazamientos verticales. Los paneles traen una marca en forma de cruz en la parte frontal que coincide con la ubicación del ajustador en la parte posterior.

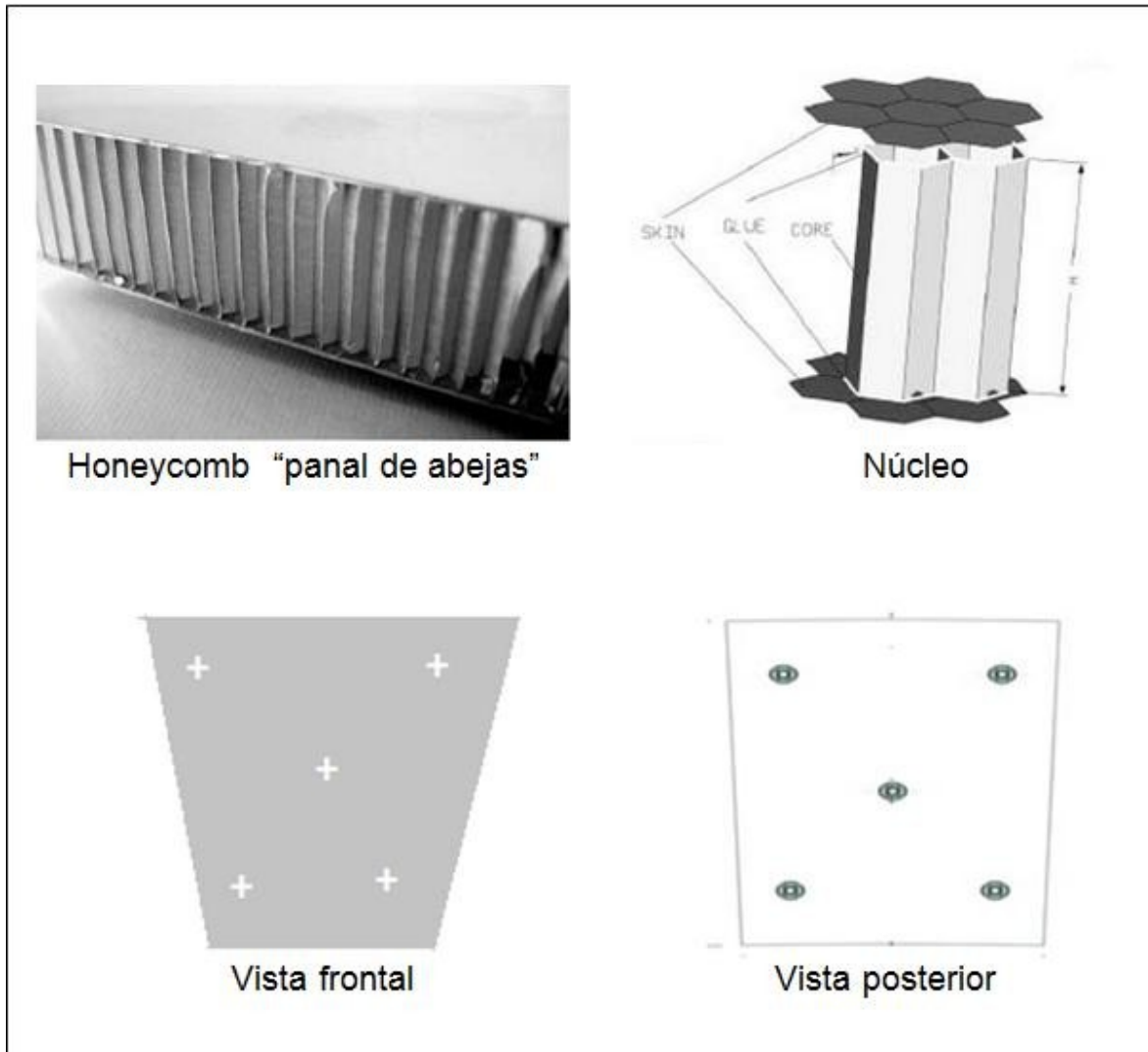


FIGURA 8. Composición de un panel (modificado de[18])

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del
Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

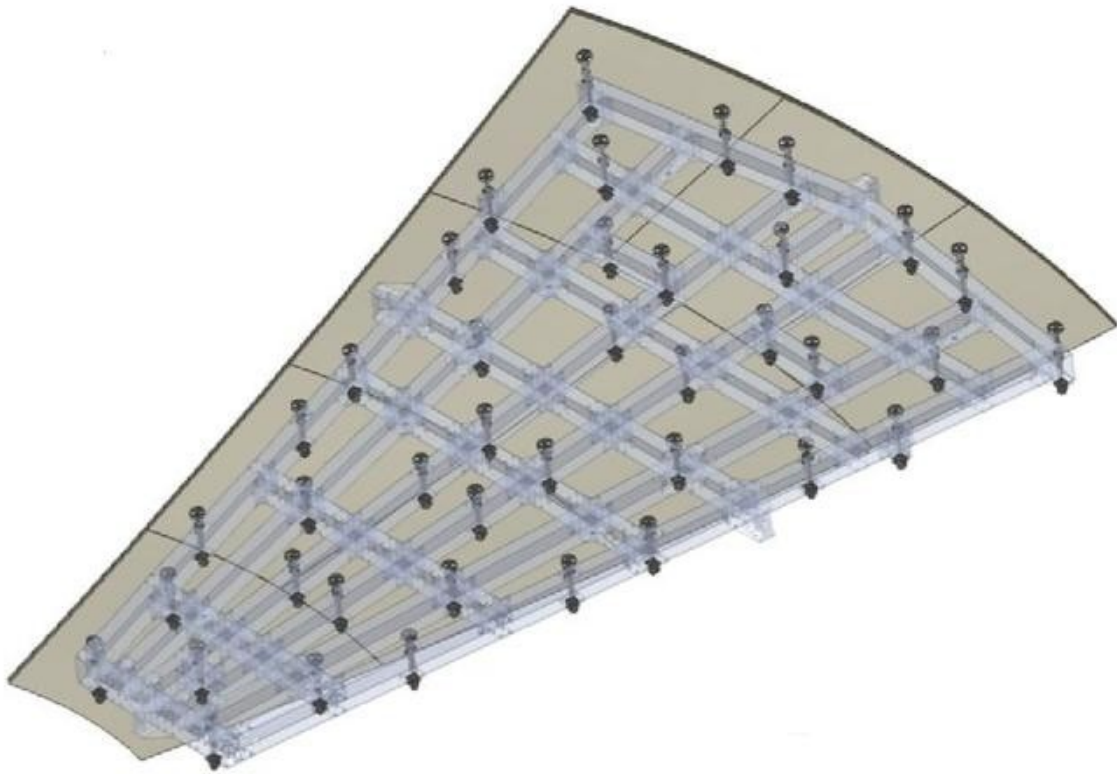


FIGURA 9. Panel completo formado por 8 subpaneles donde podemos apreciar los 40 ajustadores (modificado de [18])

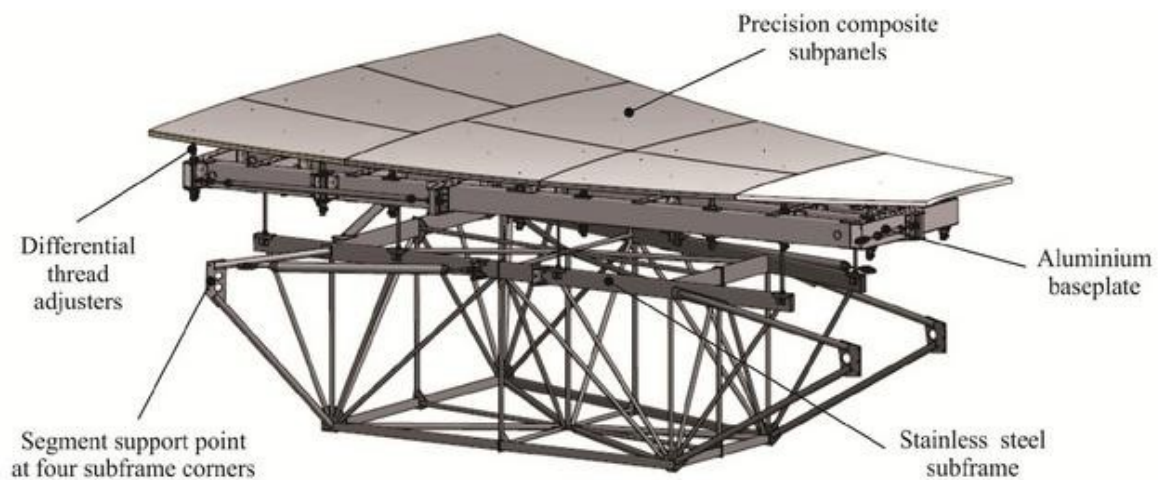


FIGURA 10. Segmento ensamblado (obtenida de[18])

15. ENCENDER EL EQUIPO

Para iniciar con la utilización de la MMC del laboratorio de superficies esféricas, debemos seguir las siguientes instrucciones:

- Encender el chasis de control de potencia (FIGURA 3.5.)
- Una vez encendidos los motores procedemos a encender la computadora (servidor) principal, que contiene el software y el programa para el control de la máquina en tiempo real.
- Encendemos también la interfaz de usuario que consiste en un programa gráfico, que se comunica con la electrónica de control de movimiento mediante instrucciones, se ejecuta en la computadora de usuario que es una laptop, la cual tiene el sistema operativo Linux.

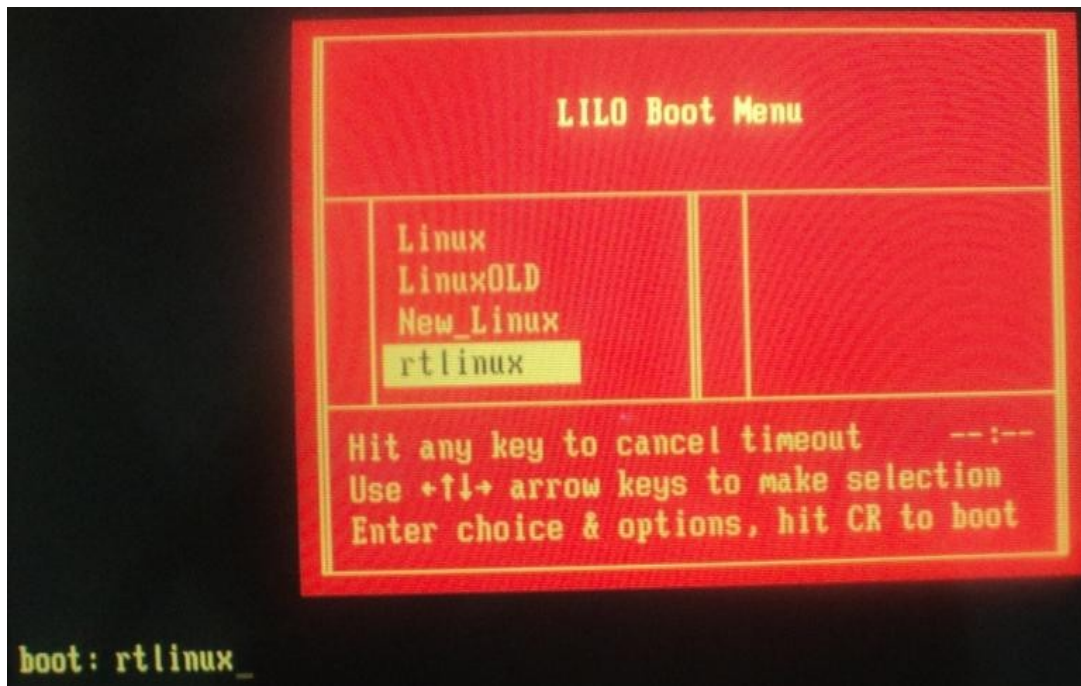


FIGURA 11. Ingreso al sistema en tiempo real

- En la ventana principal de la interfaz ingresar al sistema operativo rtlinux, una vez haya ingresado, se abre una terminal y también se abrirá

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico "Alfonso Serrano"

automáticamente una nueva ventana en la cual debe colocar el nombre del usuario y su contraseña. Nota: es importante entrar en rtlinux, ya que es en tiempo real de lo contrario, no se moverá la MMC.

- Ya estando dentro de la terminal se teclean los siguientes comandos con los cuales nos saldrán las pantallas para realizar las mediciones.
- Nota: debemos entrar como super usuario para tener acceso a todo.

Después de teclear los anteriores comandos nos saldrán nuestras pantallas para poder iniciar una medición.

Control		Help	
Posición X	<input type="text"/>	mm	
Posición Y	<input type="text"/>	mm	
Posición Z	<input type="text"/>	mm	
Palpador	<input type="text"/>	mm	
ESTADO DE LA MMC		RES	
<input type="text" value="No ejecutando"/>		CNC	LOG
		B/P	

FIGURA 12. Pantalla de control

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”



FIGURA 13. Pantalla de movimientos

Con estas pantallas podemos controlar completamente los ejes X, Y y Z de la máquina de medición por coordenadas y ya podemos empezar a medir.

Notas:

- Si en la pantalla donde se despliegan los datos sale la leyenda “abortando razón grave”, es porque no se encendió bien la consola, verificar que el paro general esté fuera y que el arranque de los ventiladores y los ejes estén habilitados.
- Si la pantalla se congela y el sistema no responde, colocar los frenos de cada eje, y enseguida apagar la consola (chasis de potencia), después cerrar sesión, “matar” los procesos y apagar todo, esperar unos minutos y volver a encender todo.
- Siempre, retirar el eje Z del objeto a medir por seguridad.

16. PROCEDIMIENTO PARA ALINEAR LA SUPERFICIE REFLECTORA PRIMARIA DEL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO ALFONSO SERRANO”.

Objetivo del procedimiento:

Alinear los segmentos (paneles) que forman la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”, mediante una maquina de medición por coordenadas.

Alcance del procedimiento:

Obtener la mejor calidad en la alineación de la superficie reflectora primaria mediante una máquina de medición por coordenadas. Logrando uniformidad en el proceso de ajuste de los segmentos que forman la superficie del GTM, para lograr una superficie optima.

Políticas de operación (internas y/o externas) propias del documento:

Cada segmento (panel) consta típicamente de 8 subpaneles de níquel electroformado, cada uno de los cuales se monta en una estructura de aluminio en forma de panel llamado *base-plate*, que a su vez está soportado por ocho barras axiales y montado sobre una base llamada *subframe*, una vez armado el panel completo, es colocado (montado) en 4 tripies (uno en cada esquina). Cada subpanel tiene 5 ajustadores y es precisamente ahí donde se hacen las mediciones a todos los segmentos.

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico "Alfonso Serrano"

Diagrama de flujo del procedimiento general para realizar las mediciones a los paneles:

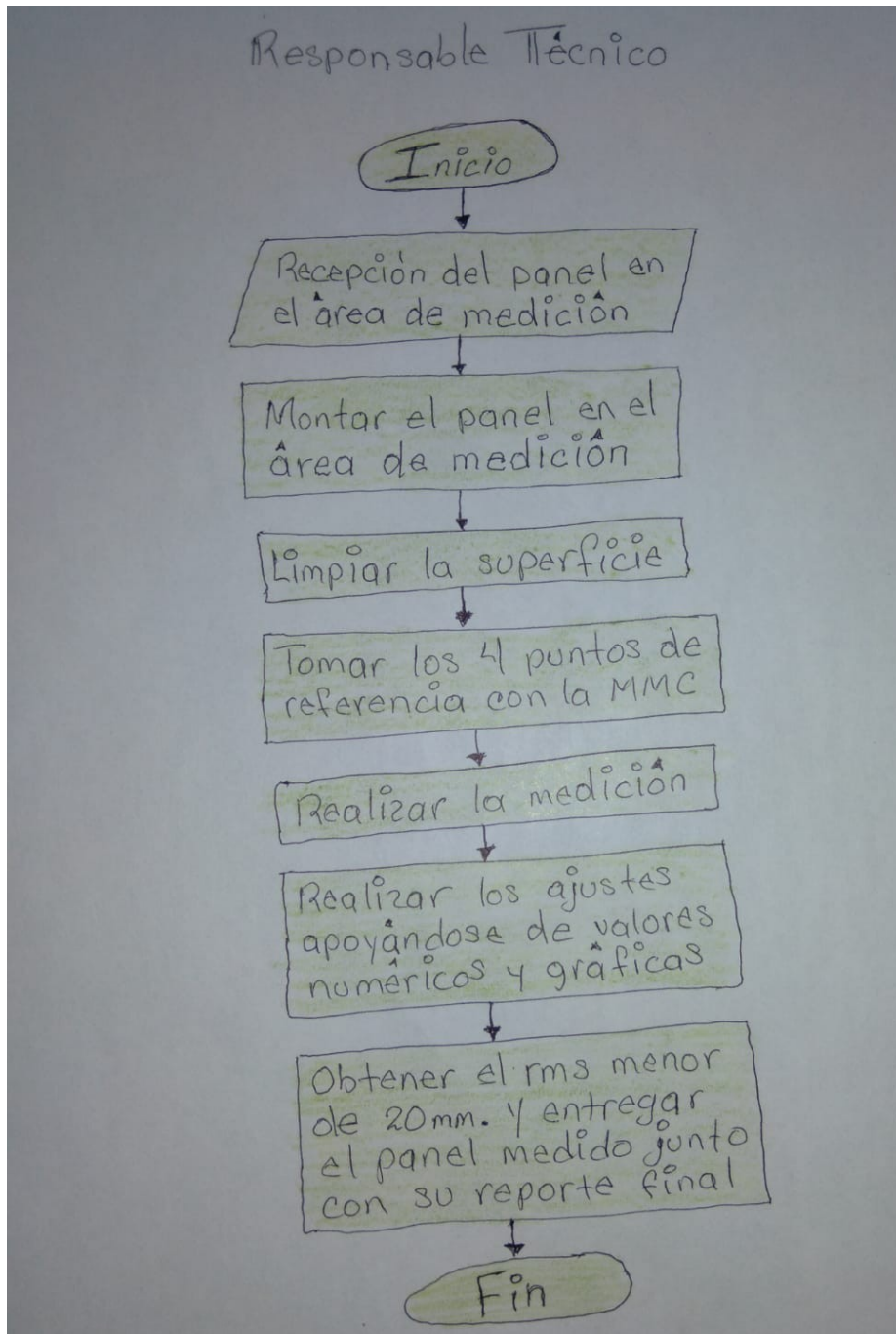


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de alineación

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

17. INGRESO DEL SEGMENTO (PANEL) AL ÁREA DE MEDICIÓN

El primer paso para iniciar la medición a cualquier segmento, también llamado panel, es recibirlo en el área de medición. Una vez recibido el panel y ya montado en los tripies, se limpia toda la superficie con acetona y toallas.

En la siguiente figura se muestra un panel recibido en el área de medición y listo para empezar a trabajar en el.



FIGURA 14. Segmento armado “panel completo”. (Obtenida de[15])

Inmediatamente se toman los datos de las coordenadas de las esquinas del segmento.

Esto se hace ya con la MMC y se guardan en un block de notas con el nombre de esquinas.m. Al tomar los datos de las esquinas del panel le estamos indicando a la

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

máquina a través del programa, el área en la que debe desplazarse para tomar los puntos y realizar la medición.

Programa: esquinas.m

Ejemplo:

```
%**Posiciones de las cuatro esquinas del Panel%
%*****%Punto 1
p(1,1) = 3260.103;
p(1,2) = 5819.929;
p(1,3) = 2533.257-20;
%Punto 2
p(2,1) = 553.589;
p(2,2) = 5784.900;
p(2,3) = 2538.945-20;
%Punto 3
p(3,1) = 914.930;
p(3,2) = 715.245;
p(3,3) = 2632.310-20;
%Punto 4
p(4,1) = 3032.711;
p(4,2) = 742.776;
p(4,3) = 2629.089-20;p
```

Una vez registradas las coordenadas de las esquinas del panel podemos enviar nuestra primera medición.

En una nueva terminal dentro de Linux, se ejecutan los siguientes comandos:

```
>cd panel
>cd programas
>./panel
Distancia mínima: 100
Separación deseada: 350
Es la coordenada Z positiva hacia arriba (si/no): no
Dar el numero de anillo: 1,2,3,4 ó 5 según sea el caso
Numero de panel: ¿ ? varía
Numero de medición: ¿ ? varía
```

Después de dar estas instrucciones la MMC iniciará con la medición del panel.

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico "Alfonso Serrano"

El programa que se utiliza específicamente para mandar la medición se llama panel está programado en lenguaje C.

Nombre del programa: panel

software utilizado: Lenguaje C

18. MEDICIÓN

```
clear all;
printf("\n\n");
illustration not visible in this excerpt
printf("Dar las coordenadas de las esquinas en el orden mostrado,\n");
printf("en milímetros\n");
msg = "XYZ";
fprintf('Lee datos de las esquinas: esquinas.m\n') esquinas
%p = zeros(4,3); %for i=1:4
% for j=1:3
% printf("P%d %s = ", i, msg(j));
% ardatos = fgetl(stdin, 90);
% p(i,j) = sscanf(ardatos,"%f\n", "C");
% end
% printf("\n");%end
# Lee el número de anillo
while( 1 )
puts("Dar el número de anillo: "); ardatos = fgetl(stdin, 90);
anillo = sscanf(ardatos, "%d\n", "C");if((anillo >= 1) && (anillo <= 5))break;
end
puts("anillo inválido\n");end
** Los programas completos, deberán ser solicitados al instituto.
```

19. AJUSTES

Una vez terminada la medición, el programa **aamkr** nos genera una gráfica y un reporte de valores que incluye entre otros datos el error rms que tiene el panel y los valores numéricos que propone ajustar para disminuir ese error y llegar a las 20 micras ó menos, que es la medida necesaria y aceptable para poder liberar un panel y entregarlo ya medido. Entonces se toman estos valores y de forma empírica se procede a mover los ajustadores.

El panel tiene en total 40 ajustadores, 5 por cada subpanel, como ya se mencionó;y podemos ajustar en esos 40 puntos para disminuir el error rms y lograr

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

las 20micras. La antena requiere un error total de superficie de 70 mm. Hay dos herramientas (llaves) para realizar los ajustes. Con la llave de bushing, una vuelta completa resulta en un desplazamiento vertical de 250 micras; y con la llave de ajustador una vuelta completa resulta en un desplazamiento vertical de 500micras.

El ajuste se realiza girando la cuerda, y todos los ajustes se realizan manualmente.

Conforme se ganaba experiencia a lo largo de los ajustes, se mejoró la eficiencia y se redujeron el número de iteraciones aplicadas a cada uno de los segmentos medidos. Un panel entra al área de medición aproximadamente a 4,000 ó 3,000 micras de error y se necesitan unas 15 ó 20 iteraciones para llegar al objetivo, cada medición tarda una hora aproximadamente, logrando entregar un panel medido después de unas 36 hrs. de trabajo.

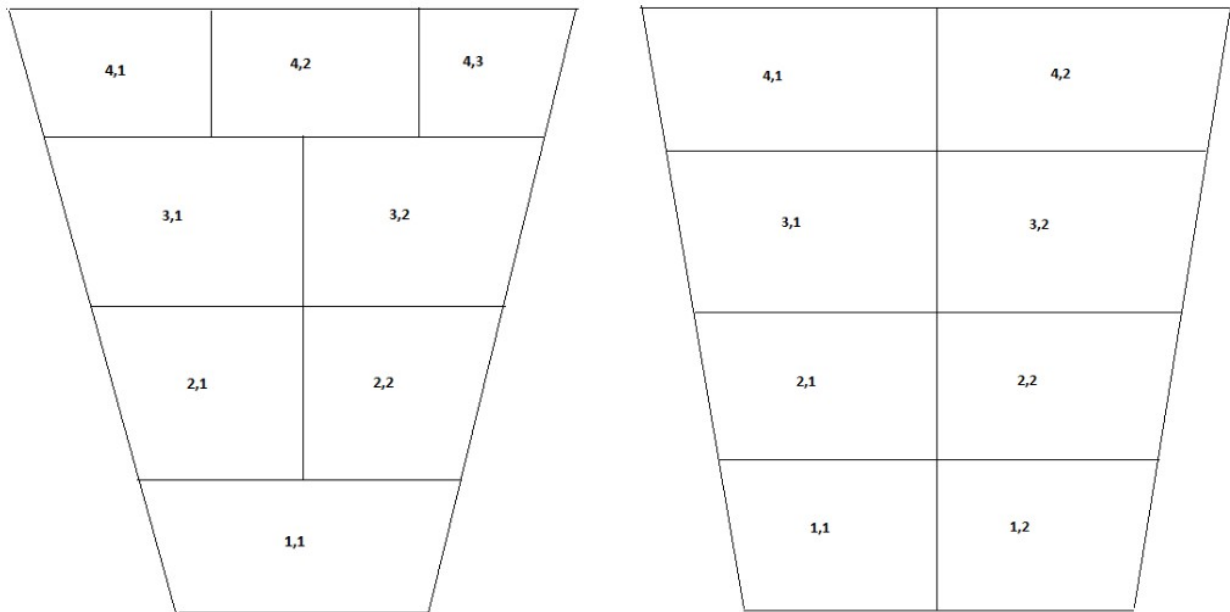


FIGURA 15. Forma del panel del Anillo 1 (a), anillo 2,3,4 y 5 (b).

A continuación se muestra el ejemplo de un reporte de medición generado por el programa “panel”.

**Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del
Gran Telescopio Milimétrico "Alfonso Serrano"**

REPORTE DEL ANALISIS DE MEDICIONES DE PANEL

*Laboratorio de Superficies Asféricas
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica*

Programa de análisis: **aamkr**
 Archivo de datos: **an4pa35med016.dat**
 Fecha y hora del reporte: Dec 20 05:53:10 2011



Panel completo error rms = **0.030101** mm
 Panel completo error pico a pico = 0.145028 mm

Error rms debido a deformación de subpaneles = 0.023638 mm

Lista de ajustes requeridos (micrómetros)

Subpanel	columna	a1	a2	a3	a4	a5	error
rms	(mm)						
1	1	17	-1	3	22	3	0.022290
1	2	-8	1	28	44	10	0.018245
2	1	-5	-34	-9	3	-15	0.007791
2	2	-20	-12	-15	-10	-18	0.023648
3	1	2	-3	-33	-26	-25	0.012754
3	2	12	10	-10	-31	-2	0.019592
4	1	24	23	3	9	16	0.032149
4	2	24	34	-4	-11	25	0.037951

Lista de ajustes requeridos (vueltas)

Para la cuerda fina de 250 micras/vuelta

Subpanel	columna	a1	a2	a3	a4	a5
1	1	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1
1	2	0/ 1	0/ 1	1/ 9	1/ 6	0/ 1
2	1	0/ 1	-1/ 7	0/ 1	0/ 1	0/ 1
2	2	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1
3	1	0/ 1	0/ 1	-1/ 8	-1/ 9	-1/10
3	2	0/ 1	0/ 1	0/ 1	-1/ 8	0/ 1
4	1	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1
4	2	0/ 1	1/ 7	0/ 1	0/ 1	1/10

Como podemos ver, este es un ejemplo de reporte de medición realizada al panel 44 del anillo 4 y es la medición número 15 esto es: an4pa35med16, el error rms en esta medición es de 30 micras, solo faltan 10 micras para liberarlo. Y también nos

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

muestra la lista de valores requeridos en cada ajustador. Estos valores debemos ajustar en cada posición.

Para

visualizar

la gráfica

total, en

una

terminal

se tecllea

el

comando

gv más el

nombre

del

archivo

con la

extensión

ps.

Ejemplo:

gv

an4pa35med16.ps.

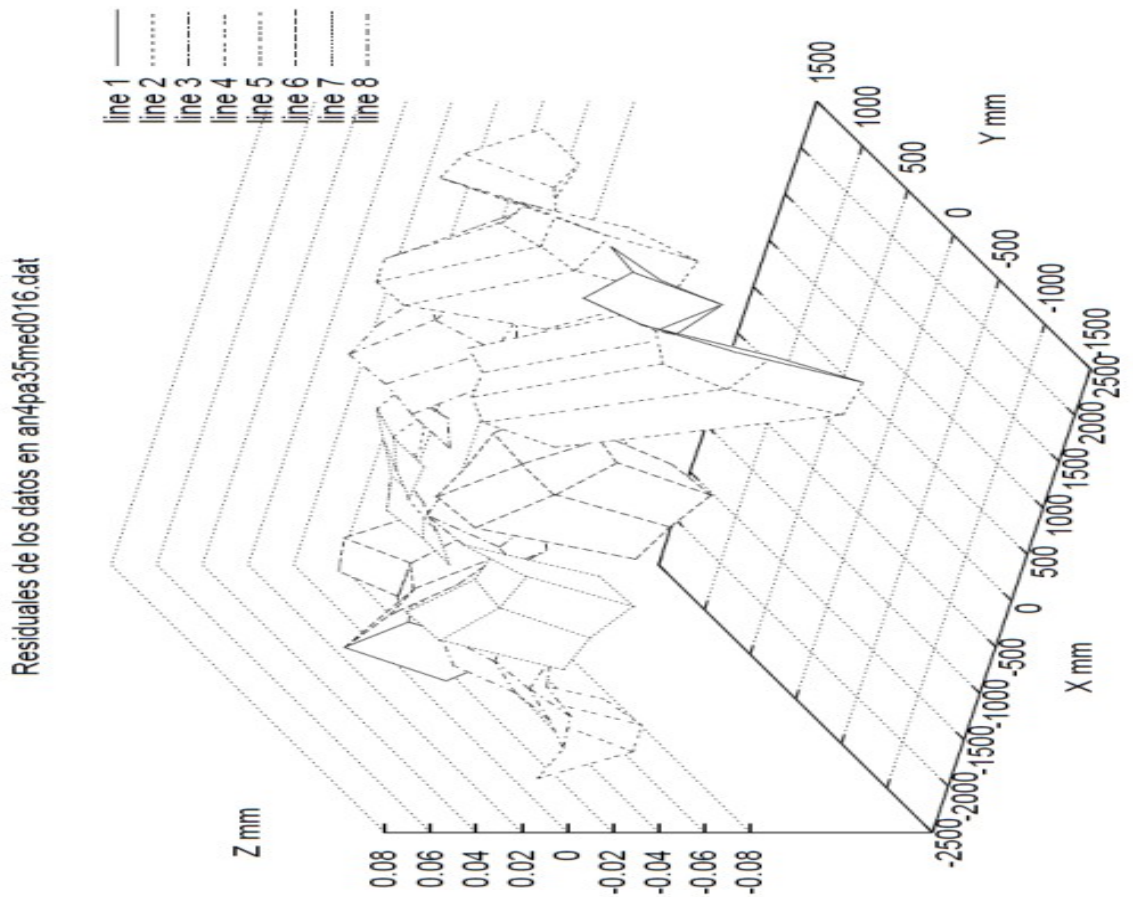


FIGURA 16. Gráfica de un panel completo

Para visualizar las gráficas individuales, se tecllea el comando gv más el nombre del archivo con guión bajo sp y extensión ps. Ejemplo: gv an4pa35med016_sp.ps

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

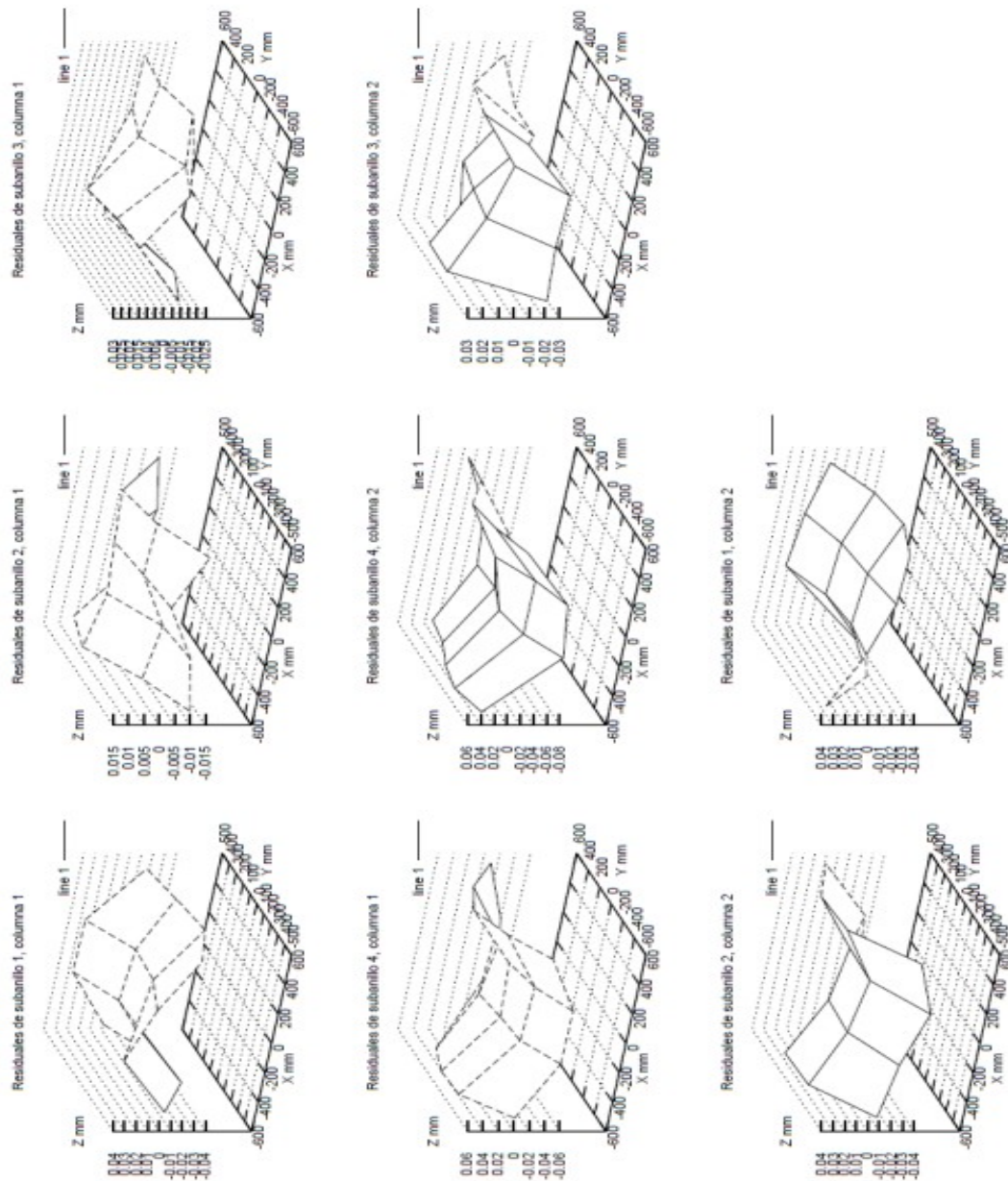


FIGURA 17. Gráficas por subpaneles (8 residuales)

20. LIBERACIÓN Y ENTREGA DEL PANEL MEDIDO

Una vez que el panel ha llegado a un rms de 20 micras o menos, se procede a liberarlo del área de medición y entregarlo al departamento de transporte en presencia del departamento de calidad, para ser cargado en un camión especial y enviado a la montaña, donde posteriormente será instalado en la antena del GTM.

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

Para liberar el panel se necesita generar el reporte de liberación del segmento, el cual contiene información como número de panel, número de anillo, fecha, folio, etc.

REPORTE DE AJUSTES DE MEDICION XYZ										
PANEL	44	ANILLO	4	FECHA	21-mar-13	FOLIO	D12R4S44			
ESQUINAS DEL PANEL										
Coordenada	E1	E2	E3	E4						
x	3389.929	696.321	1022.571	3133.294	4.1	2.11mm	4.2			
y	5678.173	5660.878	599.058	612.358		1.99mm				
z	2525.911	2534.918	2624.646	2635.054		2.12mm 2.01mm		1.98mm 2.02mm		
palpador	-20.052	-20.048	-20.048	-20.043				2.00mm		
PUNTOS PARA EL CENTRO DEL SUBFRAME										
Coordenada	E1	E2	E3	E4	3.1		3.2			
x	2459.797	1431.133	1565.439	2366.663		1.97mm				
y	5225.382	5224.764	1458.524	1461.401	2.03mm 2.04mm	1.99mm 2.10mm				
	CENTRO	X	1955.758		2.1	2.03mm	2.2			
		Y	3342.51775			2.01mm				
COORDENADAS DE AJUSTADOR										
Coordenada	E1	E2	E3	E4	1.1	1.98mm 2.01mm	1.2			
x	2994.135	760.953	1123.513	2913.803		2.08mm				
y	5496.632	5428.852	786.088	840.892		2.00mm				
z	2432.871	2438.852	2609.016	2604.335						
palpador	-10.068	-10.061	-10.042	-10.074						
OBSERVACIONES GENERALES AL ENTREGAR EL PANEL										
<ul style="list-style-type: none"> * Todos los tornillos apretados y abrazaderas completas. * Separación de paneles, como lo muestra la figura. * Tornillos de barras axiales apretados y completos. * Las placas de los ajustadores están orientados al centro <li style="padding-left: 20px;">*Superficie Limpia <li style="padding-left: 20px;">Rms final = 0.020035 mm *Alturas de barras axiales referencia 1, 4, 6. 										
<i>Hora de salida 09:00 am</i>										
DERECHOS RESERVADOS, 2007								Recibió		
COPYRIGHT © MEDICION, LSA, INADE								Nohemí Sánchez		
								Entregó		
								Vo.Bo.		

FIGURA 18. Ejemplo del reporte generado por la medición realizada

Este mismo reporte será firmado por el departamento de medición, el de calidad y el de transporte. Se revisa que la superficie del panel este limpia, las abrazaderas estén apretadas, los ajustadores orientados hacia el centro, las barras axiales pintadas con pintura testigo amarilla y cubiertas con cinta canela.

Se imprime el reporte de medición, las gráficas y el reporte de liberación, se recaban las firmas y se guardan para el archivo.

**Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del
Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”**

Documentos que se tomaron de referencia.

No tomamos documentos de referencia, solo nos apegamos al formato de reporte existente de recepción y entrega del segmento. Y la única referencia siempre es que el valor **rms** debe ser menor o igual a 20 micras. Ese dato es el más relevante.

Nombre de los registros pertinentes a ese procedimiento.

No.	Nombre del documento	Tiempo de retención	Código
1	Reporte de ingreso del segmento	24 horas	No. de folio (Ejemplo) D12R4S44
2	Reporte de liberación del segmento	48 horas	No. de folio (Ejemplo) D12R4S45

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

Definiciones utilizadas dentro del procedimiento:

GTM: Gran Telescopio Milimétrico. También denotado LMT, por sus siglas en inglés, *Large Millimeter Telescope*.

Máquina XYZ: Una máquina de medición por coordenadas (MMC), es un equipo electrónico de medición directa en el que el instrumento recorre el objeto que se desea medir y mediante una toma de datos y su procesamiento con un software especializado se obtienen las dimensiones del objeto en cuestión.

Panel o Segmento: Los paneles reflectores primarios del GTM tienen una estructura en forma de sándwich con las partes frontal y posterior hechas de láminas de níquel electroformado siendo el núcleo un panel de aluminio hexagonal. Ambos revestimientos, el reflectante y el respaldo, son replicas del molde maestro de acero inoxidable. El espesor de cada cara es de aproximadamente 0.5 mm. El núcleo del sándwich tiene prácticamente la forma de un “panel de abejas” y está hecho de una aleación de aluminio, el cual es utilizado para aplicaciones aeroespaciales, y tiene un tratamiento especial de resistencia a la corrosión. Las perforaciones que presenta el panel permiten la ventilación y aseguran un equilibrio entre la presión interna y externa. El espesor del panel es de 30 mm. El sellado de los bordes del panel está asegurado con “silicón blanco”, y toda la parte posterior se cubre primero con “armaflex” y se tapa con “papel militar”, dejando descubiertos los 5 puntos de montaje llamados *flenchs*, ahí se fijarán los ajustadores, y acoplando estas 2 partes se pueden realizar los desplazamientos verticales.

Máquina de Medición por Coordenadas ó MMC: Una máquina de medición por coordenadas (MMC), es un equipo electrónico de medición directa en el que el instrumento recorre el objeto que se desea medir y mediante una toma de datos y su procesamiento con un software especializado se obtienen las dimensiones del objeto en cuestión.

RMS: El rms es la media cuadrática, valor cuadrático medio (del inglés *root mean square*) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Puede

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

calcularse para una serie de valores discretos o para una función matemática de variable continua. El nombre deriva del hecho de que es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores.

Superficie Reflectora Primaria: La superficie reflectora primaria de 50 m está constituida por 180 segmentos distribuidos en 5 anillos concéntricos. Cada segmento consta de 8 subpaneles de níquel electroformado fabricados por *Media Lario Technologies* (y son similares en su construcción a los paneles construidos por *Media Lario Technologies* para las antenas de ALMA). Los subpaneles están unidos y alineados a una estructura de soporte para producir un segmento individual de la superficie.

Nombre de los anexos del presente procedimiento.

No.	Nombre del documento	Código
1	Manual de usuario para el proceso de alineación con la máquina de medición por coordenadas del INAOE	M001
2	Manual de usuario para el proceso de ajuste a superficies de níquel electroformado	M002
3	Formato de reporte de mantenimiento a paneles instalados en el Gran Telescopio Milimétrico	M004
4	Creación de carpetas físicas y digitales para conservar y resguardar todas las mediciones realizadas a los segmentos que comprenden los anillos del telescopio.	M005

**Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del
Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”**

Cambios en la versión

Fecha de emisión	Revisión vigente	Fecha de revisión	Descripción del cambio	Responsable del cambio
Marzo 2013	00	N/A	Se modificó el formato de reporte de segmento medido (liberación), se agregó la medición de los gaps, se agregó también el valor de las barras axiales, y se agregó la firma del responsable de turno.	Nohemí Sánchez Medel

CONCLUSIONES

En marzo de 2013 se logró entregar la superficie reflectora primaria con los anillos 1, 2 y 3 terminados, obteniéndose un error RMS de 50, 44 y 68 mm respectivamente, siendo una cifra final de 54 mm el error rms efectivo. El objetivo del trabajo se alcanzó ya que se alinearon los 32.5 metros de superficie, el procedimiento de alineación y ajuste se realizó con una óptima calidad.

La máquina de medición por coordenadas MMC fue invaluable para realizar la metrología a la superficie reflectora primaria del gtm. También se midieron otras piezas importantes como el reflector secundario, que es una pieza monolítica de aluminio, fundido, maquinado y pulido para obtener el perfil hiperbólico. Las mediciones a este espejo dieron un error RMS de 63 mm.

Durante el periodo 2012-2013 se realizó una revisión a fondo de la mecánica del espejo primario y los procedimientos de metrología en el proyecto GTM. Se logró reducir el error RMS de los reflectores principales a niveles aceptables para las observaciones astronómicas, quedando cerca de las especificaciones técnicas del proyecto. Durante los próximos años seguiremos con el mantenimiento y mejoramiento de las superficies reflectoras, siendo éstos componentes críticos.

El aprender a manejar la máquina de medición por coordenadas más grande del mundo en su tipo y realizar los ajustes a los segmentos de la superficie reflectora primaria del telescopio, entre otras actividades; es una de las labores más difíciles y satisfactorias que me ha tocado experimentar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, <http://www.inaoe.gob.mx/historia.php?movil=0>, última visita: 14/08/2017.
- [2] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, http://www.inaoe.gob.mx/mapa_acceso.php?movil=0, última visita: 14/08/2017.
- [3] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, http://www.inaoe.gob.mx/mapa_instalaciones.php?movil=0, última visita: 14/08/2017.
- [4] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, <http://www.inaoe.gob.mx/organigrama.php?movil=0>, última visita: 15/08/2017.
- [5] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, <http://yolotli.inaoep.mx/?movil=0>, última visita: 15/08/2017.
- [6] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, <http://www.inaoe.gob.mx/visitas/>, última visita: 15/08/2017.
- [7] El Gran telescopio milimétrico Alfonso Serrano, <http://www.lmtgtm.org/?lang=es>. Última visita: 10/06/2017.
- [8] Introducción y ciencia con el GTM, <http://wiki.lmtgtm.org/gtm/intro.html> última visita: 10/06/2017.
- [9] Esperanza Carrasco, Itziar Aretxaga, William M. Irvine, El gran telescopio milimétrico, dos países vecinos exploran juntos el cosmos, ISBN 968-9085-00-X, Año 2006.
- [10] Edgar Castillo Domínguez, MC., INAOE, Instrumentación complementaria para el GTM, (Desarrollo de bolómetros y radiómetros en el INAOE), Abril 2011.
- [11] INAOE, un centro de investigación en México con reconocimiento internacional
<http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/universo/347-inaoe-un-centro-de-investigacion-en-mexico-con-reconocimiento-internacional>. Octubre 2014.
- [12] Susana Paz, Agencia Informativa CONACyT, El Gran Telescopio Milimétrico observa el universo desde Puebla, <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/universo/465-19nov-nota-el-gran-telescopio-milimetrico-observa-el-universo-desde-puebla>, noviembre de 2014.

Procedimiento para realizar la alineación de la superficie reflectora primaria del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”

[13] Dr. David M. Gale Regan, M.C. César E. Sampieri G. Reporte técnico, Los registradores de origen para la máquina de medición por coordenadas de INAOE, Febrero de 2007.

[14] Sergio Vázquez y Montiel, Alberto Jaramillo Núñez, Jorge Pedraza Chávez, David Gale, La máquina de medición por coordenadas (XYZ) del INAOE características y una breve historia. Octubre del 2003.

[15] Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla, <http://www.inaoep.mx/~rretes/OANTON-INAOE.pdf>, última visita, 08/08/17.

[16] Medición y Ajuste de las Superficies Ópticas del Gran Telescopio Milimétrico, <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/Instrumentacion/72- J TSOMI-84-72.pdf>, última visita, 18/08/17.

[17] El Gran Telescopio Milimétrico, Las Contribuciones del Grupo de Óptica, Sergio Vázquez y Montiel, Grupo de Instrumentación Óptica. http://www.fcfm.buap.mx/telescopios/docs/El_Gran_Telescopio_Milimetrico.pdf última visita, 21/08/17.

[18] <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9151/1/Metrology-and-surface-adjustment-of-primary-reflector-panels-on-the/10.1117/12.2056859.full>, última visita, 21/08/17.

[19] <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9912/1/Coordinate-metrology-of-a-primary-surface-composite-panel-from-the/10.1117/12.2233892.full>, última visita, 21/08/17.

[20] Dr. David M. Gale, Medición y Ajuste de las Superficies Ópticas del Gran Telescopio Milimétrico, 2012-2103.

[21] El Gran Telescopio Milimétrico, <http://tectonicablog.com/?p=11290>, última visita, 05/09/2017.

[22] Dr. Luis Carrasco Bazua, Investigador titular “D” Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, El Gran Telescopio Milimétrico 1998-2004, <http://www.revista.unam.mx/vol.5/num4/art22/art22.pdf>, Revista Digital Universitaria, 10 de mayo 2004, volumen 5 número 4, ISSN: 1067-6079.

[23] Centro Nacional de Metrología (CENAM), <http://www.cenam.mx/ammc/Default.aspx>, última visita, 07/09/2017.