

Plantillas de precisión para
la construcción de
detectores de muones

J. Berdugo,
C. Burgos,
M. Cerrada

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse a la Unidad de Gestión de Recursos de la Información, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995

NIPO: 238-95-010-2

ISSN: 0214-087X

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

440104, 662110

MUON DETECTION, MUONS, WIRES, WIRE SPARK CHAMBERS, CERN,
OPTIMIZATION

"Plantillas de precisión para la construcción de detectores de muones"

Berdugo, J.; Burgos, C.; Cerrada, M.
22 pp. 8 figs. 2 refs.

Resumen

En el presente informe se describe el procedimiento utilizado para conseguir optimizar la precisión en el posicionado de planos de hilos sensores en cámaras de muones del experimento L3 del CERN. Las plantillas producidas en el CIEMAT han permitido garantizar una precisión del orden de 10 micras en dimensiones de aproximadamente 3 metros.

"Precision templates for glueing wire holding pieces to chamber frames"

Berdugo, J.; Burgos, C.; Cerrada, M.
22 pp. 8 figs. 2 refs.

Abstract

In the present report we describe the procedure which has been used in order to optimize the precision obtained when positioning forward backward muon chamber sensor wire planes of the L3 experiment at CERN. With templates produced at CIEMAT a precision of about 10 microns, in sizes of the order of 3 meters, has been achieved.

PLANTILLAS DE PRECISION PARA LA CONSTRUCCION DE DETECTORES DE MUONES

J. Berdugo, C. Burgos, y M. Cerrada

1.- Introducción.

Los detectores de partículas que se utilizan en los experimentos actuales han alcanzado un elevado nivel de complejidad. Su diseño, construcción, puesta a punto y operación, ya no es posible sin el trabajo conjunto de un equipo en el que no sólo hay científicos, sino también ingenieros y técnicos con especialización muy variada. La tecnología requerida está, a menudo, en el límite de lo asequible. De ahí la estrecha relación existente hoy en día entre el desarrollo de la física experimental de altas energías y el desarrollo tecnológico en muy diversos campos.

El aspecto al que se refiere este trabajo es un ejemplo de los numerosos problemas técnicos que hay que resolver a la hora de construir un detector. Tiene que ver con una característica muy frecuente de los modernos experimentos: es preciso disponer de un sistema formado por detectores de gran tamaño (del orden de varios metros), cada uno de los cuales contiene un buen número de celdas, o unidades detectoras, cuyas posiciones deben ser conocidas con una enorme precisión (del orden de varias micras).

El detector en cuestión es el espectrómetro de muones delantero y posterior ("forward - backward") del experimento L3, instalado en el acelerador LEP del CERN. El problema que había que resolver era el de posicionar los planos de hilos sensores de las aproximadamente 70 celdas de que consta cada una de las 96 cámaras de muones que componen el espectrómetro. La solución del problema ha requerido la fabricación de unas plantillas de precisión. Dichas plantillas fueron utilizadas en la producción de todas las 96 cámaras y han sido fabricadas en el CIEMAT. Con ellas ha sido posible garantizar, en distancias de hasta 3 metros, precisiones de posicionado inferiores a las 10 micras. Describir el procedimiento utilizado en su fabricación, así como los resultados obtenidos a partir de las medidas realizadas en el proceso de verificación, es el objetivo principal de este informe que está organizado de la siguiente manera:

- Con el fin de ayudar a comprender mejor el papel que han jugado las plantillas, y sus requisitos técnicos, la sección 2 incluye una breve descripción de las cámaras de deriva que forman el espectrómetro de muones del detector L3, y la precisión que se pretende obtener con ellas en la medida de trayectorias.
- El proceso seguido en la fabricación de las plantillas viene explicado en la sección 3.

- La sección 4 contiene una descripción detallada de las medidas realizadas para verificación, así como de los resultados obtenidos.
- Finalmente en la sección 5 se presentan, de forma resumida, nuestras conclusiones.

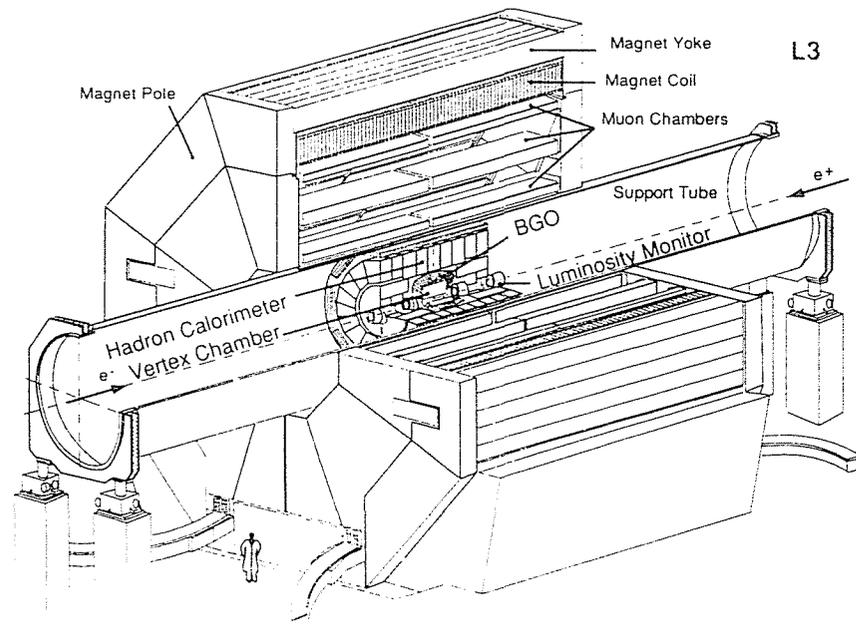


Figura 1. Esquema general del detector L3 sin incluir las cámaras de muones “forward - backward”.

2.- Las cámaras de muones “forward - backward”

En la figura 1 se muestra, de forma esquemática, el detector L3 y se indican sus componentes más importantes. Información detallada sobre todos ellos puede encontrarse en [1]. Una de las características fundamentales de L3 es la de medir, con muy buena resolución, los muones producidos dentro del ángulo sólido cubierto por las 3 capas de cámaras que configuran la parte más externa del detector. En una primera etapa, L3 sólo contaba con cámaras en la zona central del “barril”. La necesidad de extender la región de ángulo sólido de forma que cubriese también la zona más hacia adelante (y hacia atrás) del detector fué lo que motivó la construcción de cámaras “forward - backward”. La idea fué colocar estas nuevas cámaras en la proximidad de cada una de las dos puertas del imán, una capa en su parte interna (FI), y dos capas en su parte externa (FM y FO), tal como se indica en la figuras 2a y 2b.

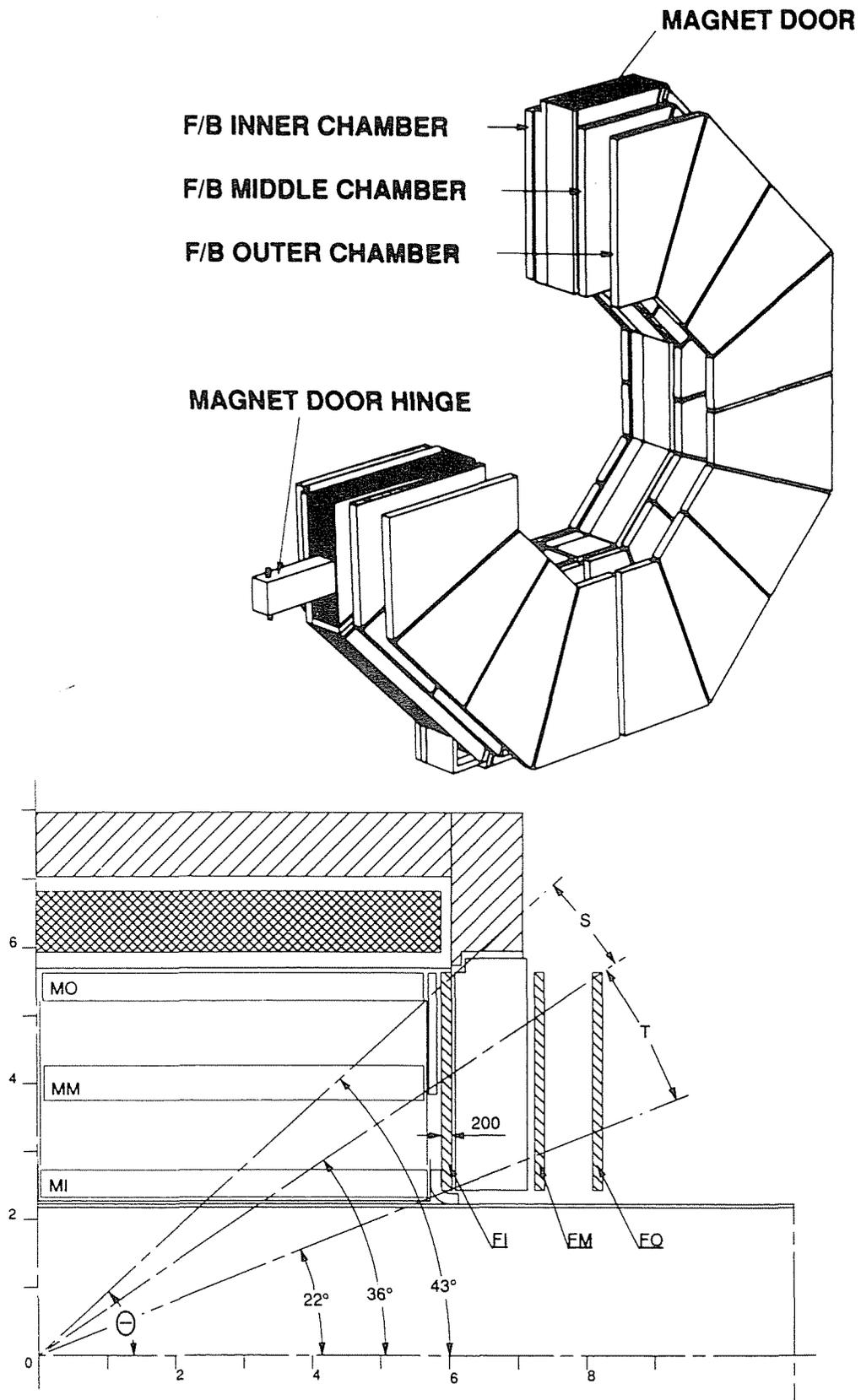


Figura 2. a) Posición de las 3 capas de cámaras "forward - backward" con respecto a las puertas del imán. b) Vista lateral de un octante del detector de muones mostrando la posición de las cámaras del "barril" (MI, MM y MO) y de las cámaras "forward - backward" (FI, FM y FO).

En cada puerta hay pues 16 cámaras del tipo FI, 16 del tipo FM y 16 del tipo FO. El sistema se completa incluyendo una bobina para producir, en el hierro de la puerta del imán, un campo magnético toroidal. La geometría del detector tiene, entre otras consecuencias, la de requerir que las cámaras forward-backward sean trapezoidales, con las complicaciones adicionales que ello conlleva. La instalación de las 96 cámaras se ha completado en el primer trimestre de 1995.

Cada cámara consta a su vez de 3 capas (ver figura 3). Dos de ellas se usarán para medir la coordenada X (planos X y X'), que es donde hay mayores requisitos de precisión y la tercera para medir la coordenada Y. En cada capa hay celdas de detección, todas ellas con la misma estructura: una configuración eléctrica determinada por vigas de aluminio en forma de I a potencial negativo (5 kV), y un plano de 4 hilos sensores en el medio a potencial positivo (4 KV). La estructura multihilo de cada celda permite pasar de una resolución por hilo de 200 micras, a una resolución global en X de 70 micras ($200/\sqrt{8}$) y una resolución en Y de 100 micras ($200/\sqrt{4}$).

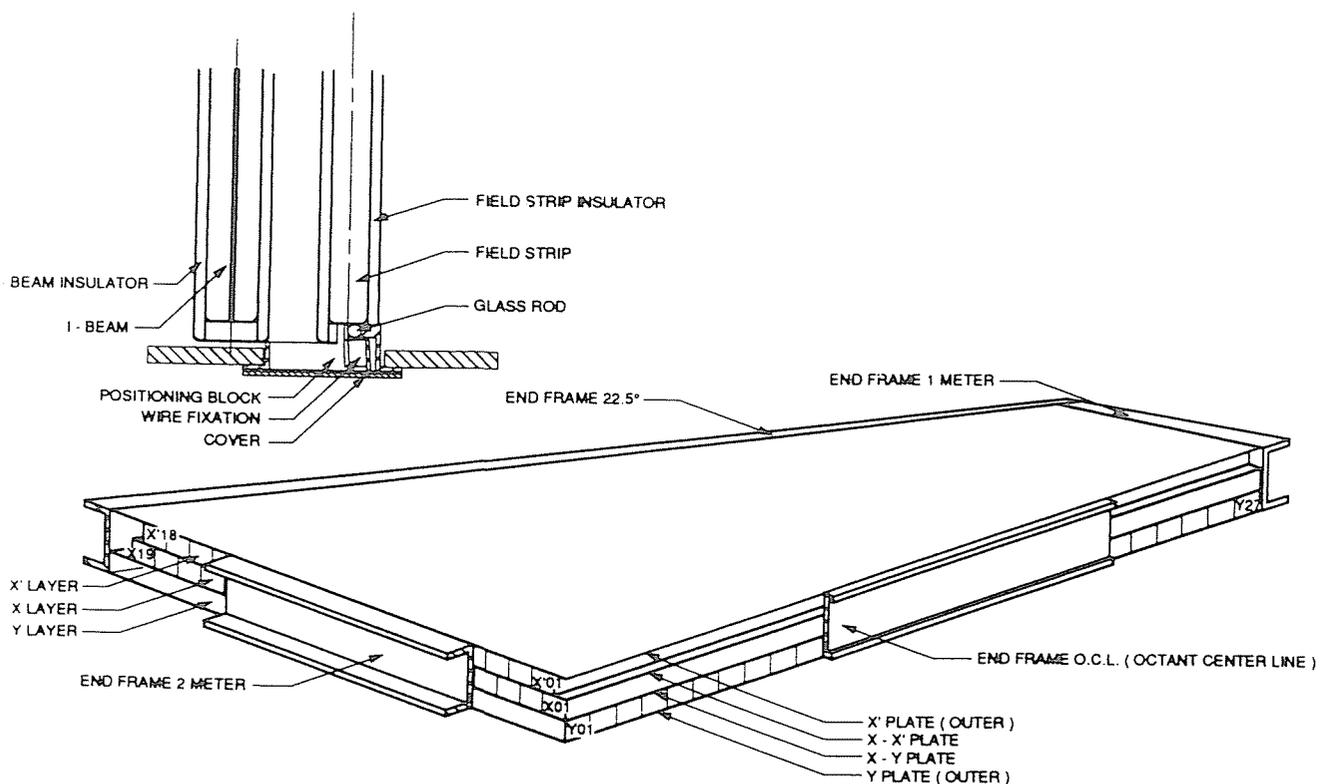


Figura 3. Boceto de una cámara "forward - backward"

La medida de puntos de la trayectoria seguida por cada uno de los muones producidos es el objetivo de estas cámaras. A partir de los puntos se puede reconstruir la trayecto-

ria y de ahí determinar el valor del momento. Es precisamente la precisión que se quiere obtener en el momento, la que determina la precisión con que hay que medir los puntos de la trayectoria. No es posible medir cada punto con precisión mejor que la que, de forma intrínseca, proporcionan las cámaras de deriva, esto es las 70 micras en X y las 100 en Y, que mencionábamos anteriormente. Por tanto lo que se debe intentar es que cualquier otro error de tipo sistemático sea muy inferior para que al sumar, cuadráticamente, errores, no se deteriore significativamente la resolución intrínseca. Típicos errores sistemáticos a controlar son, por ejemplo, el relativo a un no perfecto alineamiento de las diferentes capas de cámaras y el relativo a un mal conocimiento del posicionado de los planos de hilos sensores dentro de cada cámara. En este trabajo nos estamos limitando al segundo tipo de error.

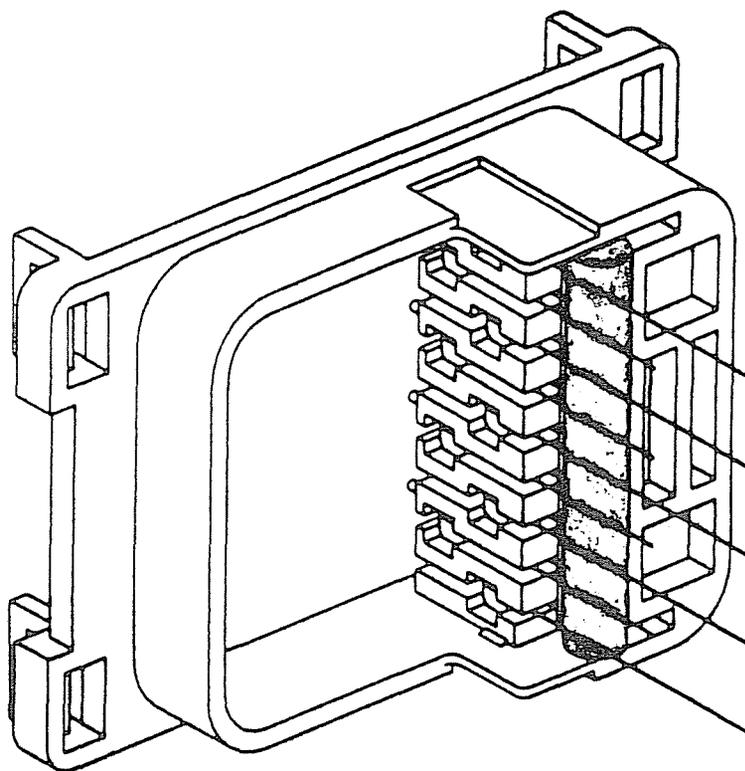


Figura 4. Pieza soporte del cilindro de cristal que sirve para sujetar y posicionar el plano de hilos sensores en cada celda.

La posición de cada plano de hilos sensores viene definida por un cilindro de cristal en cada uno de los dos extremos, tal como se indica de forma esquemática en la figura 4. Por tanto, el sistema de fijación de las piezas que contienen a los cilindros de cristal es determinante a la hora de conseguir que la posición de los planos de hilos sea conocida con la máxima precisión. El sistema elegido ha sido el de fijar dichas piezas a los perfiles (endframes) que componen el marco de la cámara mediante un proceso de pegado. En dicho proceso, se utiliza una plantilla con filas de pines, también cilíndricos, ordenados por parejas, sobre las que se posicionan, en el momento de pegar, los cilindros de cristal tal

como se indica en la figura 5. El uso de la plantilla, que es del mismo material que los endframes, esto es, aluminio, permite un proceso de producción en serie. No hay necesidad de controlar temperatura en la fase de pegado, y la uniformidad en el posicionado de los hilos en todas las cámaras está garantizada. Por contra, y ya que la precisión pasa a depender fundamentalmente de la plantilla, el problema se traslada a la fabricación y verificación de la misma. El objetivo fijado fué que las tolerancias en las distancias entre cada pareja de pines de la plantilla no fueran superiores a las 10 micras. Baste para dar una idea de la dificultad del problema el hecho de que estas distancias pueden ser de hasta 3 metros, y que a esas distancias 10 micras es el efecto de una variación de temperatura de algo más de una décima de grado.

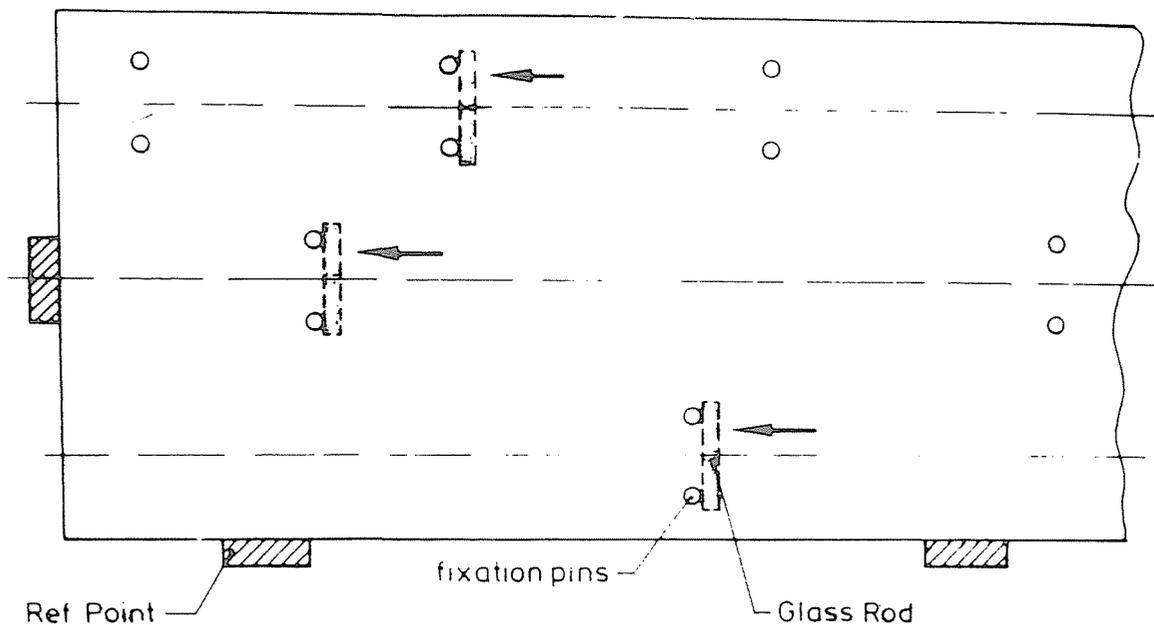


Figura 5. Esquema descriptivo del método de utilización de la plantilla durante el proceso de pegado de las piezas con los cilindros de cristal mostradas en la Figura 4 a los "endframes" de aluminio.

Hubo que hacer finalmente 2 plantillas. La primera se utilizó para posicionar los cilindros de cristal correspondientes a los planos de hilos de la capas X y X' en los endframes de longitud 2 metros y 1 metro respectivamente, así como los correspondientes a los planos de hilos de la capa Y en el endframe perpendicular a los dos anteriores y de 3 metros de longitud. Esta plantilla tiene en total 21 pares de pines X, 20 pares de pines X' y 27 pares de pines Y. La distancia entre pares adyacentes corresponde lógicamente a la dimensión de

la celda, que es de 105 mm. La segunda plantilla se usó para posicionar los planos de hilos en el endframe que está opuesto al de 3 metros y forma con él un ángulo de 22.5 grados (ver figura 3). Este endframe es el más largo, unos 3.3 metros, y debido al ángulo que forma con respecto a los otros, las distancias entre los pares de pines correspondientes son diferentes a las de la otra plantilla. En esta segunda plantilla hay 9 pares de pines X, 10 pares de pines X' y 31 pares de pines Y.

3.- El proceso de fabricación.

El material utilizado ha sido un aluminio con especiales propiedades de planitud y acabado superficial. Se partió de dos pletinas de 30 mm de espesor y dimensiones (en mm) de 700 * 3000 y 300 * 3650 respectivamente. La mecanización tuvo lugar en la fresa horizontal de control numérico, de 4 metros de recorrido, de los Talleres Generales del CIEMAT (Fig. 6).

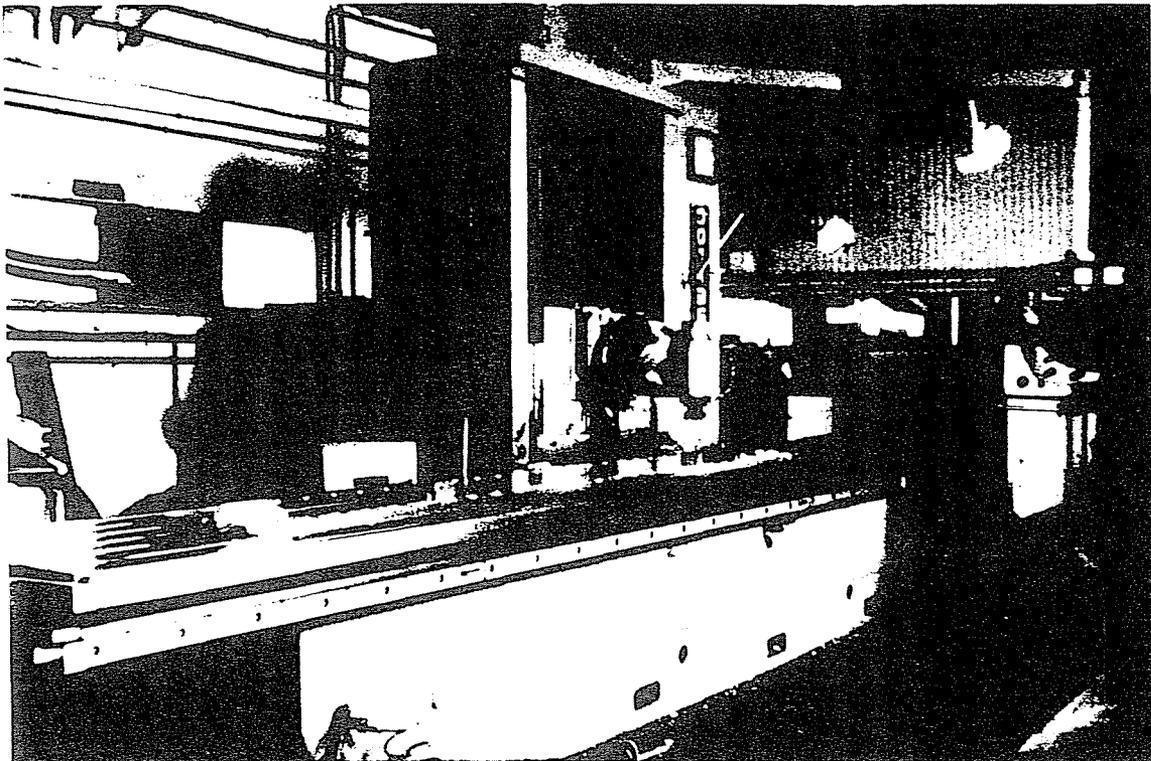


Figura 6. Foto de la fresa de control numérico de los Talleres Generales del CIEMAT.

Esta máquina fue sometida previamente a una serie de estudios sistemáticos con objeto de evaluar sus prestaciones. Para ello utilizamos nuestro equipo de interferometría láser [2]. El proceso consistió en realizar desplazamientos del carro y comparar, en cada uno de ellos, las lecturas del láser con las del control numérico de la máquina. Estas pruebas se realizaron

durante varios días, cubriendo todo el rango de la máquina, bajo diferentes configuraciones y distintas condiciones de temperatura ambiental.

Una vez que los efectos debidos a la temperatura fueron tratados de forma adecuada, los resultados obtenidos mostraron que en la parte central de la máquina (los 2 metros centrales) había un excelente acuerdo entre lo que decían el láser y el control numérico. Ciertamente en esta región (ver Figura 7), la precisión de la máquina es del orden de las 5 micras. Fuera de esa región se aprecian efectos de borde que pueden llegar a ser de hasta 25 micras (en nuestro caso estos efectos no pudieron ser ignorados dada la precisión que se pretendía conseguir).

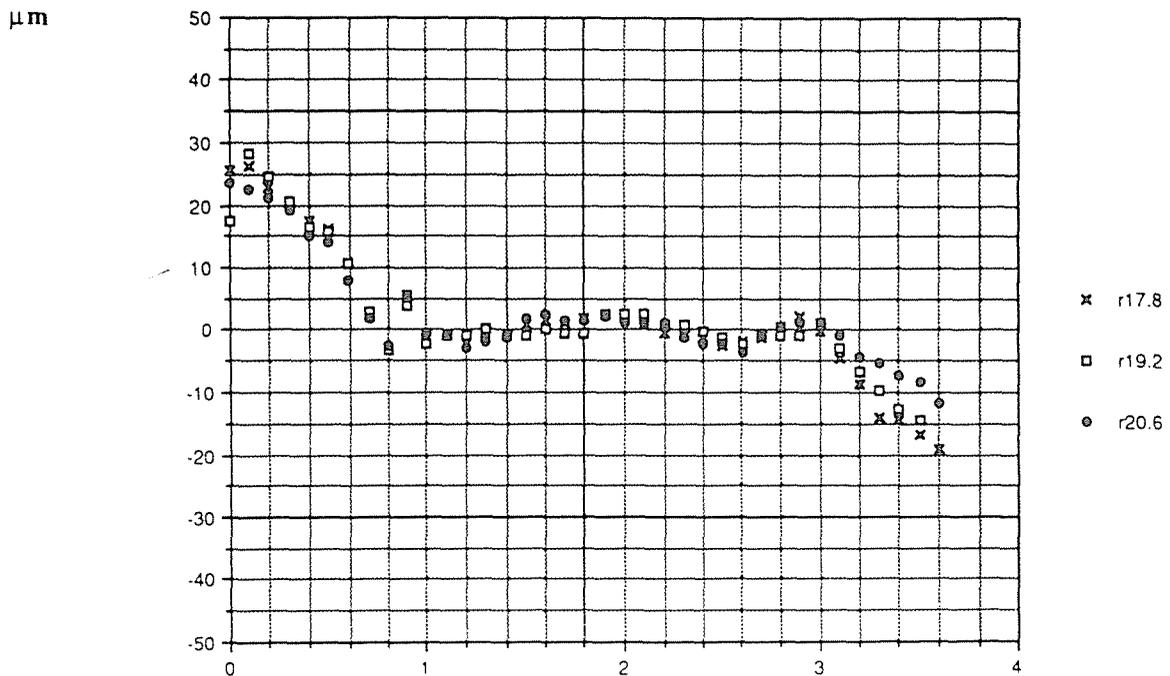


Figura 7. Diferencia, en micras, entre la lectura proporcionada por el control numérico de la máquina y el láser interferimetro, en función de la posición del carro de la máquina. En la parte central de la máquina (la zona entre $X=1$ y $X=3$ metros) la diferencia es inferior a 5 micras. El efecto de la temperatura fue tenido en cuenta como muestra el buen acuerdo obtenido con medidas realizadas a diferentes temperaturas ambiente (las cruces corresponden a las medidas realizadas a 17 grados, los cuadros blancos a 19 grados, y los cuadros negros a 21 grados).

La temperatura fue obviamente uno de los puntos más críticos que tuvimos que estudiar. Durante varias semanas, la variación de la temperatura en la nave de la fresa de control numérico fue monitorizada. Así pudimos evaluar la hora más conveniente, y las condiciones de calefacción más adecuadas, para conseguir una situación estable en torno a los 20 grados centígrados.

Como última prueba del método de fabricación, procedimos a realizar la operación completa de taladrado de agujeros en la plantilla, en sus posiciones definitivas, aunque con un diametro medio milímetro más pequeño que el nominal (9.5 mm en vez de 10 mm). El

procedimiento seguido consistió en utilizar como referencia las lecturas del láser en vez de las de la máquina. Una vez terminados los taladros, la plantilla fue transportada a una mesa plana donde se midieron las distancias entre agujeros con el láser interferométrico.

Una vez comprobada la validez del método usado, se procedió al taladrado definitivo de la primera plantilla. El proceso llevó algo menos de 2 horas, y durante ese tiempo la temperatura del aire cambió menos de dos décimas de grado. La segunda plantilla se taladró un par de semanas más tarde en condiciones muy similares.

Antes de proceder a la inserción de los pines, todos los agujeros fueron controlados cuidadosamente y se midieron sus diámetros. En la primera plantilla fué preciso retaladrar 6 agujeros haciéndolos más grandes (con un diámetro de 12 mm en vez del nominal de 10 mm). Hubo pues que preparar 6 pines especiales con dos diámetros (uno para la parte insertada de 12 mm, y otro de 10 para la parte externa). El resto de los agujeros estaba bien, con diámetros dentro del rango 10.000 a 10.003 mm en la primera plantilla, y 9.990 a 9.993 mm en la segunda plantilla.

Cada uno de los pines, en acero templado y rectificadas, fué preparado y controlado de forma que su tamaño encajase perfectamente con los diámetros medidos para los agujeros. Previamente habíamos realizado pruebas de inserción utilizando la técnica de enfriamiento de los pines con aire líquido. Las pruebas demostraron que la inserción era posible siempre que el diámetro del pin no excediera al del agujero en más de 10 micras. La inserción de pines se realizó sin problemas. No hubo ninguna necesidad de aplicar ninguna presión ni golpe a los pines y no encontramos que ninguno de ellos estuviera torcido. El promedio de los diámetros de los pines utilizados fue de 10.005 mm en la primera plantilla y 9.995 mm en la segunda.

4) Verificación. Medidas realizadas y resultados.

Una vez insertados los pines, las dos plantillas fueron colocadas sobre una gran mesa plana para su verificación. El esquema elegido para medir consistió en usar un dispositivo que permitía desplazar el espejo reflectante a lo largo de la fila de pines mientras que el interferómetro permanecía inmóvil sobre la plantilla cerca del borde.

Las medidas que proporciona el láser deben ser adecuadamente transformadas para obtener la distancia entre pares de pines. El primer efecto a tener en cuenta es el posible cambio en la pendiente al irse desplazando el espejo sobre la plantilla. La solución aplicada fue la de medir cada punto a tres alturas diferentes (entendiendo por altura la distancia entre la óptica y la base de la plantilla). Ajustando una recta a estos 3 valores se puede obtener, mediante extrapolación, el valor de la distancia entre pines a altura cero.

La temperatura, y su variación durante el periodo de medida, tanto para el material de

la plantilla, como en el aire, fue registrada y tenida en cuenta. La temperatura del material se utiliza para corregir efectos térmicos de expansión o compresión. En cuanto a la temperatura del aire, se utiliza, junto con el valor de la presión atmosférica, para corregir la información del láser por cambios en el índice de refracción del aire.

La posición a medir es la definida por la línea tangente a la pareja de pines. Por ello, diseñamos un útil de posicionado que materializaba dicha línea. Se han realizado un mínimo de dos series de medidas para cada par de pines. En la primera serie, el espejo se aproximaba al útil de posicionado por un lado, mientras que en la segunda serie lo hacía por el otro. La segunda serie es, en cierto sentido, redundante, aunque nos ha permitido estimar el efecto combinado de los errores introducidos como consecuencia del procedimiento de medida y los debidos a la posible diferencia de diámetro de unos pines a otros. Creemos que este error combinado es inferior a ± 3 micras.

Los resultados de nuestras medidas se presentan en las tablas 1, 2, 3, y 4 separando los pines X y X' y los pines Y de la primera y segunda plantilla respectivamente. En cada tabla se incluye una columna con los valores medidos, y otra con los valores que llamamos teóricos, esto es, los que corresponden al mejor ajuste a una recta con el requisito de igual distancia entre pines adyacentes (distancia que se deja como parámetro libre a ajustar). Todos los valores corresponden a una temperatura de 20 grados. Los residuos que aparecen en la última columna están calculados simplemente restando los valores medidos de los valores teóricos. Estos residuos aparecen reflejados en la figura 8.

Las barras de error de la figura 8 corresponden al error previamente mencionado de ± 3 micras. Hemos estimado la influencia de otras posibles fuentes de error sistemático:

- Una mala calibración del sensor de temperatura del material produciría una respuesta incorrecta. Es lógicamente un efecto lineal con la distancia, del orden de 5 micras en 2 metros por décima de grado. Hemos comprobado que el sensor está ciertamente calibrado mejor que la décima de grado.
- Un gradiente de temperatura a lo largo de la plantilla falsearía los resultados (puesto que hemos usado sólo un sensor de temperatura en la plantilla). Hemos evaluado cuanto podría ser el gradiente, y su efecto en nuestras medidas para los pines X y X' no supera las 2 micras.
- Un error en la velocidad de la luz, como consecuencia de posibles errores en la presión atmosférica, y temperatura y humedad relativa del aire. Hemos estimado que dicho error contribuiría como máximo con 3 micras en una distancia de 2 metros.
- Un error en el valor del coeficiente de expansión del material de la plantilla. Su efecto es mínimo en el caso de la primera plantilla ya que las medidas fueron realizadas a una temperatura muy próxima al valor nominal de 20 grados. En el caso de la segunda plantilla este efecto podría ser del orden de 3 o 4 micras en las distancias máximas.

5.- Conclusiones.

Según las medidas realizadas, una mayoría de los pines están dentro de ± 5 micras de su posición ideal. Sólo dos de ellos tienen residuos superiores, aunque muy ligeramente, a las 10 micras. El procedimiento de medida utilizado tiene un error inferior a ± 3 micras. En cuanto a errores sistemáticos, hemos investigado diversas posibilidades, y no se ha encontrado ningún efecto que modifique nuestros resultados en más de 5 micras. Por tanto creemos que las plantillas fabricadas satisfacen sobradamente los requisitos propuestos. Si su utilización en la fase de producción de cámaras ha sido la prevista, la precisión del posicionado de los hilos dentro de cada cámara está garantizada.

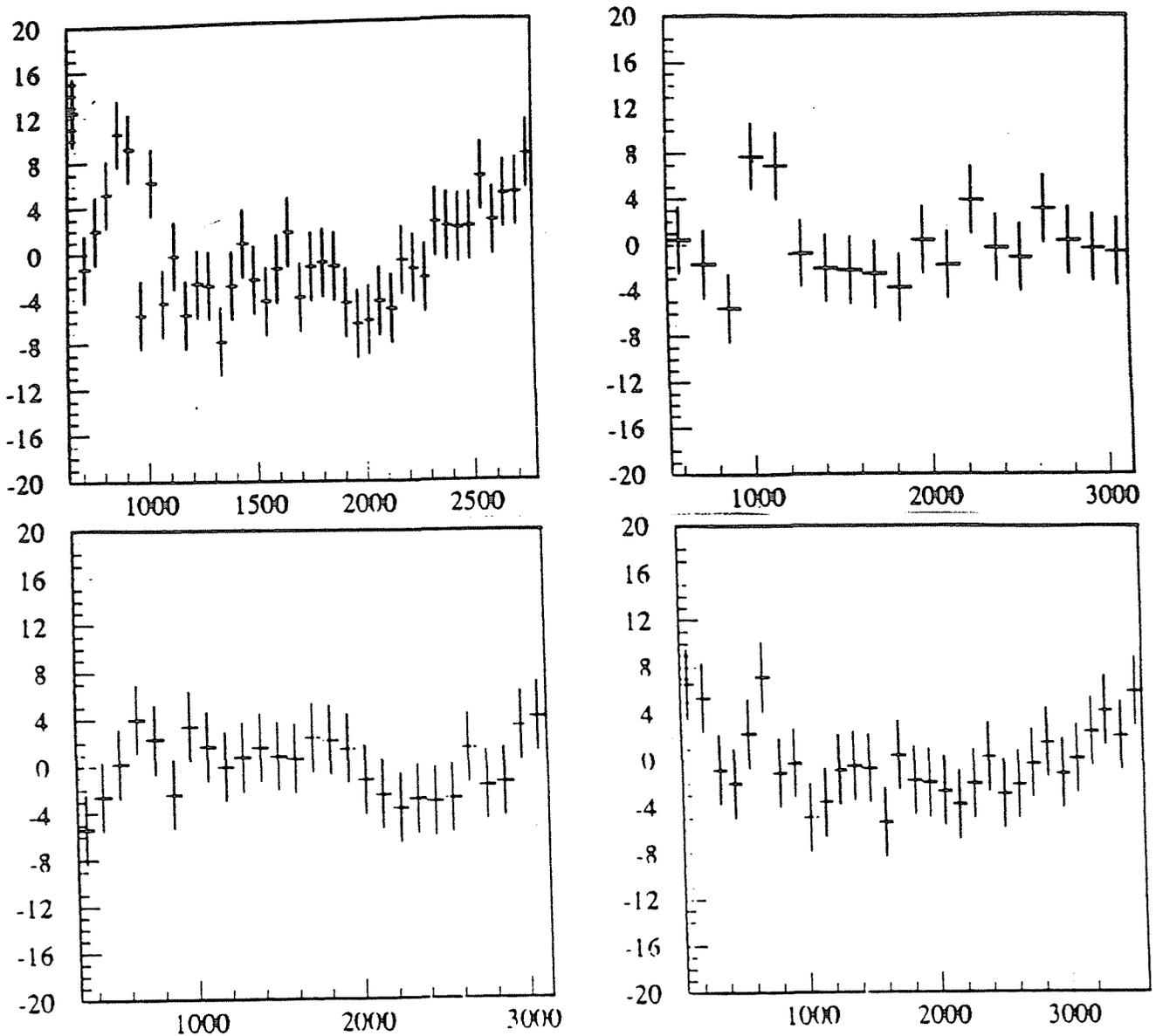


Figura 8. Residuos, en micras, de las posiciones de los pines de las dos plantillas. El residuo se define como la diferencia entre la posición teórica de la pareja de pines y la posición medida por el sistema de interferometría láser. El eje de abscisas (en mm), corresponde a la posición de los pines.

AGRADECIMIENTOS

La Unidad de Física de Partículas quiere poner de manifiesto que la realización de este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de muchas personas del Area de Tecnología, y muy en particular gracias a la intervención de los Talleres Generales del CIEMAT. A todas ellas, de forma general, les expresamos nuestro agradecimiento.

Queremos también mencionar nuestro reconocimiento a los miembros de la Colaboración L3, y en particular a los que más directamente han contribuido, junto con el grupo del CIEMAT, a la construcción del detector de muones.

REFERENCIAS

- [1] B. Adeva et al, Nuclear Instruments and Methods A 289 (1990), 35.
- [2] Hewlett-Packard, Sistema de Medida Láser modelo HP 5528 A.

TABLA n^o 1

Primera plantilla. Pines correspondientes a las cordenas X X'

| Pin X | Pin X' | Valor medido (en mm) | Valor ajustado (en mm) | Residuos (en μ s) |
|-------|--------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | | 655.0124 | 655.00000 | 12.4 |
| | 1 | 707.4989 | 707.50025 | -1.3 |
| 2 | | 760.0024 | 760.00050 | 1.9 |
| | 2 | 812.5058 | 812.50075 | 5.1 |
| 3 | | 865.0114 | 865.00101 | 10.4 |
| | 3 | 917.5104 | 917.50126 | 9.1 |
| 4 | | 969.9959 | 970.00151 | -5.6 |
| | 4 | 1022.5079 | 1022.50176 | 6. |
| 5 | | 1074.9975 | 1075.00202 | -4.5 |
| | 5 | 1127.5019 | 1127.50227 | -0.4 |
| 6 | | 1179.9969 | 1180.00252 | -5.6 |
| | 6 | 1232.4999 | 1232.50277 | -2.9 |
| 7 | | 1284.9999 | 1285.00303 | -3.1 |
| | 7 | 1337.4954 | 1337.50328 | -7.9 |
| 8 | | 1390.0005 | 1390.00353 | -3.0 |
| | 8 | 1442.5044 | 1442.50378 | 0.6 |
| 9 | | 1495.0014 | 1495.00404 | -2.6 |
| | 9 | 1547.4999 | 1547.50429 | -4.4 |
| 10 | | 1600.0029 | 1600.00454 | -1.6 |
| | 10 | 1652.5063 | 1652.50479 | 1.5 |
| 11 | | 1705.0009 | 1700.00504 | -4.1 |
| | 11 | 1757.5039 | 1757.50530 | -1.4 |
| 12 | | 1810.0045 | 1810.00555 | -1.1 |
| | 12 | 1862.5044 | 1862.50580 | -1.4 |
| 13 | | 1915.0015 | 1915.00605 | -4.6 |
| | 13 | 1967.4999 | 1967.50631 | -6.4 |
| 14 | | 2020.0005 | 2020.00656 | -6.1 |
| | 14 | 2072.5024 | 2072.50681 | -4.4 |
| 15 | | 2125.0020 | 2125.00706 | -5.1 |
| | 15 | 2177.5064 | 2177.50732 | -0.9 |
| 16 | | 2230.0060 | 2230.00757 | -1.6 |
| | 16 | 2282.5054 | 2282.50782 | -2.4 |
| 17 | | 2335.0104 | 2335.00807 | 2.3 |
| | 17 | 2387.5103 | 2387.50833 | 2.0 |
| 18 | | 2440.0105 | 2440.00858 | 1.9 |
| | 18 | 2492.5108 | 2492.50883 | 2.0 |
| 19 | | 2545.0154 | 2545.00908 | 6.3 |
| | 19 | 2597.5118 | 2597.50933 | 2.5 |
| 20 | | 2650.0144 | 2650.00959 | 4.8 |
| | 20 | 2702.5148 | 2702.50984 | 5.0 |
| 21 | | 2755.0184 | 2755.01009 | 8.3 |

Distancia entre hilos de celdas adyacentes = 105.00050 mm.

TABLA n^o 2

Segunda plantilla. Pines correspondientes a las cordenadas X X'

| Pin X | Pin X' | Valor medido (en mm) | Valor ajustado (en mm) | Residuos (en μ s) |
|--|--------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | | 595.2984 | 595.29800 | 0.4 |
| | 1 | 732.4866 | 732.48835 | -1.7 |
| 2 | | 869.6731 | 869.67871 | -5.6 |
| | 2 | 1006.8768 | 1006.86906 | 7.7 |
| 3 | | 1144.0663 | 1144.05941 | 6.9 |
| | 3 | 1281.2490 | 1281.24977 | -0.8 |
| 4 | | 1418.4380 | 1418.44012 | -2.1 |
| | 4 | 1555.6282 | 1555.63047 | -2.3 |
| 5 | | 1692.8182 | 1692.82083 | -2.6 |
| | 5 | 1830.0074 | 1830.01118 | -3.8 |
| 6 | | 1967.2019 | 1967.20153 | 0.4 |
| | 6 | 2104.3901 | 2104.39189 | -1.8 |
| 7 | | 2241.5861 | 2241.58224 | 3.9 |
| | 7 | 2378.7723 | 2378.77259 | -0.3 |
| 8 | | 2515.9618 | 2515.96295 | -1.1 |
| | 8 | 2653.1565 | 2653.15330 | 3.2 |
| 9 | | 2790.3440 | 2790.34365 | 0.3 |
| | 9 | 2927.5337 | 2927.53401 | -0.3 |
| 10 | | 3064.7238 | 3064.72436 | -0.6 |
| Distancia entre hilos de celdas adyacentes = 274.38071 mm. | | | | |

TABLA n^o 3

Primera plantilla. Pines correspondientes a la cordenada Y

| Pin Y | Valor medido (en mm) | Valor ajustado (en mm) | Residuos (en μ s) |
|-------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 339.9946 | 340.00000 | -5.4 |
| 2 | 444.9976 | 445.00021 | -2.6 |
| 3 | 550.0006 | 550.00042 | 0.2 |
| 4 | 655.0045 | 655.00063 | 3.9 |
| 5 | 760.0031 | 760.00085 | 2.3 |
| 6 | 864.9986 | 865.00106 | -2.4 |
| 7 | 970.0046 | 970.00127 | 3.3 |
| 8 | 1075.0031 | 1075.00148 | 1.6 |
| 9 | 1180.0016 | 1180.00169 | -0.1 |
| 10 | 1285.0026 | 1285.00190 | 0.7 |
| 11 | 1390.0036 | 1390.00212 | 1.5 |
| 12 | 1495.0031 | 1495.00233 | 0.8 |
| 13 | 1600.0031 | 1600.00254 | 0.6 |
| 14 | 1705.0051 | 1705.00275 | 2.3 |
| 15 | 1810.0051 | 1810.00296 | 2.1 |
| 16 | 1915.0046 | 1915.00317 | 1.4 |
| 17 | 2020.0022 | 2020.00338 | -1.2 |
| 18 | 2125.0012 | 2125.00360 | -2.4 |
| 19 | 2230.0002 | 2230.00381 | -3.6 |
| 20 | 2335.0011 | 2335.00402 | -2.9 |
| 21 | 2440.0011 | 2440.00423 | -3.1 |
| 22 | 2545.0016 | 2545.00444 | -2.8 |
| 23 | 2650.0061 | 2650.00465 | 1.4 |
| 24 | 2755.0032 | 2755.00487 | -1.7 |
| 25 | 2860.0036 | 2860.00508 | -1.5 |
| 26 | 2965.0086 | 2965.00529 | 3.3 |
| 27 | 3070.0096 | 3070.00550 | 4.1 |

Distancia entre hilos de celdas adyacentes = 105.00021 mm.

TABLA n^o 4

Segunda plantilla. Pines correspondientes a la cordenada Y

| Pin Y | Valor medido (en mm) | Valor ajustado (en mm) | Residuos (en μs) |
|-------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 123.2385 | 123.23200 | 6.5 |
| 2 | 236.8887 | 236.88338 | 5.3 |
| 3 | 350.5339 | 350.53477 | -0.9 |
| 4 | 464.1842 | 464.18616 | -2.0 |
| 5 | 577.8398 | 577.83755 | 2.3 |
| 6 | 691.4960 | 691.48894 | 7.1 |
| 7 | 805.1393 | 805.14033 | -1.0 |
| 8 | 918.7915 | 918.79171 | -0.2 |
| 9 | 1032.4382 | 1032.44310 | -4.9 |
| 10 | 1146.0909 | 1146.09449 | -3.6 |
| 11 | 1259.7451 | 1259.74588 | -0.8 |
| 12 | 1373.3968 | 1373.39727 | -0.5 |
| 13 | 1487.0480 | 1487.04865 | -0.6 |
| 14 | 1600.6947 | 1600.70004 | -5.3 |
| 15 | 1714.3518 | 1714.35143 | 0.4 |
| 16 | 1828.0011 | 1828.00282 | -1.7 |
| 17 | 1941.6523 | 1941.65421 | -1.9 |
| 18 | 2055.3030 | 2055.30559 | -2.6 |
| 19 | 2168.9532 | 2168.95698 | -3.8 |
| 20 | 2282.6064 | 2282.60837 | -2.0 |
| 21 | 2396.2601 | 2396.25976 | 0.3 |
| 22 | 2509.9083 | 2509.91115 | -2.8 |
| 23 | 2623.5604 | 2623.56253 | -2.1 |
| 24 | 2737.2137 | 2737.21392 | -0.2 |
| 25 | 2850.8668 | 2850.86531 | 1.5 |
| 26 | 2964.5156 | 2964.51670 | -1.1 |
| 27 | 3078.1682 | 3078.16809 | 0.1 |
| 28 | 3191.8219 | 3191.81948 | 2.4 |
| 29 | 3305.4751 | 3305.47086 | 4.2 |
| 30 | 3419.1243 | 3419.12225 | 2.1 |
| 31 | 3532.7795 | 3532.77364 | 5.9 |

Distancia entre hilos de celdas adyacentes = 113.65139 mm.

