



**INAOE**

Instituto Nacional de Astrofísica  
Óptica y Electrónica

**REPORTE TÉCNICO  
#245**

**Fabricación de Plantillas de Exactitud Usando la  
Máquina de Medición de INAOE**

**Construction of High Accuracy templates using the  
Large INAOE Measuring Machine**

**Realizado por:**

**Dr. David M. Gale Regan**

**Coordinación de Óptica**

05 Junio 2006

©INAOE 2006

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de  
reproducir y distribuir copias de este reporte técnico  
en su totalidad o en partes.



# **Fabricación de Plantillas de Exactitud Usando la Máquina de Medición de INAOE**

## **CONTENIDO**

Resumen/Abstract

1. Introducción

2. Plantamiento del problema

3. Requerimientos para las plantillas

4. Diseño de las plantillas

5. Fabricación

6. Verificación

7. Entrega

8. Conclusiones

Anexo 1. Cotización para la fabricación de las plantillas fase 1.

Anexo 2. Dibujo de trabajo fase 1: Construcción de la plantilla.

Anexo 3. Dibujo de la trayectoria de marcado de la plantilla.

## **Resumen**

Este reporte documenta la fabricación de dos plantillas de acero para asistir en el armado del Gran Telescopio Milimétrico. La tarea crítica del proceso fue la ubicación de los puntos de referencia de las plantillas (barrenos de guía) con una precisión de más/menos 2 milímetros dentro de un área de aproximadamente 3 x 2.5 metros, por cual motivo se utilizó la máquina de medición por coordenadas del INAOE, para marcar dichos puntos sobre las plantillas ya armadas, y posteriormente realizar el barrenado a mano. El proceso de fabricación tardó dos semanas, cumpliendo con los tiempos de entrega solicitadas por el proyecto. El error RMS en la ubicación de los puntos de referencia quedó abajo de 1mm, con un error máximo de 2.5mm en un solo punto. Se concluye con comentarios y sugerencias para asistir con futuros trabajos de esta naturaleza.

## **Abstract**

This report documents the construction of two steel templates required as an aid to assembly of the Large Millimetre Telescope. Since the reference points on the templates (guide holes) were to be located to within a plus/minus 2 millimetre error over a 3 x 2.5 metre area, it was decided to use the large coordinate measuring machine at INAOE to mark these points on a pre-assembled template, followed by manual drilling of the guide holes. The manufacturing process was completed within two weeks, in accordance with the project requirements. The RMS error in the location of the reference points was within 1mm, with a maximum error of 2.5mm occurring at one point. The report ends with comments and suggestions which are intended to assist in any future work of this nature.

## 1. Introducción

Este reporte documenta la fabricación de dos plantillas de acero de 3258mm x 2446mm con el apoyo de la Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) de INAOE.

Las plantillas son estructuras de referencia que se utiliza para marcar o verificar puntos críticos durante el proceso de fabricación o armado de componentes mecánicos. Estos puntos críticos típicamente incluyen barrenos para sujetadores, puntos de unión o contacto entre superficies, etc. Por ser utilizadas como guías, es importante que las plantillas tienen un nivel de exactitud dimensional mayor a la precisión con que se espera llevar a cabo dicho proceso de fabricación o armado.

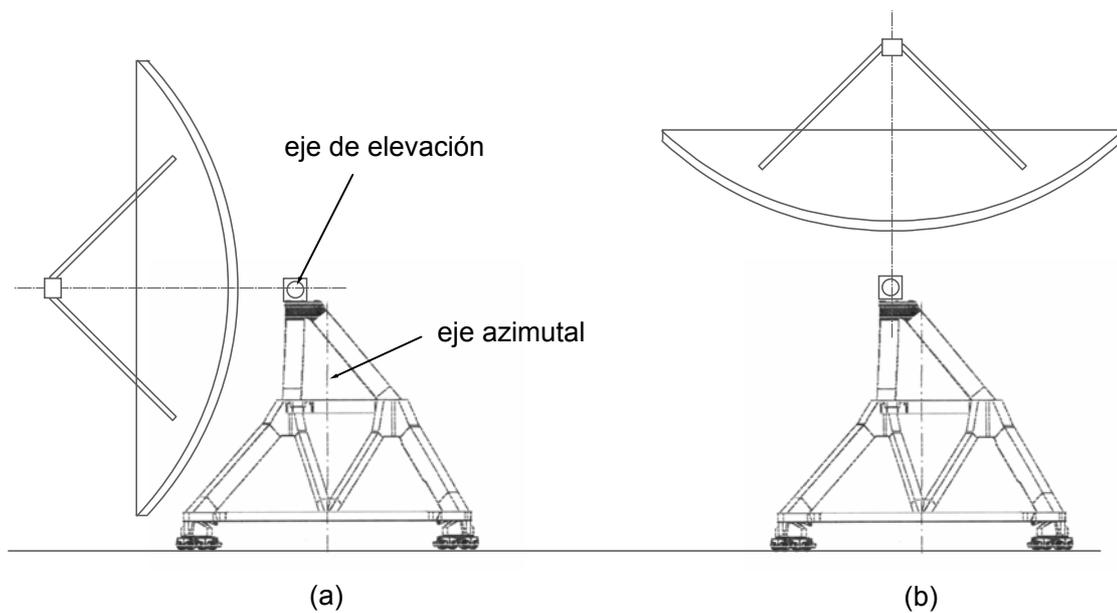
En una reunión el día 6 de Febrero de 2004 en la Dirección General del INAOE, el Ing. Filippo Gabrielli, Coordinador de Sistemas (Antedo) para el armado de los elementos estructurales del Gran Telescopio Milimétrico (GTM), propuso la fabricación de dos plantillas para asistir con la alineación del eje de elevación del telescopio. Después de discutir los detalles del problema, la metodología acordada fue de utilizar la MMC para marcar los centros de los barrenos críticos sobre la plantilla ya cortada y soldada. Esto permite que la plantilla se arma rápidamente con baja precisión, pasando después a la MMC, y utilizando la precisión de la misma para trazar un serie de barrenos con la exactitud final requerida. El error principal de la plantilla dependiera en la habilidad de centrar el taladro respecto a los centros ya marcados por la MMC al momento de perforar la plantilla.

El trabajo completo se realizó durante un periodo de aproximadamente 14 días, en cumplimiento con las necesidades del proyecto GTM. En este reporte se indica los métodos utilizados, los problemas encontrados y se incluye sugerencias para que este reporte puede servir como referencia para alguien interesado en realizar trabajos similares en el futuro.

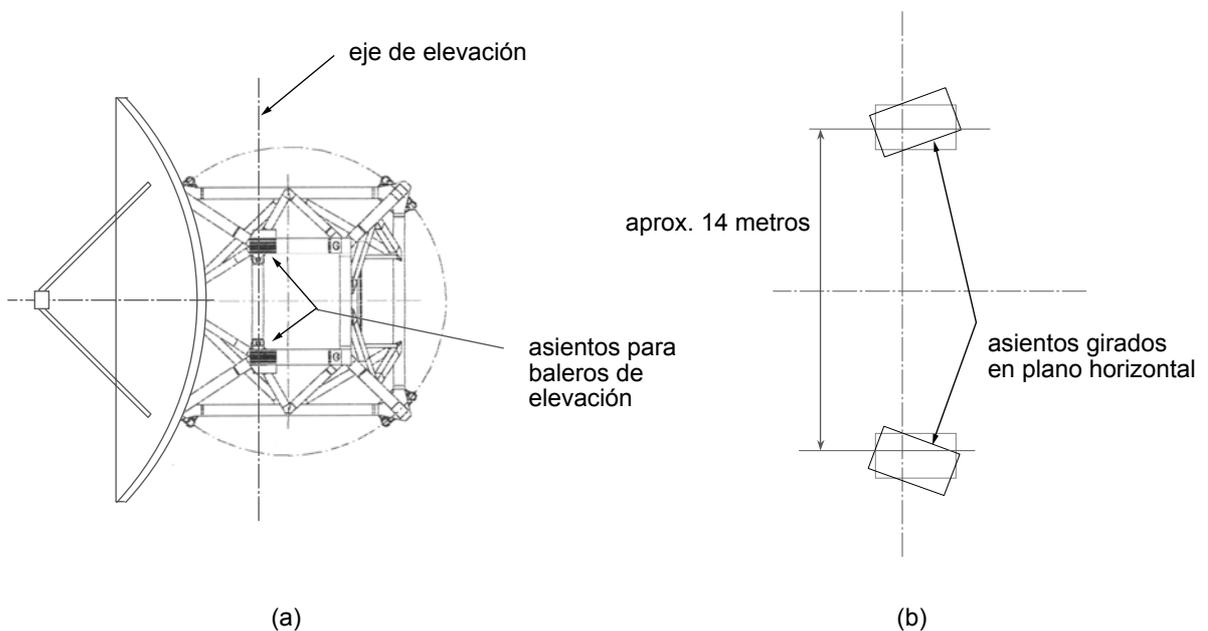
## 2. Plantamiento del problema

El *reflector primario* del GTM tiene facilidad de girar alrededor de dos ejes principales, indicados en la figura 1. El *eje azimutal* es un eje vertical, es decir, normal a la tierra, y permite la rotación del reflector a cualquier punto de la brújula, o hacia cualquier punto del horizonte. El *eje de elevación* pasa horizontalmente atrás del reflector y permite orientar el reflector hacia el horizonte (figura 1a) o hacia el cielo (figura 1b), pasando por cualquier ángulo entre estos extremos. La estructura de soporte para la antena, mostrada en la figura, se llama la *aledada*, y esta fabricada en secciones con placa de acero, y posteriormente unida en el sitio inicialmente con tornillos, luego por soldadura una vez bien alineada. En la figura 2a se muestra una vista plana de la aledada junto con el reflector primario, en donde se puede apreciar que el eje de elevación está definida por dos baleros, ubicados en los dos puntos superiores de la aledada y con una separación de aproximadamente 14 metros.

Después del armado de la aledada, mediciones de la estructura indicaron que los asientos para los baleros de elevación estaban girados en el plano horizontal (figura 2b), lo que no permitió la ubicación correcta de los baleros. El error en los asientos fue atribuido a una metrología inadecuada durante el proceso del armado y soldado de la aledada, agravada por la posición de los asientos en dos extremos de la estructura. Las mediciones subsecuentes indicaron una variación del orden de 10mm entre la separación de los asientos, cuando el diseño indicaba que deben de ser paralelos.



*Figura 1. Los ejes principales del Gran Telescopio Milimetrico*



*Figura 2. Vista en plano mostrando (a) la ubicación de los baleros de elevación, (b) la des-alineación de los asientos de los baleros debido a errores de metrología durante el proceso de soldado de la aledada.*

Para corregir este error, se decidió modificar la ubicación de los barrenos de fijación en los asientos, de tal manera que los baleros quedan atornillados en su posición deseada, a pesar de la des-alineación de los asientos.

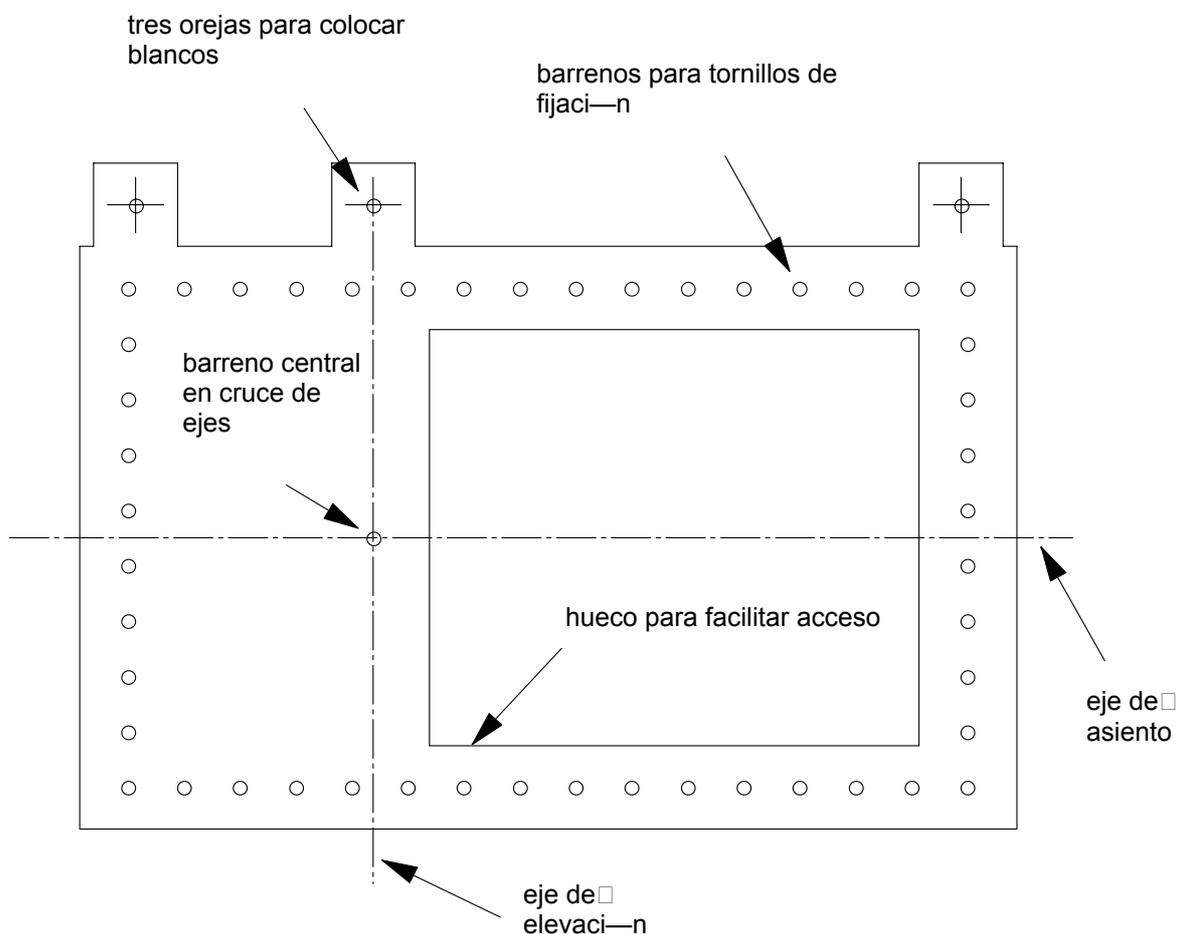


La figura 3 muestra el plano del asiento del balero, donde se puede apreciar un arreglo de 48 barrenos en una configuración rectangular. Estos son los barrenos de fijación para el balero, es decir, la característica principal que debe llevar la plantilla.

Para facilitar la alineación de cada plantilla según los planos de la alidada se requiere incluir un serie de indicadores o puntos de referencia en la plantilla, los cuales se indica a continuación y con referencia a la figura 4:

(i) El eje de elevación y el eje central de la plantilla (eje de asiento) son perpendiculares y deben ser indicados claramente en la plantilla. Se ubica un barreno central donde cruzan los dos ejes.

(ii) Se debe proporcionar tres barrenos adicionales para la colocación de blancos reflectores, los cuales se utilizan con un instrumento de topografía (Estación Total) para asegurar la ubicación de la plantilla según los planos. Dado que los blancos deben ser visibles desde el suelo, sus barrenos se colocan en orejas sobresaliendo del asiento.



*Figura 4. Concepto original de la plantilla mostrando sus características principales.*

Para facilitar los trabajos asociados con la plantilla, se requiere algunas características adicionales:

(iv) El centro de la plantilla debe ser hueco para proporcionar acceso al asiento mientras que las plantillas están colocadas, y para facilitar el trabajo de modificación de los barrenos de fijación.

(v) Se requiere barrenos adicionales para soportar la plantilla encima de algunos tripies durante el proceso de marcado (ve sección 5), y también para tener la posibilidad de fijar ganchos o "eye bolts", para facilitar la maniobra de la plantilla.

#### 4. Diseño de las plantillas

Para el diseño final de las plantillas se consideró la preferencia de construirlas con peso/material mínima y con un mínimo de trabajo de pailería, este último por la necesidad de fabricarlas en tiempos muy reducidos. Después de consultar con algunos talleres de soldadura, se seleccionó solera de acero de 5 pulgadas de ancho (127mm) por 3/8 pulgadas de espesor (9.5mm). La estructura fue

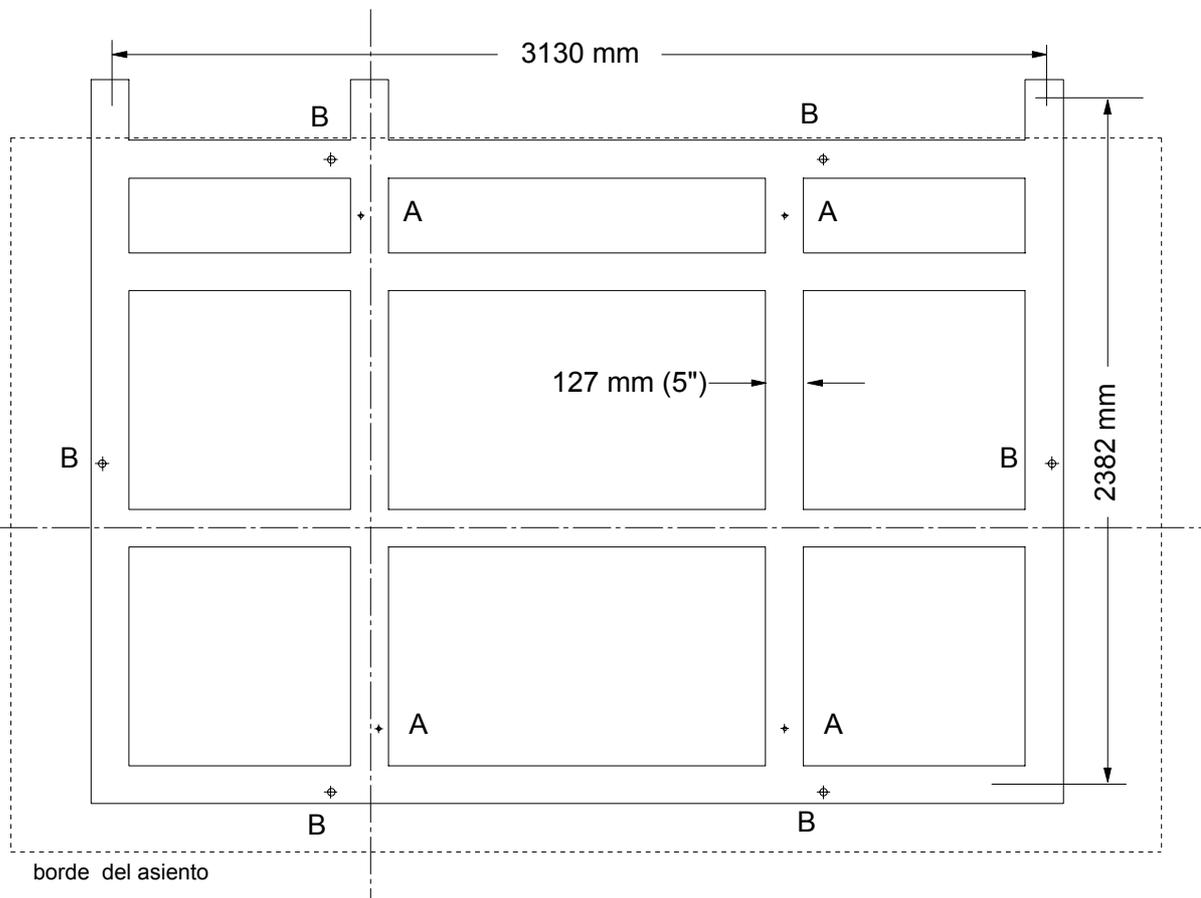
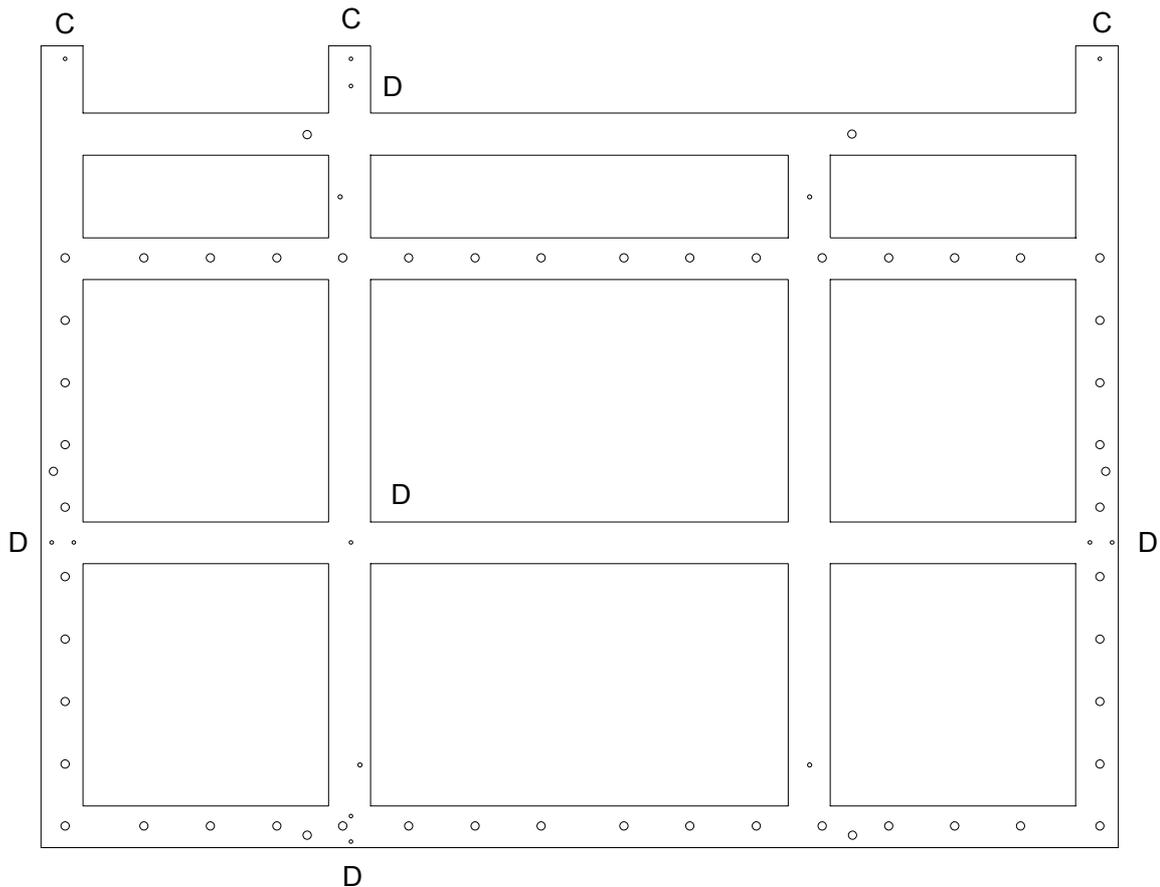


Figura 5. Forma final para la plantilla, mostrando dimensiones globales, ejes principales y la ubicación de los barrenos para maniobra (A) y para tripies de apoyo (B).

diseñado alineando solera con los ejes principales y los ejes de barrenos de fijación. Su forma final se muestra en la figura 5. En esta figura se indica el borde del asiento relativo a la plantilla. Se puede apreciar que solamente las tres orejas para los blancos reflectoras sobresalen del asiento, haciendolos visibles desde el suelo abajo.

La figura 6 muestra nuevamente la plantilla pero en su forma final, ahora con el juego completo de barrenos. En total hay 69 barrenos; 48 de fijación para el balero, 6 de apoyo para los tripies, 4 para maniobra, 3 para blancos, 8 para marcar los ejes principales, y uno para marcar el cruce de los ejes.



*Figura 6. Forma final para la plantilla, mostrando el juego completo de barrenos. Se indica la posición de los barrenos para blancos (C) y para marcar los ejes principales (D).*

El diseño fue realizado usando un paquete de dibujo vectorial a escala (MacDraw Pro) en una computadora Macintosh, ya que la simplicidad de las plantillas no necesitaba herramienta de diseño mas sofisticada. El mismo paquete facilito la preparación de los dibujos técnicos usados en la construcción de las plantillas y permitio realizar la planeación de las trayectorias de marcado de los barrenos de las plantillas en la máquina de medición de INAOE (ve sección 5).

## 5. Fabricación

La fabricación de las plantillas fue realizada por el taller de pailería "Grupo Industrial PJ" en su planta en la ciudad de Puebla, con un costo de \$5,500.00 MN sin IVA por pieza, y un tiempo de entrega de 10 días según su cotización. Este trabajo consistió en el corte y soldado de la estructura de solera y la ubicación de los 10 barrenos de apoyo/maniobra (A) y (B) mostrados en la figura 5. La cotización de la empresa se incluye en el anexo 1. El dibujo de trabajo para esta primera fase se presenta en el anexo 2.

Dado que la fase 1 no incluyó los barrenos de referencia ni a los barrenos de sujeción del balero, no se solicitó una precisión especial. El requerimiento principal fue lograr una buena planicidad de la plantilla a la hora de realizar el proceso de soldadura. Antes de soldar, los tiros de solera recibieron una chamfa en sus extremidades y en ambos lados, esto para recibir el cordón de soldadura, lo cual fue rebajado posteriormente para presentar una superficie plana en ambas caras.

Las dos plantillas fueron entregadas al INAOE el día 21 de Febrero de 2004, 15 días después de la discusión inicial con el Ingeniero Gabrielli, y solamente 1.5 días después del inicio del trabajo por la empresa Grupo Industrial PJ.



*Figura 7. Alineando la plantilla en el área de trabajo de la máquina de medición. El punzón está visible colgando de la placa horizontal en la cabeza de la máquina.*

La segunda fase consistió en usar la máquina de medición de INAOE para marcar los centros de los barrenos críticos de la plantilla, para posteriormente realizar el barrenado en cada punto marcado. Se fabricó un punzón en acero para marcar, luego colocándolo en la cabeza de la máquina, a una altura fija. El punzón tenía movimiento vertical por medio de su cilindro de apoyo, de tal manera que se cayó por gravedad sobre la superficie de la plantilla. La plantilla fue montada abajo del punzón, soportada con seis tripies de acero, mostrado en la figura 7.

Para minimizar la tarea de programación de la máquina y aumentar los tiempos del proceso, la máquina fue programada con una trayectoria continua en el plano horizontal. Esta trayectoria pasaba por el centro de cada barreno por marcar en dos direcciones perpendiculares (X y Y), de tal manera que se eliminó la necesidad de mover la máquina en el plano vertical (Z). La trayectoria se presenta en el anexo 3. Para utilizar este proceso, fue importante alinear los dos ejes principales de la plantilla con los ejes horizontales (Y) y (X) de la máquina, aunque la precisión requerida no fue muy alta en este respecto, porque el ancho de la solera utilizado fue suficiente para absorber un error de alineación de algunos milímetros. El proceso de alineación de la plantilla se puede observar en la figura 7.

Durante la alineación de las plantillas respecto a los ejes de la MMC, se encontró un error de perpendicularidad en las plantillas de hasta 4mm, tomando mediciones en sus esquinas.

El proceso de marcado presentó algunas dificultades, las cuales se presentan a continuación, con sus remedios.

*Problema 1:* Los seis puntos de apoyo no se presentaron suficientes para mantener la plantilla en un plano horizontal requerido durante el proceso de marcado, encontrando una deformación de la plantilla por gravedad de hasta 15mm afuera del plano horizontal. Esta variación fue reducida a 5mm proporcionando apoyo adicional en las esquinas de la plantilla.

*Problema 2:* Debido a variaciones en la calidad del acero usado en la construcción de la plantilla, y específicamente una dureza en algunas regiones que fue menor que la del punzón, este mismo empezó a rayar profundamente la superficie de la plantilla y hasta quedarse atorrada en la superficie de la plantilla. En estos momentos fue necesario parar la MMC para prevenir que la máquina hallaba la plantilla de sus soportes. El problema ocurrió principalmente en la vecindad de las uniones de solera, donde algunas cavidades abiertas quedaron en la soldadura.

Para eliminar este problema se modificó el punto del punzón para dejarlo ligeramente redondeado. Adicionalmente, a la hora de realizar el trazado, un asistente quedó al lado del punzón para levantarlo manualmente de la plantilla en las regiones donde su marcado no fue necesario, de esta manera reduciendo el contacto entre punzón y plantilla a un mínimo.

Para aumentar la visibilidad del patrón marcado, la plantilla fue pintada con tinta industrial (azul de prusia) antes de realizar el proceso de marcado.

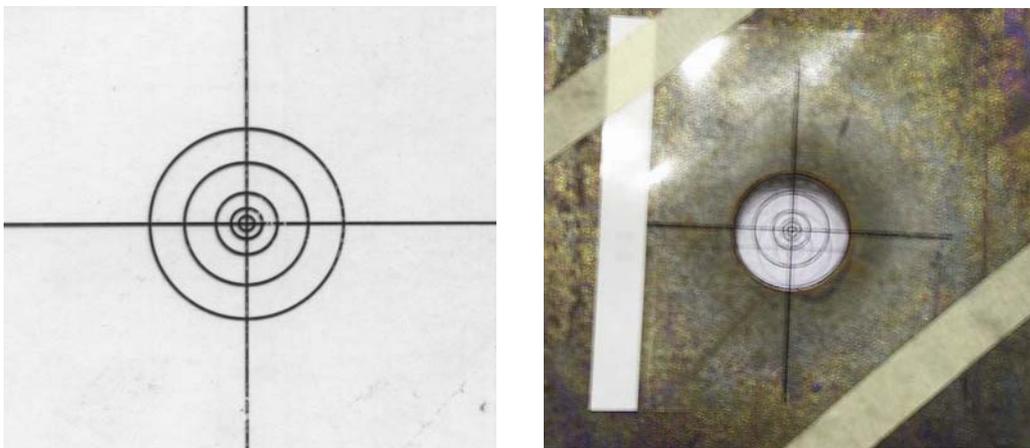
Una vez marcados, se colocó las plantillas sobre polines en el piso para la perforación de los barrenos. Para esta tarea se utilizó un taladro industrial portátil montado en una base magnética comercial diseñada por tal propósito. Antes de iniciar el barrenado, se marcó manualmente el centro de cada barreno con un punzón, usando las líneas previamente trazadas como guía.

## 6. Verificación

El proceso de verificación de las plantillas ya fabricadas se realizó con dos procedimientos descritos a continuación.

### *Verificación proceso 1:*

Un dibujo con forma de círculos concéntricos sobre una cruz (figura 8) fue impreso sobre hoja de transparencia y utilizado como blanco de referencia para revisar la ubicación de cada barreno respecto a las líneas marcadas por la MMC en la plantilla. De esta manera obtuvimos el error local de cada barreno respecto al esquema global del trazado.



*Figura 8. Verificación de la plantilla después de realizar el barrenado. Izquierda: blanco impreso sobre transparencia; derecha: blanco sobre un barreno.*

numero de barrenos	error maximo / mm
84	< 0.5
2	0.5
3	1.0
3	1.5
3	2.0
1	2.5

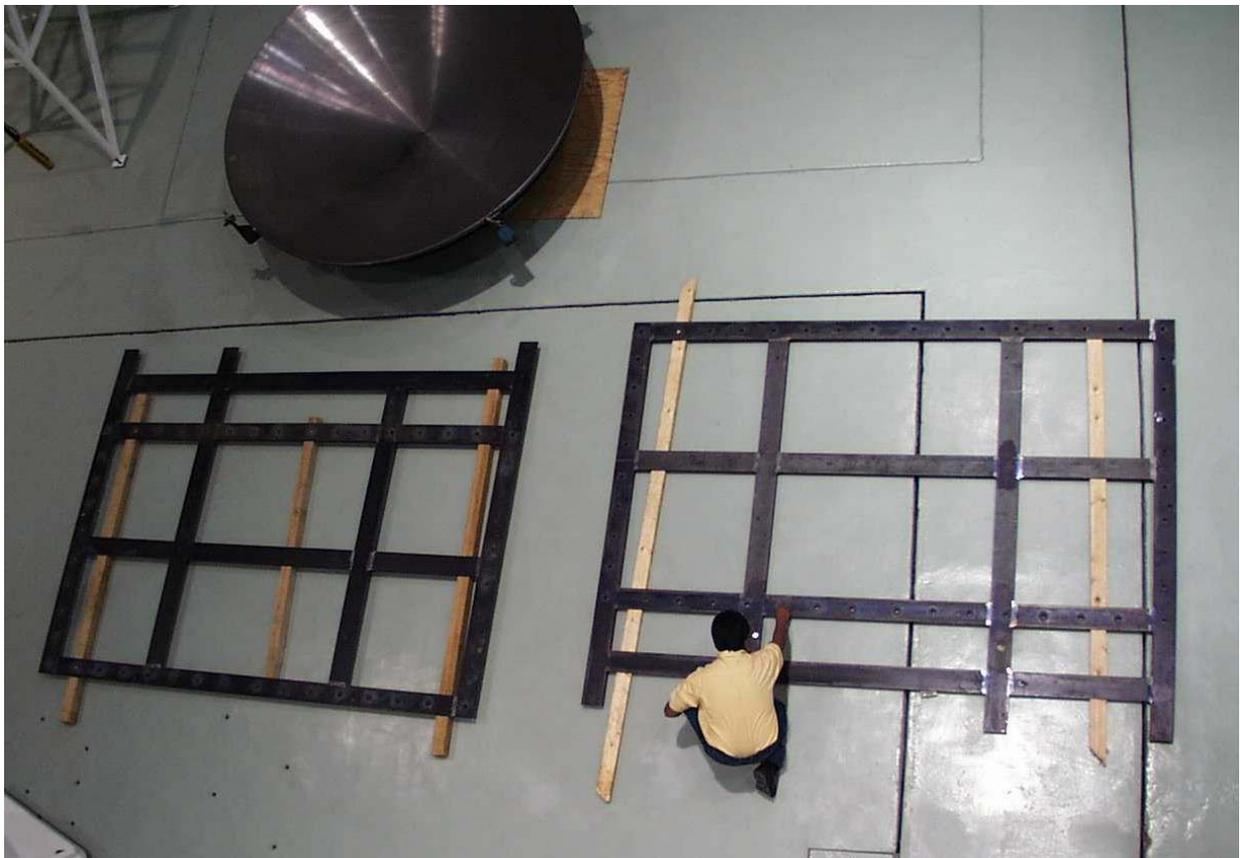
*Tabla 1. Resultados del primer proceso de verificación.*

En la tabla 1 se divide el número total de barrenos (96 para las dos plantillas) según la magnitud de su error máximo, sin considerar su polaridad en X o Y. Usando estos datos el error mediano para todos los barrenos es de 0.18mm, con un error R.M.S. de 0.30mm. Tomando un escenario "worst case" en donde cada barreno tiene un error mínimo de 0.5mm, encontramos que el error mediano es de 0.6mm, mientras el error R.M.S. es de 0.51mm.

### *Verificación proceso 2:*

Se utilizó una cinta de fibra de carbono con graduaciones cada 0.5mm (flexometro) para medir en línea recta entre los barrenos esquinales de la plantilla. Se tomaron 10 mediciones en cada plantilla, usando distancias entre los barrenos de las esquinas en forma recta y diagonal, y las distancias entre las esquinas y el barreno marcando el cruce de los ejes principales de la plantilla. Este proceso nos proporcionó el error acumulativo de la plantilla, mostrando posibles errores en escala y/o perpendicularidad.

De un total de 20 mediciones, 6 tuvieron un error de menos 0.5mm, los demás con errores de 0.5mm (4), 1mm (7), 1.5mm (2) y 2mm (1). El error mediano es de 0.7mm, y error R.M.S. de 0.53mm. Tomando un escenario "worst case" en donde cada medición tiene un error mínimo de 0.5mm, el error mediano es de 0.82mm, y el error R.M.S. es de 0.90mm.



*Figura 9. Tomando mediciones de la plantilla después de realizar el barrenado.*

## **7. Entrega**

Las plantillas fueron trasladadas al sitio del telescopio pocos días después de su fabricación. Según una correspondencia del Ing. Gabrielli, primero se hizo un control sobre el eje de elevación para verificar los barrenos existentes. Posteriormente se realizó la alineación de las plantillas sobre la

aledada, para después soldarlas sobre las superficies de apoyo de los baleros. Durante las semanas del 15 y 22 de Marzo se realizó la tarea de modificar los barrenos existentes, usando las plantillas como nueva referencia. Para facilitar este trabajo fue necesario recortar secciones de las plantillas, las cuales quedaron inservibles después del trabajo. Según al Ing. Gabrielli el trabajo fue completado con éxito.

Las figuras 10 y 11 muestran los baleros ya instalados correctamente en la aledada algunas semanas más tarde.



*Figura 10. Colocación del segundo balero de elevación, 10 abril 2004. Se puede observar las plataformas temporales utilizadas para dar acceso a los asientos durante el trabajo con las plantillas.*

## **8. Conclusiones**

En este reporte se documentó el proceso de fabricación de plantillas de alineación para apoyar en la construcción del Gran Telescopio Milimétrico. El uso de la Máquina de Medición por Coordenadas de INAOE para marcar las plantillas aseguró una buena precisión de las mismas, y ayudó a reducir los tiempos de su fabricación, ya que se eliminó la necesidad de trabajos de precisión por parte del proveedor externo.

El trabajo completo se realizó dentro de dos semanas hábiles, minimizando retrasos en la construcción del GTM. La verificación de las plantillas antes de su entrega al Proyecto GTM indicó un error R.M.S. entre 0.3mm hasta 0.9mm, basado en mediciones locales y globales, el valor mayor suponiendo un error mínima de 0.5mm en la ubicación de cada barreno de la plantilla.



*Figura 11. Ambos baleros de elevación colocados en la estructura del telescopio.*

Por el éxito de este trabajo, el método puede ser considerado para trabajos futuros una vez que la MMC queda disocupada de sus labores en relación a los paneles del GTM. Sin embargo vale la pena considerar modificaciones en el proceso:

1. En la ausencia de una mesa plana para el apoyo de las plantillas durante su marcado en la MMC, se recomienda dar mayor consideración para lograr su planicidad, sea por la ubicación de cartabones, mejor análisis de los puntos de apoyo, o un número mayor de dichos puntos.
2. Se debe considerar el uso de un marcador especial para reducir la fricción entre el punzón y la plantilla. Esto puede tomar forma de un bolígrafo, con punto de balín con capaz de rodear libremente sobre la superficie de la plantilla. Otra posibilidad que vale la pena explorar es el uso de una tinta sensible a la luz, la cual se puede marcar con el haz enfocada de un láser montada en la cabeza de la MMC. Esto representará lo más ideal, por tener cero fricción.
3. Si no hay alternativa al uso de un punzón mecánico de forma sencillo, se recomienda la activación del eje Z e la MMC, para minimizar el tiempo de contacto con la plantilla.

4. El error principal en el proceso es el barrenado manual de los puntos ya marcados. Es importante tomar el tiempo necesario para realizar este proceso (el marcado de los centros con punzon, luego el barrenado) para minimizar el error humano. Tambien se recomienda el uso de un taladro vertical lo mas pesado disponible.

5. Para asistir con la verificación de barrenos o otros puntos críticos, se debe fabricar un blanco especial en un tornillo o CNC, que entra justamente al barreno sin juego, y que termina en un pico marcando claramente el centro de dicho barreno.

---

02-23-04 15:00

91 22 447723

\*GRUPO\*INDUSTRIAL PJ

001

**Grupo Industrial PJ SA de CV**

**De:** Grupo Industrial PJ SA de CV [lucas.zamora@maxcom.net.mx]  
**Enviado:** Lunes, 23 de Febrero de 2004 02:08 p.m.  
**Para:** David M. Gale  
**Asunto:** RV: Cotizacion  
**Importancia:** Alta

At'n. Dr. David M. Gale.  
Instituto Nacional de Astrofisica y Electronica.

Le envio la recotizacion de las plantillas que se estan fabricando y que sufrieron algunos cambios en cuanto al material, originalmente se cotizaron en solera de 5/16X5", finalmente se fabricaron en solera de 3/8X5"

**COTIZACION**

**Fabricacion de plantilla a base de solera comercial de 3/8X5" de 2.5 mts de ancho X 3.3 mts de largo con barrenos de 25mm y 2 mm segun especificaciones proporcionadas por usted.**

**El costo unitario es de \$ 5,500.00 MN (CINCO MIL QUINIENTOS PESOS 00/100 MN)**

**Este precio no incluye iva.**

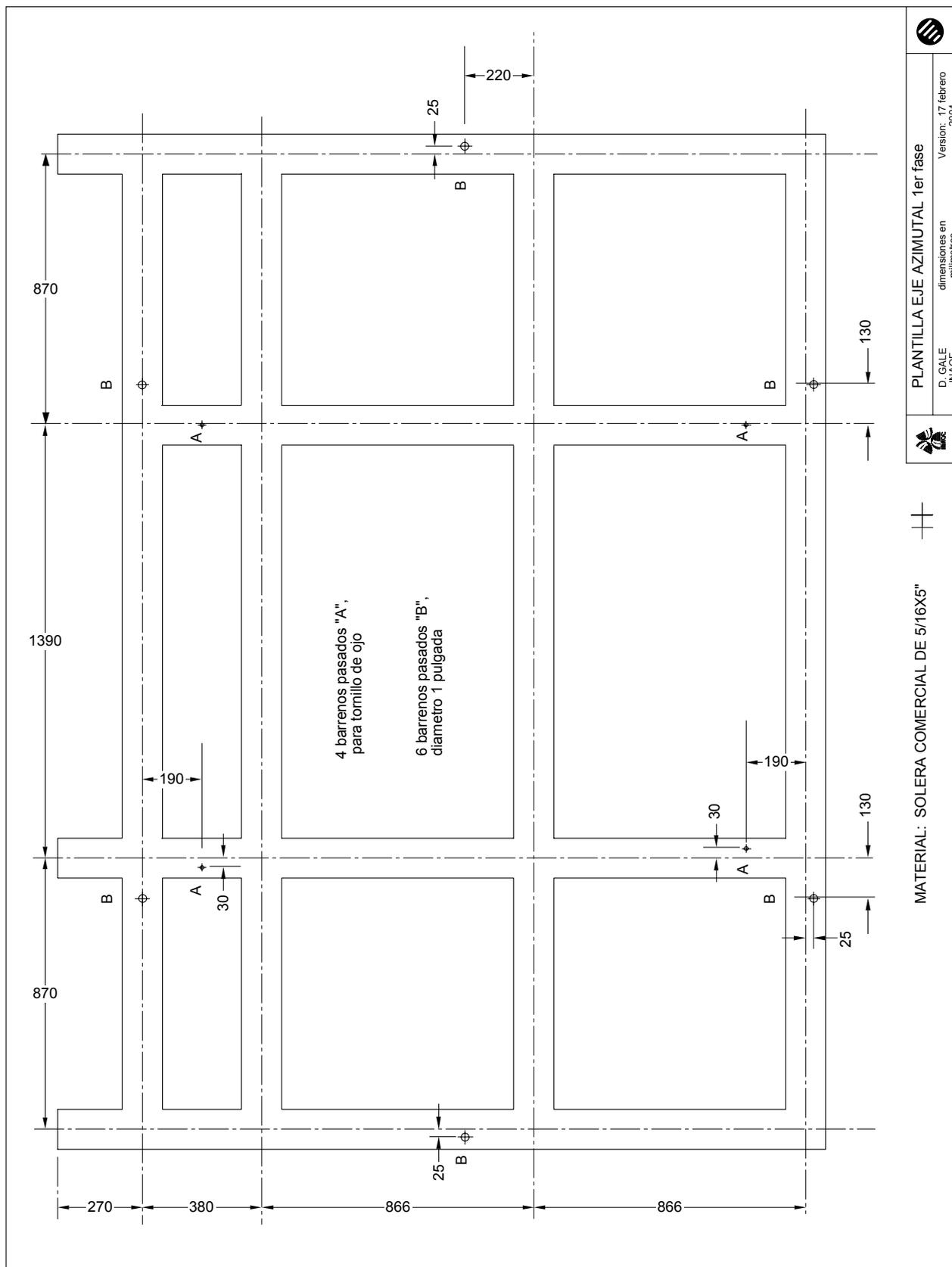
En cuanto al traslado de las piezas al sitio que Usted nos indico, quiero comentarle que debido a la carga de trabajo de nuestros transportes, es imposible que le realizemos el traslado, por lo tanto las piezas seran entregadas en instituto.

Sin mas por el momento, estoy a sus ordenes.

Atte.

*Lucas Zamora G.  
Ventas - Produccion.  
Grupo Industrial PJ.  
Tel. (01222) 2447723  
E-mail, lucas.zamora@maxcom.net.mx*

Anexo 1. Cotización de la empresa Poblana Grupo Industrial PJ para la fabricación de una plantilla de solera de acero.



Anexo 2. Dibujo de ingeniería somitada al fabricante para la construcción de la plantilla, primera fase.

