

Diseño Avanzado de la Primera
Línea de Transmisión Cuasióptica
del Sistema ECRH del TJ-II.

A. Fernández
K. Likin
R. Martín

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, 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 Thesauro 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

ISSN: 1135 - 9420

NIPO: 238-99-003-5

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700340

PLASMA HEATING; POWER TRANSMISSION LINES; MIRRORS; POLARIZATION; ECR
HEATING; DESIGN; CURRENT-DRIVE HEATING

“Diseño Avanzado de la Primera Línea de Transmisión Cuasióptica del Sistema ECRH del TJ-II”

Fernández, A.; Likin, K.; Martín, R.
48 pp. 17 fig. 13 refs.

Resumen:

En el stellarator TJ-II, el encendido y el calentamiento del plasma se consigue mediante ondas electromagnéticas a la frecuencia electrónica ciclotrónica (ECRH). La potencia de microondas es generada por dos girotrones y guiada por dos líneas de transmisión cuasi-ópticas. La primera línea lanza las microondas con una geometría de inyección fija, es decir, no es posible cambiar el ángulo de lanzamiento ni la polarización de la onda. Debido a la distancia entre el último espejo focalizador y el centro de la cámara de vacío del TJ-II, el haz es bastante ancho en el borde del plasma. La segunda línea tiene un espejo móvil instalado en el interior de la cámara del TJ-II. Para conseguir una eficiencia de absorción alta y un perfil de deposición de energía estrecho, el espejo interno focaliza el haz en el centro del plasma con un ancho del haz de 1.9 cm.

Para conseguir mayor flexibilidad en los experimentos de calentamiento e inducción de corriente es necesario mejorar la primera línea de transmisión. El diseño se presenta en este informe. Incluye también un espejo interno para focalizar el haz y poder cambiar el ángulo de inyección. Para conseguir cambiar la polarización se incluye un polarizador formado por dos espejos corrugados. Por medio de dos espejos con un array de agujeros se podrá estimar la potencia lanzada dentro de la cámara del TJ-II, así como las pérdidas a lo largo de la línea.

“Advanced Design of the First Quasi-optical Transmission Line for ECRH at TJ-II”

Fernández, A.; Likin, K.; Martín, R.
48 pp. 17 fig. 13 refs.

Abstract:

TJ-II plasmas start-up and heating are made by electron cyclotron resonance waves at the second harmonic of the electron cyclotron frequency. The microwave power of the gyrotrons is transmitted by two quasi-optical transmission lines. The first line launches the microwave power under fixed injection geometry, i.e. there is no a possibility to change the launching angle and the wave polarization. Due to the long distance between the last focusing mirror and the center of TJ-II vessel the wave beam is quite wide at plasma border. The second line has a moveable mirror installed inside the TJ-II vessel. To get high absorption efficiency and a narrow energy deposition profile the internal mirror focuses the wave beam at plasma center. The beam width is about 2 cm.

To get more flexibility in experiments on heating and current drive the first transmission line needs to be upgraded. The design is presented in this report. It includes an internal mirror to focus the beam and to change the injection angle. A polarizer consisting in two corrugated mirrors will be incorporated to get any wave polarization. Two mirrors with an array of coupling holes and calorimetric measurements of the energy absorbed in the barrier window will permit the estimation of the microwave power launched into the TJ-II.

INTRODUCCIÓN.

El sistema de calentamiento ECRH del TJ-II está basado en dos líneas de transmisión cuasiópticas de espejos. Cada línea transmite la potencia de microondas suministrada por un tubo girotrón fabricado por la firma rusa GYCOM, que tienen como características principales las siguientes: potencia nominal de salida 300 kW, duración máxima del pulso 1s, frecuencia 53.2 GHz (correspondiente al segundo armónico de la frecuencia electrónica ciclotrónica de los plasmas del TJ-II) y salida de las microondas en modo Gaussiano (TEM_{00}) con una pureza del 96 %. Los girotrones están alimentados por una fuente de alta tensión diseñada con tecnología de conmutación. La fuente de alimentación tiene una parte común para ambos girotrones y cada girotrón está dirigido por un modulador del ánodo. (Para más información ver [1] y [2])

La primera línea de transmisión (QTL1) fue puesta en funcionamiento en noviembre de 1997 con resultados satisfactorios. Los primeros plasmas del TJ-II fueron conseguidos con esta línea. Las microondas son lanzadas dentro de la cámara de vacío a través del puerto inferior B3 ($\varphi = 25,47^\circ$) con una geometría fija, es decir, no hay posibilidad de cambiar el ángulo de lanzamiento o la polarización de la onda. Está formada por 8 espejos: el primero es plano y para focalizar el haz hay seis espejos cilíndricos acoplados en parejas y dos espejos elipsoidales. En la ventana del TJ-II está situado el "beam waist", que es de 3.2 cm. En el centro del plasma el haz tiene un tamaño (diámetro) de 110 mm. Las pérdidas totales son del 12%, la mayoría debidas a pérdidas por truncamiento del haz: 7%, un 4 % debido a los lóbulos laterales en la salida del girotrón y un 1% que se absorbe en la ventana de nitrato de boro del TJ-II. Las características de los espejos y del haz se encuentran con más detalle en [3].

La segunda línea de transmisión (QTL2) se pondrá en funcionamiento en diciembre de 1998. Con esta línea se lanzan las microondas a través del puerto lateral A6 ($\varphi = 64.53^\circ$) e incluye un espejo móvil dentro de la cámara de vacío que focaliza el haz en el centro de plasma (para la configuración estándar) con un diámetro de 19 mm. El ángulo de lanzamiento puede modificarse en el plano toroidal con una flexibilidad de $\varphi = \pm 20^\circ$ y en el plano poloidal $0^\circ < \theta < 35^\circ$. Permite calentamiento en el eje y fuera del mismo y también permite llevar a cabo experimentos de ECCD. El resto de la línea se compone de 9 espejos: el primero es plano, 6 espejos cilíndricos acoplados en parejas y dos elipsoidales. Las pérdidas a lo largo de la línea son del 14 %, mayores que en la primera línea debido al mayor número de espejos (más pérdidas por truncamiento del haz en los mismos). Las características de los espejos y del haz y las medidas a baja potencia de los primeros espejos se encuentran en [3,4].

Para conseguir mayor flexibilidad en los experimentos de ECRH y ECCD se ha diseñado una nueva línea, que sustituirá a la actual QTL1 (QTL1*). Como se ha descrito anteriormente, el haz que llega al plasma es muy ancho, debido a la gran distancia entre el último espejo focalizador y el centro del plasma. Para mejorar la eficiencia de absorción y para conseguir un perfil estrecho de deposición de energía se ha incluido un espejo interno, con las mismas características que el de la línea QTL2. Para ello es necesario cambiar el puerto de entrada de las microondas al B3 lateral. Gracias a la simetría del stellarator será posible inducir corriente con ambas antenas en los dos sentidos toroidales. Por otra parte, es importante la polarización de la onda para optimizar la absorción de potencia en el plasma. La onda tiene polarización lineal a la salida del girotrón (el campo eléctrico se encuentra en el plano horizontal) y el diseño actual sólo permite una variación en la dirección de la polarización por medio de los dos primeros espejos. Después del segundo espejo el campo eléctrico puede formar un ángulo de 0° a 30° con respecto al plano vertical. En el nuevo diseño se incluyen dos espejos corrugados que permiten conseguir la polarización deseada. Por último, es importante conocer la potencia de salida del girotrón en cada descarga, así como las pérdidas a lo largo de la línea para estimar la energía lanzada en la cámara de vacío. Dos espejos con una estructura de agujeros en la superficie, que acoplan parte de la potencia, junto con medidas calorimétricas de la energía absorbida por la ventana de vacío del TJ-II permitirán llevar a cabo estos cálculos. Las características de la nueva línea y sus componentes se presentan en este informe.

TRAZADO DE LA LÍNEA Y CARACTERÍSTICAS DEL HAZ

El camino que recorren las microondas se ha mantenido prácticamente igual al de la actual línea QTL1, con el cambio apropiado para poder lanzar las microondas por el puerto lateral B3. Un dibujo del trazado de la línea y las distancias se pueden ver en las Figuras 1 (vista lateral) y 2 (esquema con las distancias entre espejos y los ángulos). La longitud total que recorren las microondas es aproximadamente de 18 m.

Se han utilizado 10 espejos para focalizar el haz Gaussiano desde la fuente hasta el plasma. Se ha conseguido un "beam waist" en el centro del plasma para la configuración estándar de 9.5 mm, igual que el que consigue la línea QTL2 por medio de un espejo en el interior de la cámara. También se ha tratado de colocar el "waist" del haz en la ventana del TJ-II para disminuir las reflexiones. El diámetro de la ventana es de 100 mm y el $w_0=30.1$ mm aproximadamente en ese punto. El tamaño de los "beam waists" en los tramos intermedios de la línea está en torno a los 84 mm.

El haz de salida del girotrón es un haz gaussiano con el 96 % de pureza, pero no es circular, sino que tiene una sección transversal elíptica (es un haz astigmático, ver Figura 3). Por eso se distingue en los dos primeros espejos las dos direcciones del

plano transversal (XY) a la dirección de propagación (Z). Según los ejes de coordenadas de la Figura 2 tenemos un $w_0=18.14$ mm en dirección X y un $w_0=23.15$ mm en dirección Y. La ventana del girotrón se ha tomado de referencia, aunque los "beam waists" no están situados en la misma. La distancia entre la ventana del girotrón y el primer espejo es de 700 mm. En la dirección Y (horizontal) el "beam waist" está fuera del girotrón y en la dirección X (vertical) está dentro. A partir del segundo espejo el haz es circular.

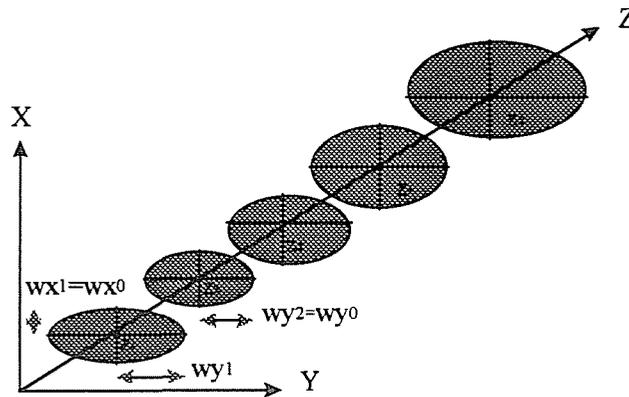


Figura 3. Esquema de las secciones transversales del haz astigmático de salida del girotrón. La ventana del girotrón estaría situada en $z_1 < z < z_2$ y los "beam waists" w_{x0} y w_{y0} estarían situados en $z_{0x}=z_1$ y $z_{0y}=z_2$ respectivamente.

El tamaño de los "beam waists", la distancia con respecto a los espejos y el tamaño del haz en cada espejo se resumen en la siguiente tabla (Tabla 1).

Nr.	distancia entre espejos	$w_{0entrada}$	distancia w_{0ent} -espejo	w_{espejo}	$w_{0salida}$	distancia w_{0sal} -espejo
1	700.0	18.14	712.3	72.7	48.0	-1461.7
		23.15	520.4	46.5	18.0	-431.1
2	400.0	48.0	1861.7	84.5	59.8	1992.3
		18.0	831.1			
3	3188.4	59.8	1196.1	69.7	59.8	-1193.5
4	800.0	59.8	1993.5	84.6	59.8	1993.5
5	3188.4	59.8	1194.9	69.7	59.8	-1192.4
6	800.0	59.8	1992.4	84.5	59.8	1992.4
7	3988.4	59.8	1996.0	84.6	83.9	519.6
8	1249.0	83.9	729.4	85.3	27.6	1242.6
9	2020.0	27.6	777.4	57.6	30.1	823.2
10	1535.0	30.1	711.8	52.0	9.5	272.0
Plasma	272.0	9.5				

Tabla 1. Distancias, posición de los "beam waists" y tamaño del haz. Dimensiones en mm. Las distancias son positivas en la dirección de propagación.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPEJOS

Los dos primeros espejos correctores de fase transforman el haz astigmático de salida del girotrón en un haz gaussiano simétrico. Esto es importante, por una parte para tener en el resto de la línea un haz axisimétrico, y, por otra, si se cambia el girotrón, sólo cambiando estos dos espejos se puede volver a conseguir el mismo haz a la salida, sin necesidad de tener que cambiar toda la línea.

La corrección del astigmatismo se consigue en este caso con un espejo hiperbólico y un espejo elipsoidal. Las características de los espejos se resumen en la siguiente tabla (Tabla 2).

Espejo	1º Hiperboloide	2º Elipsoide
Distancia focal plano incidencia	-1904.4	714.7
Distancia focal plano perpendicular	1075.2	1626.1
Tamaño plano incidencia	411.0	478.0
Tamaño plano perpendicular	186.0	338.0

Tabla 2. Características de los dos primeros espejos. Dimensiones en mm.

Las superficies de los espejos cuando se tiene un haz astigmático se pueden calcular mediante la siguiente fórmula [5]:

$$z = h_{20}x^2 + h_{02}y^2 + h_{12}xy^2 + h_{03}x^3$$

donde:

$$h_{20} = \frac{1}{4 \cdot \cos \theta} \cdot \left(\frac{1}{r_{xi}} - \frac{1}{r_{xo}} \right)$$

$$h_{02} = \frac{\cos \theta}{4} \cdot \left(\frac{1}{r_{yi}} - \frac{1}{r_{yo}} \right)$$

$$h_{12} = -\frac{\tan \theta}{4} \cdot \left(\frac{1}{r_{xi}^2} - \frac{1}{r_{xo}^2} \right) + \frac{\tan \theta}{8} \cdot \left(\frac{1}{r_{xi}} - \frac{1}{r_{xo}} \right) \cdot \left(\frac{1}{r_{yi}} - \frac{1}{r_{yo}} \right)$$

$$h_{03} = -\frac{\cos \theta \cdot \sin \theta}{8} \cdot \left(\frac{1}{r_{yi}^2} - \frac{1}{r_{yo}^2} \right)$$

cuando h_{12} y h_{03} son igual a cero cuando tenemos una superficie toroidal. Las coordenadas se han elegido de tal forma que x es la correspondiente al plano de incidencia del espejo e y al plano perpendicular.

Para los espejos 1 y 2 los coeficientes se encuentran resumidos en la siguiente tabla (Tabla 3).

Coefficientes	Espejo 1	Espejo 2
h_{20}	-1.85×10^{-4}	2.17×10^{-4}
h_{02}	1.64×10^{-4}	2.47×10^{-4}
h_{12}	0	0
h_{30}	-7.85×10^{-8}	-7.85×10^{-8}

Tabla 3. Coeficientes de la superficie de los dos primeros espejos de la línea

Se han calculado las posibles distorsiones del haz calculando el campo radiado mediante un código y se ha demostrado que la distorsión es mínima. El código numérico utiliza la integral de Frensel-Kirchoff para calcular el campo a partir de las corrientes en la superficie del espejo.

Los modos de orden superior que aparecen se resumen en la Tabla 4. En la Figura 4 se puede ver la forma del campo a la salida del primer espejo y en la Figura 5 se refleja la forma del campo a la salida del segundo espejo.

Modo	Potencia
TEM ₀₀	0.9882
TEM ₀₁ ^{cross} (Espejo 1)	0.0010
TEM ₀₁	0.0021
TEM ₁₀ ^{cross} (Espejo 2)	0.0033
TEM ₁₀	0.0002
TEM ₂₁	0.0043

Tabla 4. Análisis de modos superiores generados por la distorsión de los dos primeros espejos.

Se pueden fabricar los espejos de forma toroidal, ya que la distorsión del campo es prácticamente igual que con una superficie más compleja, y la facilidad de mecanización es mucho mayor.

Los espejos 3 y 5 son planos, ya que son los polarizadores, que se verán con más detalle en la sección siguiente.

El resto de los espejos son elipsoidales. Sus características se resumen en la Tabla 5. En el apéndice pueden verse dibujos de los mismos y la posición del espejo 10 dentro de la cámara.

ESPEJO	4	6	7	8	9	10
Distancia focal	1994.28	1994.28	3521.66	1304.99	533.82	222.82
Tamaño plano incidencia	342	342	570	482	325	190
Tamaño plano perpendicular	339	339	338	341	230	170

Tabla 5. Características principales de los espejos. Dimensiones en mm.

El espejo 10 se ha diseñado para una posición de referencia, esto es, para focalizar el haz en el centro del plasma con un $w_0 = 9.5$ mm a 272 mm del espejo. El objetivo de este espejo es poder cambiar el punto de deposición de la potencia.

El tamaño de los espejos se ha elegido como 4 veces el tamaño del haz sobre el espejo para tener unas pérdidas por truncamiento del haz razonables, menores al 0.1 % [6]. Para el espejo 10 se han tomado unas dimensiones más pequeñas debido a las restricciones de espacio dentro de la cámara de vacío.

Todos los espejos serán fabricados en aluminio, excepto el espejo 10. Para el espejo 10, al ir dentro de la cámara, es recomendable que se utilice otro material, que puede ser Cu o acero inoxidable. Otra posibilidad es recubrirlo con una capa de oro. Irán sujetos a una placa soporte que permite la orientación del espejo en dos ejes mediante tornillos micrométricos, así como el ajuste de la distancia entre el centro del espejo y la pared de fijación en un rango de 230-280 mm. La forma de sujeción también es diferente, se podrá mover en dirección toroidal y poloidal por medio de unos manipuladores (ver figura en el apéndice). La precisión del movimiento es de 0.5° en el plano toroidal y 0.02° en el poloidal.

POLARIZADORES

Para el caso de calentamiento ECRH en segundo armónico y para excitar un modo X, como es el caso del TJ-II, se necesita una polarización elíptica con una inclinación de su eje mayor apropiada. Por una parte, la onda tiene polarización lineal a la salida del girotrón, y, por otra parte, los espejos de la línea de transmisión afectan la polarización de la onda, con lo cual, se necesitan polarizadores que consigan la polarización apropiada.

Dentro de las posibilidades que se ofrecen (ver [7]), se ha elegido un par de espejos corrugados (Figura 6). El primer espejo rota la polarización lineal incidente y el segundo espejo consigue la polarización elíptica requerida. La componente del campo eléctrico paralela a las corrugaciones no penetra en ellas si su anchura, c (ver Figura 6), es menor que $\lambda/2$ (guía de ondas por debajo del corte), mientras que la otra componente se propagará hasta el fondo de las corrugaciones antes de reflejarse. Esto provoca un desfase entre ambas componentes dependiente de la profundidad de corrugación. Si la profundidad de corrugación es $h = \lambda/4$ (primer espejo) tendremos un desfase de 180° y la polarización lineal es rotada un ángulo 2Φ , donde Φ es el ángulo de orientación de las corrugaciones con respecto a la polarización inicial. En el

segundo espejo tendremos una profundidad de $h=\lambda/8$, que provoca un desfase relativo de 90° y la salida está elípticamente polarizada. Con una conveniente combinación de la posición de ambos polarizadores se puede conseguir cualquier polarización.

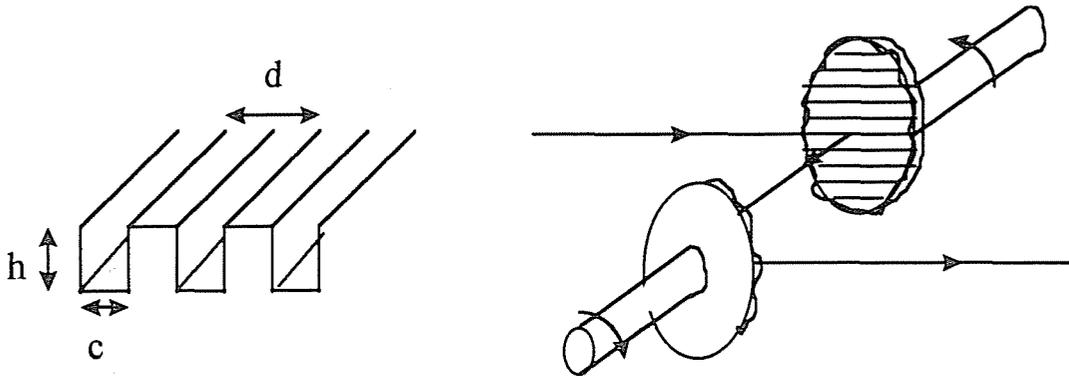


Figura 6. Esquema de una estructura corrugada y de un polarizador formado por dos espejos corrugados

El primer espejo rota la polarización lineal incidente y el segundo espejo consigue la polarización elíptica requerida. La componente del campo eléctrico paralela a las corrugaciones no penetra en ellas si su anchura, c (ver Figura 6), es menor que $\lambda/2$ (guía de ondas por debajo del corte), mientras que la otra componente se propagará hasta el fondo de las corrugaciones antes de reflejarse. Esto provoca un desfase entre ambas componentes dependiente de la profundidad de corrugación. Si la profundidad de corrugación es $h=\lambda/4$ (primer espejo) tendremos un desfase de 180° y la polarización lineal es rotada un ángulo 2Φ , donde Φ es el ángulo de orientación de las corrugaciones con respecto a la polarización inicial. En el segundo espejo tendremos una profundidad de $h=\lambda/8$, que provoca un desfase relativo de 90° y la salida está elípticamente polarizada. Con una conveniente combinación de la posición de ambos polarizadores se puede conseguir cualquier polarización.

Para el caso de alta potencia no se pueden hacer corrugaciones cuadradas tal y como se muestra en la Figura 6, ya que hay posibilidad de que se formen arcos eléctricos. Hay que suavizar los contornos y se pasa a una estructura de tipo cosenoidal. Con esta estructura se presenta el problema de que el campo penetra un poco en la corrugación. Para corregir este efecto se toma una amplitud un poco menor. El valor de la amplitud se ha calculado a partir de unas medidas en el laboratorio para polarizadores ya construidos, a la frecuencia de 70 y 140 GHz. En principio es suficiente con una ley de escala, pero se confirmará con las medidas que se hagan a baja potencia para la frecuencia de 53.2 GHz. La elección del periodo también es importante para evitar reflexiones Bragg [8]. El perfil calculado tiene la forma que se indica en la Tabla 6.

Polarizador	Amplitud	Periodo
Girador (3)	1.065	3.381
Elíptico (5)	0.738	3.381

Tabla 6 . Perfil de los polarizadores. Dimensiones en mm.

Un esquema del perfil se puede ver en las Figuras 7 (girador de la polarización lineal) y 8 (polarizador elíptico) .

Cuando la polarización es elíptica el campo está formado por dos modos TEM_{00} perpendiculares entre sí y totalmente independientes, de tal forma que no se distorsiona la forma del campo.

El tamaño del haz en los polarizadores es de 69.7 mm y se ha elegido un tamaño de los espejos de 139 mm de diámetro, aproximadamente 4 veces el valor del tamaño del haz en los espejos.

Los polarizadores se pueden rotar alrededor del eje de la normal a la superficie por medio de un motor. El ángulo se mide con un potenciómetro de precisión. Igual que en el resto de los espejos, el soporte permite el alineamiento en los dos ejes.

ESPEJOS ACOPLADORES

Para hacer una estimación de la potencia de salida del girotrón en cada disparo, se ha diseñado un par de espejos con un conjunto de agujeros que acoplan la potencia en una guía de ondas. También es posible detectar la posible potencia reflejada que vuelve a la fuente, ya que el funcionamiento es similar al de un acoplador bi-direccional.

El primer espejo que lleva esta estructura es el segundo. Se ha elegido este espejo porque tiene un radio de curvatura suficientemente grande y está próximo al girotrón. Se desestima el primer espejo porque es divergente y puede dar lugar a mayores errores. La guía monomodo que se utiliza es una guía rectangular. La anchura de la guía se elige de tal forma que la constante de propagación sea igual al vector de onda del haz con el ángulo de incidencia en el espejo [9]. Posteriormente, mediante una transición, se llega a la dimensión estándar de la banda. El ángulo de incidencia en el segundo espejo es de 45° , que fija el radio de la guía en $a=3.99$ mm.

Banda estándar utilizada: 40 - 60 GHz (WR-19). En la Figura 9 hay un esquema del acoplador.

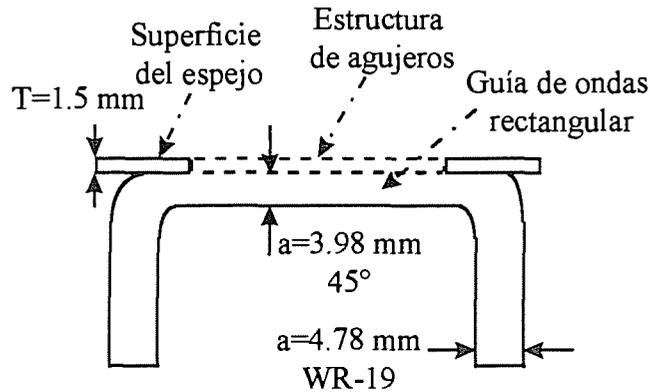


Figura 9. Detalle de la guía de ondas rectangular del acoplador.

Se pueden elegir diferentes transiciones de diámetro para mejorar el diagrama de radiación (ver [10]). Se ha elegido una transición de tipo exponencial, ya que se consigue la mejor solución de compromiso entre la anchura del lóbulo principal y la diferencia en potencia con los lóbulos laterales.

El número de agujeros es 25, con una distancia entre ellos de 2.5 mm (la distancia tiene que ser menor que media longitud de onda para evitar efectos de difracción) en una longitud total de la estructura de 60 mm. Los valores teóricos para una transición exponencial se pueden ver en la Tabla 7.

Posición	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0
Diámetro	1.1	1.09	1.09	1.08	1.07	1.05	1.03	1.01	0.98	0.95	0.92	0.89	0.85

Tabla 7. Valores teóricos de los diámetros de los agujeros en mm. Como la estructura es simétrica, se dan los valores de la mitad.

Las posibilidades de mecanización reales no consiguen medidas tan precisas. En la Figura 10 se pueden ver las dimensiones reales que tendrán los agujeros.

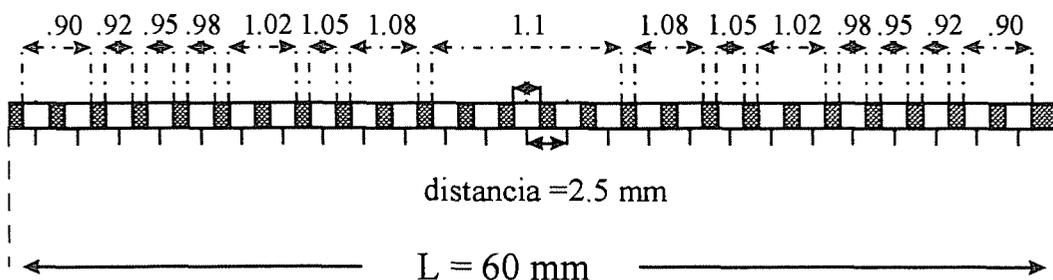


Figura 10. Estructura y dimensiones reales de los agujeros del acoplador de potencia.

Con esta estructura de agujeros, el diagrama de radiación se puede ver en la Figura 11. Hay una diferencia de más de 20 dB entre el lóbulo principal y el primer lóbulo secundario. La anchura del lóbulo principal es de unos 15° , con el máximo en 45° , que es la dirección preferente. Si se compara con la Figura 12, que corresponde a un diagrama de radiación de la misma estructura, pero con un diámetro constante para todos los agujeros, se puede ver la mejora que se consigue. Aunque el lóbulo principal es ligeramente más estrecho, la diferencia con el primer lóbulo secundario es sólo de 10 dB.

El acoplador es sensible a la frecuencia. Cuando la frecuencia cambia, hay un desplazamiento del diagrama de radiación. En la Figura 13 se puede observar el diagrama de radiación para una frecuencia de 54 GHz. En este caso tenemos el máximo desplazado a ángulos menores. Si la frecuencia fuera más baja tendríamos el diagrama desplazado a ángulos mayores (ver Figura 14).

El otro acoplador estará instalado en el espejo 9. Se presenta el problema de que son sensibles a la polarización y como el espejo 9 está colocado después de los polarizadores no se puede comparar con la señal con la obtenida en el espejo 2. Sólo se podría hacer una estimación con la misma polarización, pero no serviría para el cálculo de potencia en operación del TJ-II. Se ha optado por colocar en este caso una guía circular, de tal forma que se pueda colocar después un acoplador ortogonal que separe las dos componentes de la polarización del campo en dos canales. Comparando la señal se podrá conocer la potencia que se ha perdido y también la polarización que tenemos. La estructura de agujeros será la misma que en el espejo número 2.

PÉRDIDAS A LO LARGO DE LA LÍNEA.

Las pérdidas de potencia son debidas principalmente al truncamiento del haz en los espejos, pérdidas óhmicas, por conversión de modos y por polarización cruzada. Estas pérdidas se han calculado [11,12,5] y son del orden del 6 %. En la Tabla 8 se resumen dichas pérdidas para cada espejo.

Las pérdidas por truncamiento se han calculado suponiendo que los espejos tienen un tamaño cuatro veces mayor al tamaño del haz en el espejo. Si fuera necesario hacer los espejos más pequeños, se aconseja un mínimo de 3.5 veces el tamaño del haz para mantener las pérdidas por debajo del 0.6 % en cada espejo.

En las pérdidas óhmicas se incluye un factor de seguridad que ha sido medido en el laboratorio con un resonador [13]. Se probaron diferentes superficies lisas de Cu

y de Al. En las Figuras 15 y 16 (plano E: el vector eléctrico es paralelo al plano de incidencia y plano H: vector eléctrico perpendicular al plano de incidencia respectivamente) se puede observar que en el plano E las pérdidas decaen fuertemente con el ángulo de incidencia. En plano H ocurre lo contrario, pero la diferencia no es tan acusada. En ambos casos las pérdidas son ligeramente mayores a las previstas por la teoría, por eso se ha incluido el citado factor de seguridad. Para el caso del material con que se harán los espejos, que es un Al con $\rho \approx 0.0035$, tenemos un factor de seguridad $S=1.4$.

Como la polarización variará en cada disparo según las exigencias del experimento, las pérdidas óhmicas se han estimado suponiendo que se mantiene la polarización lineal. Para el caso de la polarización elíptica se calcularán en cada caso, pero no serán mucho mayores.

Espejo	Truncamiento	Óhmicas	Distorsión	Cruzada	Total
1	0.0118	0.0636	0.0651	0.1188	0.1839
2	0.0105	0.1274	0.7300	0.3301	1.0601
3	0.0123	0.3732	-----	-----	0.3856
4	0.0117	0.0933	0.0016	0.0032	0.1099
5	0.0123	0.3732	-----	-----	0.3856
6	0.0117	0.0933	0.0017	0.0032	0.1099
7	0.0117	0.0535	0.0137	0.0264	0.1053
8	0.0126	0.1274	0.0555	0.1068	0.3023
9	0.0119	0.1274	0.1513	0.2911	0.5817
10	0.6254	0.1020	0.2002	0.3850	1.3126

Tabla 8. Pérdidas de potencia en % en cada espejo

Los polarizadores también se midieron y se comprobó que las pérdidas son alrededor de un 3% más altas que en las superficies lisas. Se ha tomado para ellos un factor de seguridad $S=4$. Esta ha sido la razón de elegir un ángulo de incidencia de 15° para los mismos. Con ángulos mayores las pérdidas serían demasiado altas, ya que para el primer polarizador, el vector eléctrico es paralelo al plano de incidencia. En la Figura 17 se pueden observar las diferencias en la resistencia superficial entre los polarizadores y las superficies lisas. Estas medidas se hicieron a 140 GHz y con superficies de cobre. Para la frecuencia de 53.2 GHz con polarizadores de aluminio se espera un comportamiento similar. De todas formas se medirá de nuevo cuando estén los polarizadores construidos.

A estas pérdidas en los espejos hay que sumarle el 2 % que se pierde en la salida del girotrón debido a lóbulos laterales y el 1% que se absorbe en la ventana de vacío del TJ-II. En total son del 9 %.

Se producen también pérdidas a lo largo del recorrido de las microondas debidas a otras causas, como son: la rugosidad de la superficie de los espejos, la absorción en el aire, errores en el alineamiento, etc, pero son despreciables frente a las calculadas anteriormente.

CONCLUSIONES

En este informe se ha presentado un diseño para cambiar la primera línea de transmisión del sistema de ECRH del TJ-II. Se han conseguido las principales exigencias para lograr una mayor eficiencia de absorción de la energía en el plasma y para conseguir mayor flexibilidad en los experimentos de ECRH y ECCD.

Con los dos primeros espejos se consigue corregir el astigmatismo del haz de salida del girotrón. Esto permite que el resto de la línea tenga un haz gaussiano simétrico, que es más fácil de manejar. Otra de las ventajas que presenta es la posibilidad de corregir el haz de salida de un girotrón nuevo sin necesidad de cambiar el resto de los espejos de la línea.

Con el espejo interno se podrá focalizar el haz y hacer experimentos de calentamiento en el eje y fuera del eje. También se podrán llevar a cabo experimentos de ECCD.

Para conseguir la polarización adecuada de la onda que se lance al plasma se han diseñado dos polarizadores. Con los acopladores de potencia se tendrá una medida más fiable de la potencia suministrada al plasma, se podrán estimar las pérdidas reales a lo largo de la línea y con el espejo 9 podremos saber la polarización de la onda a la entrada de la cámara.

Por otra parte, la línea tiene unas pérdidas muy razonables y la distorsión del haz a lo largo de los espejos se presenta mínima.

Todo este trabajo se completará con las medidas a baja potencia que se realizarán tan pronto como estén los espejos fabricados. Se prevé la finalización de la fabricación en septiembre de 1999 y la puesta en marcha de la línea a alta potencia será a finales de dicho año.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en colaboración con el grupo de ECRH del IPF (Institut für Plasma Forschung) de la Universidad de Stuttgart. Agradezco a todos la ayuda prestada, tanto en el trabajo como a nivel personal. Especialmente al Dr. W. Kasperek por la supervisión de este trabajo, a L. Empacher por su ayuda en algunos de los cálculos, al Dr. G. Müller por aconsejar mi estancia en el IPF, al Dr. D. Wagner por su ayuda con las estaciones de trabajo y a F. Hollmann por su ayuda en el laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] R. Martín et al. '*Complex for ECRH and ECCD experiments on TJ-II*'. Proceedings of the 20th SOFT, September 1998, Marseille. p.403.
- [2] M. Sorolla et al. '*Beam Waveguide for ECRH at TJ-II*'. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, June 1997, Vol. **18**, No. 6, pp. 1161-1168.
- [3] A.Fernández et al. '*Líneas de transmisión cuasiópticas en el stellarator TJ-II*'. Conferencia Nacional URSI. Septiembre 1998. Pamplona, pp. 681-682.
- [4] K.Likin et al. '*Low power measurements of wave beam parameters along mirror lines in TJ-II*'. Proceedings of the 4th International Conference on Millimeter and Submillimeter Waves and Applications, July 1998, San Diego (USA).
- [5] D. Vinogradov. '*Mirror conversion of Gaussian beams with simple astigmatism*'. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, Vol **16**, No. 11, pp.
- [6] A. Siegman. '*An introduction to masers and lasers*'. Ed. McGraw Hill. 1971. USA
- [7] M.Thumm. '*High-power microwave transmission systems, external mode converters and antenna technology*'. Gyrotron oscillators. C.J. Edgcombe. Ed. Taylor & Francis Ltd. London (UK). 1993.
- [8] J.Doane. '*Grating polarizers in Waveguide Miter Bends*'. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1992, Vol **13**, pp.1727-1743.
- [9] L. Empacher et al. '*New Developments and Tests of High Power Transmission Components for ECRH on ASDEX-Upgrade and W7-AS*'. Proceedings of the 20th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. December 1995. Florida (USA). pp. 473-474
- [10] A. Olver. '*Basic properties of antennas*'. The handbook of Antenna Design. Ed. Peter Peregrinus Ltd, London, UK.1986.
- [11] M.Thumm and W. Kasperek. '*Recent advanced technology in electron cyclotron heating systems*'. Fusion Engineering and Design, 1995, Vol **26**, pp. 291-317.
- [12] J.A. Murphy. '*Off axis ellipsoidal mirrors*'. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1987, Vol. **8**, pp. 1165-1187.

[13] R. Schwab et al. '*Open resonator studies for the determination of the surface resistance at mm-wave frequencies*'. Proceedings of the 9th Conference and Exhibition on Microwaves, Radio Communication and Electromagnetic Compatibility. April 1995. Sindelfingen (Germany), pp. 106-110.

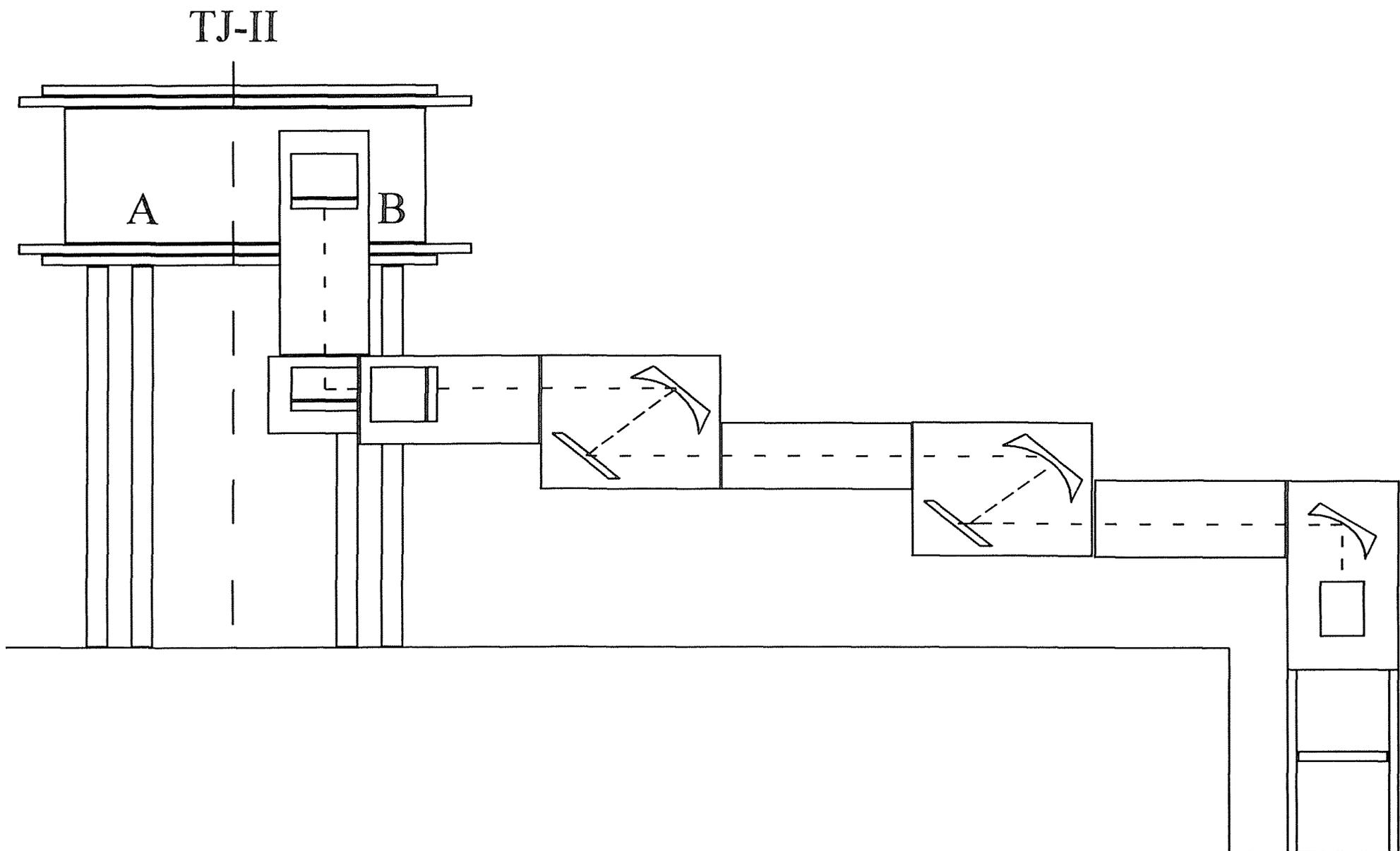


Figura 1

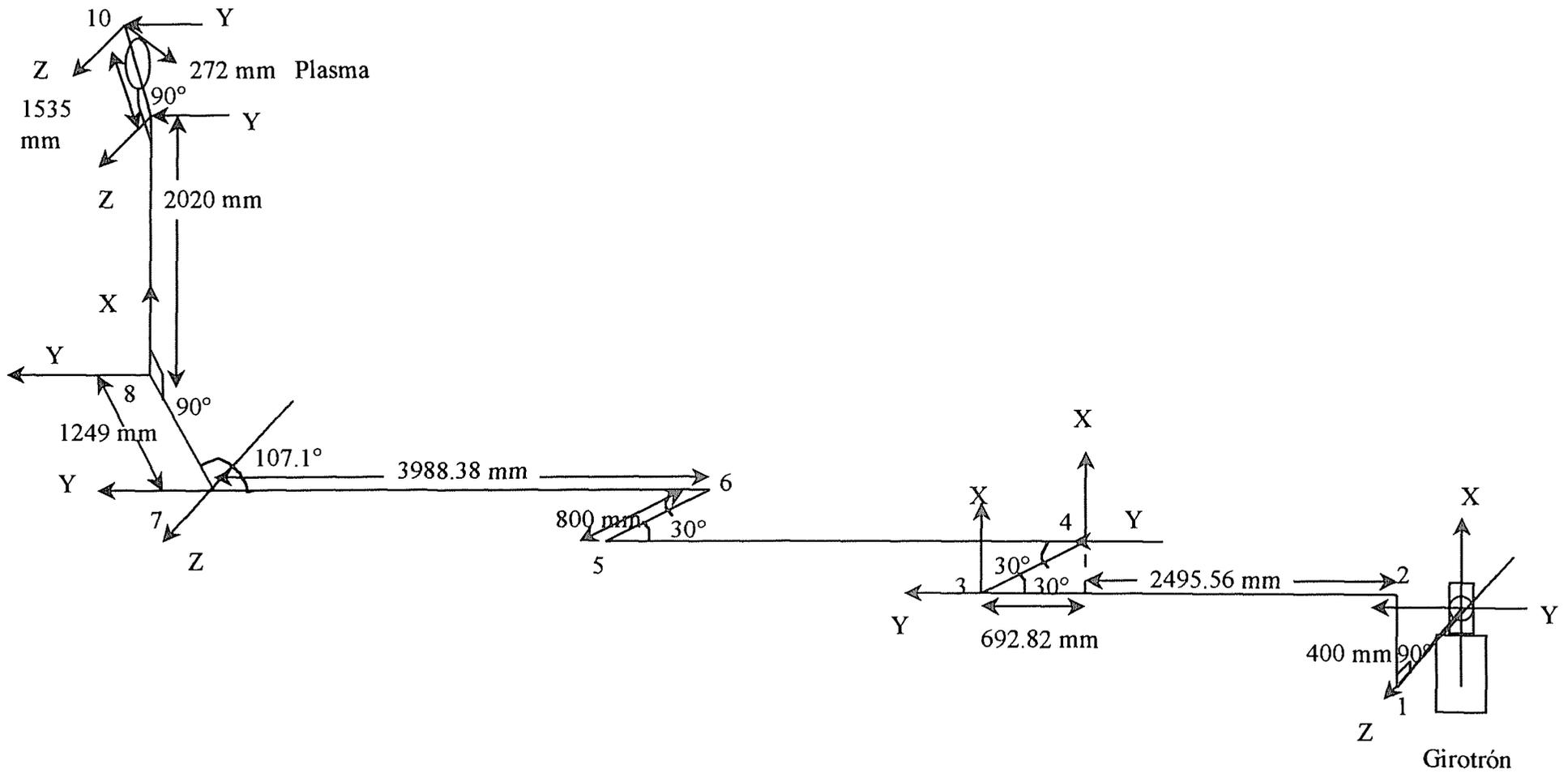


Figura 2

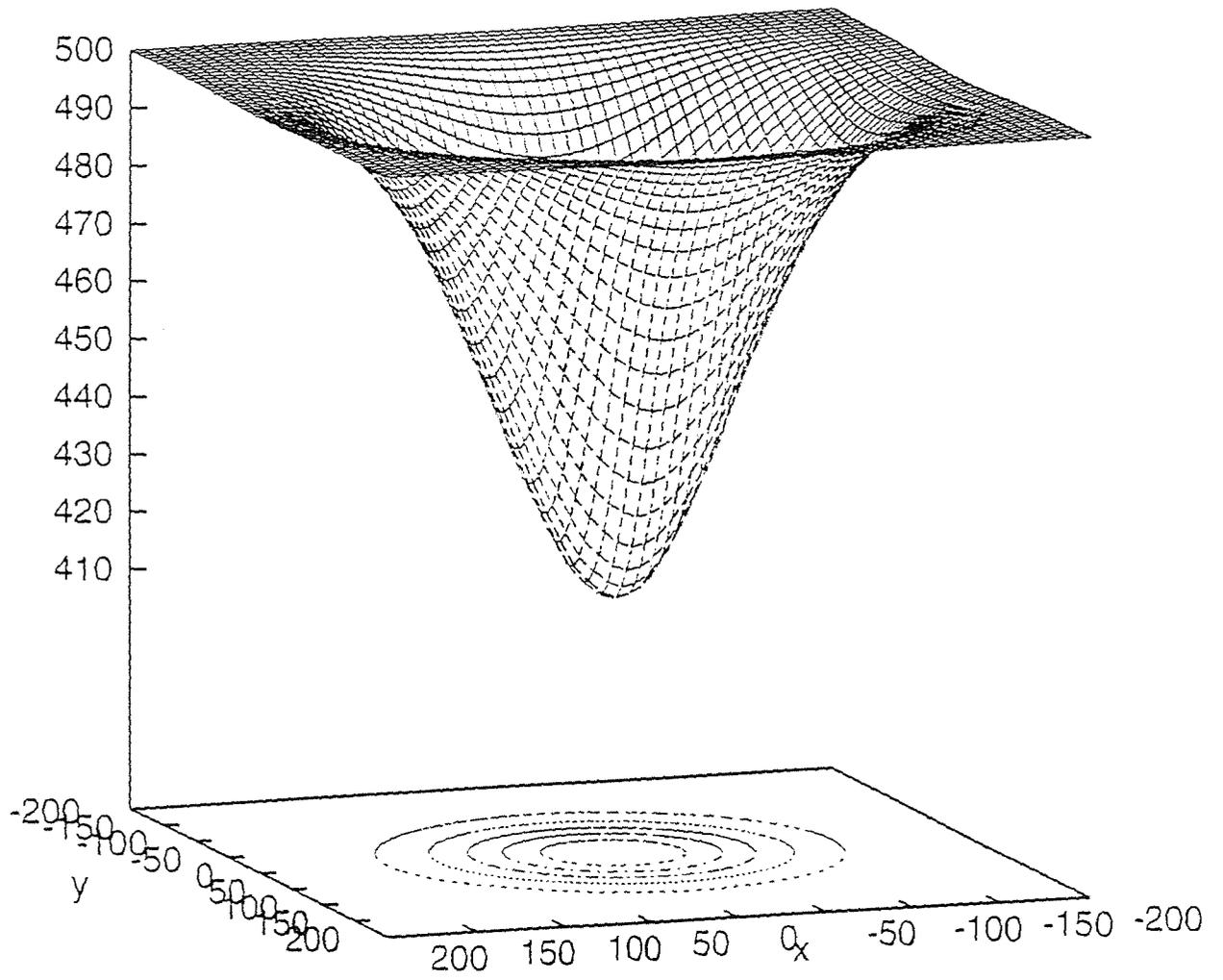


Figura 4

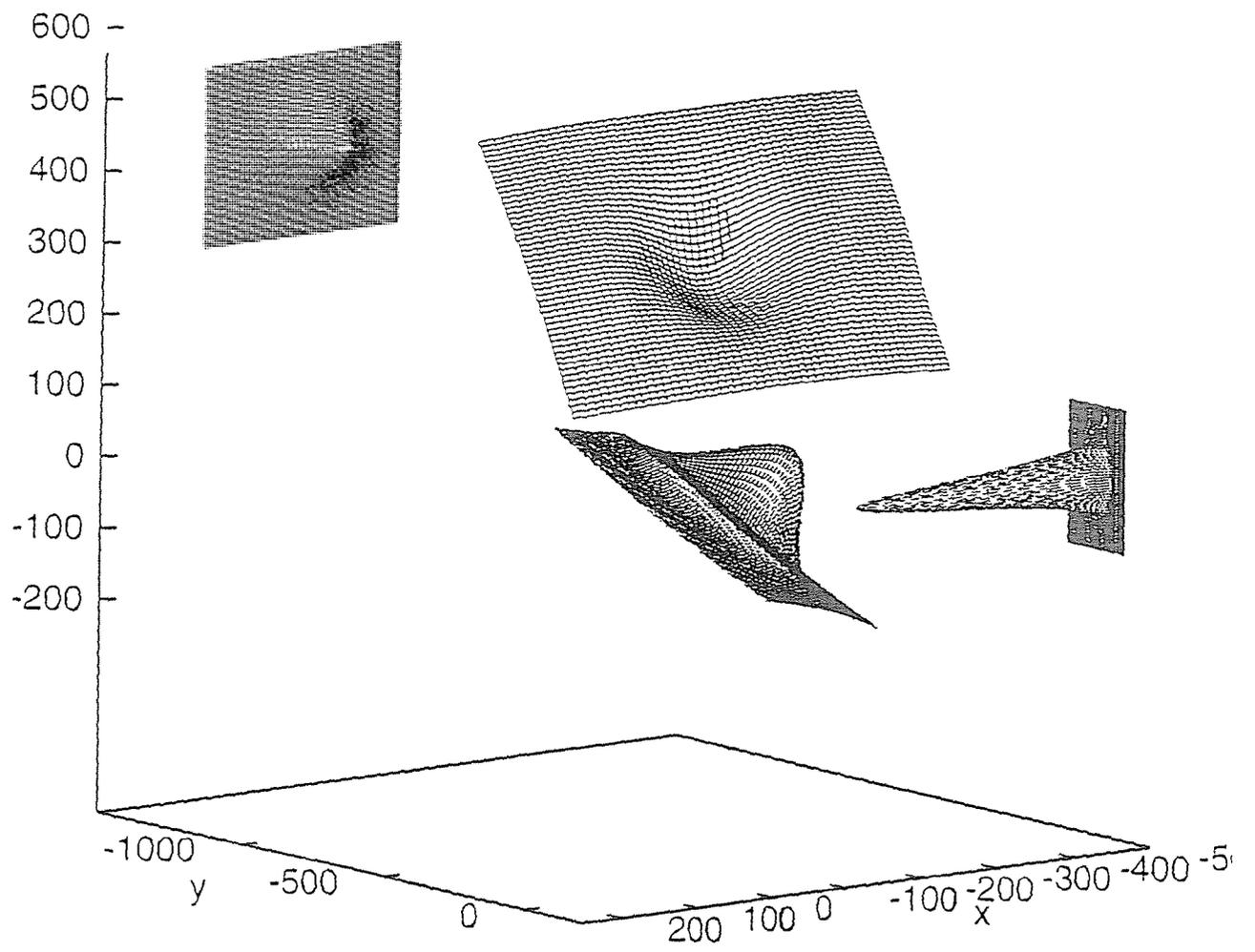


Figura 5

GIRADOR DE LA POLARIZACIÓN $\lambda = 5.635 \text{ mm}$

Perfil coseno, 20:1

Amplitud = 1.065 Periodo = 3.381

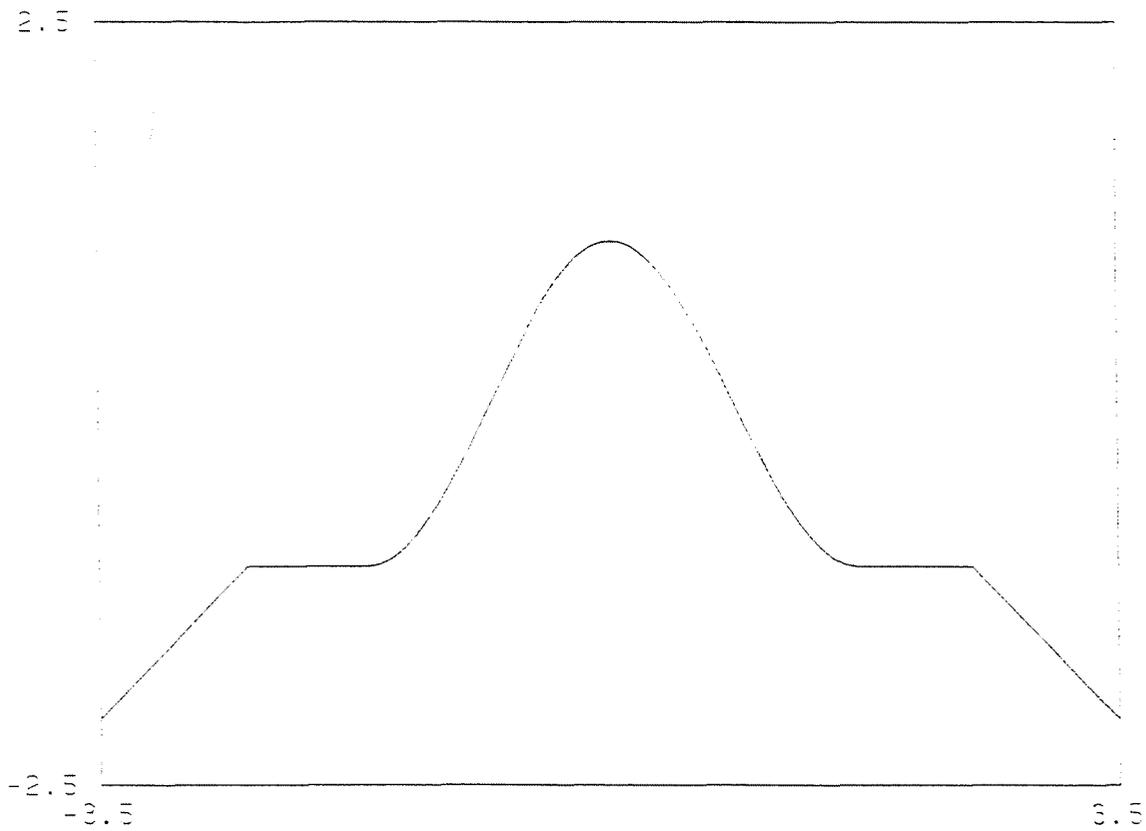


Figura 7

POLARIZADOR ELÍPTICO $\lambda = 5.635 \text{ mm}$

Perfil coseno, 20:1

Amplitud = 0.738 Periodo = 3.381

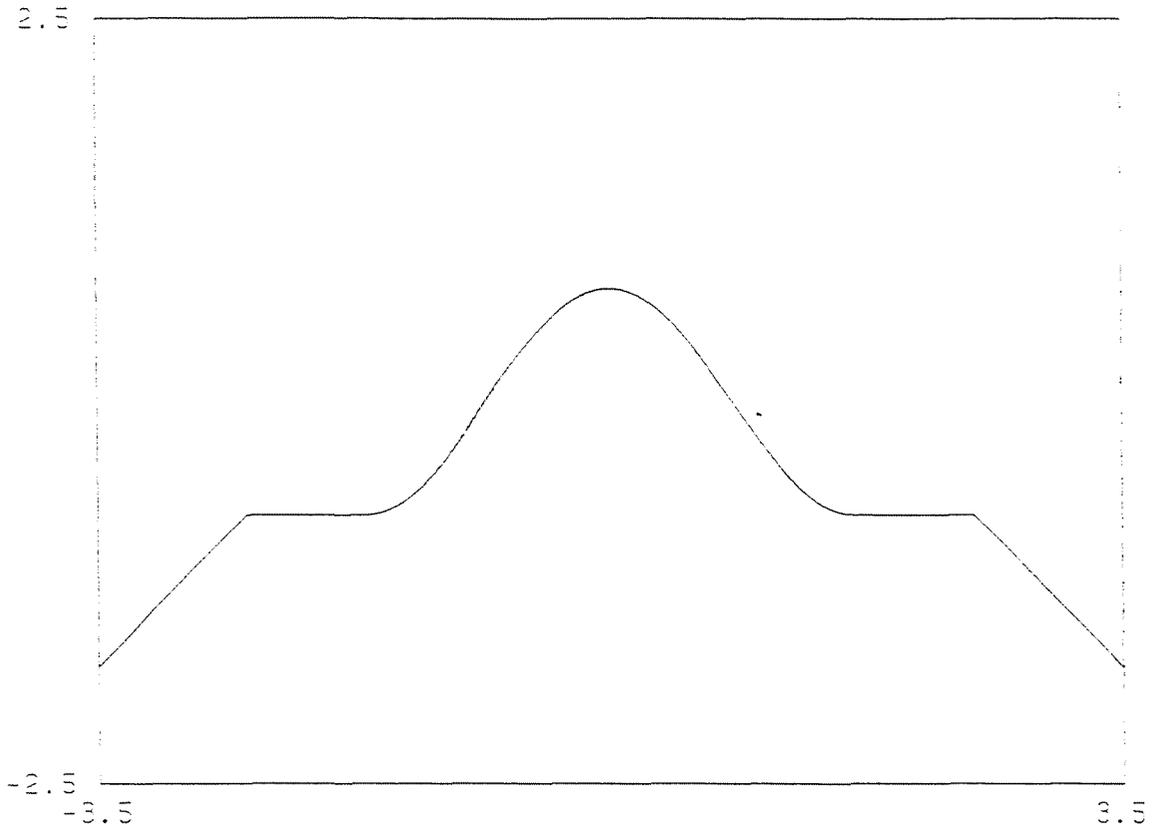
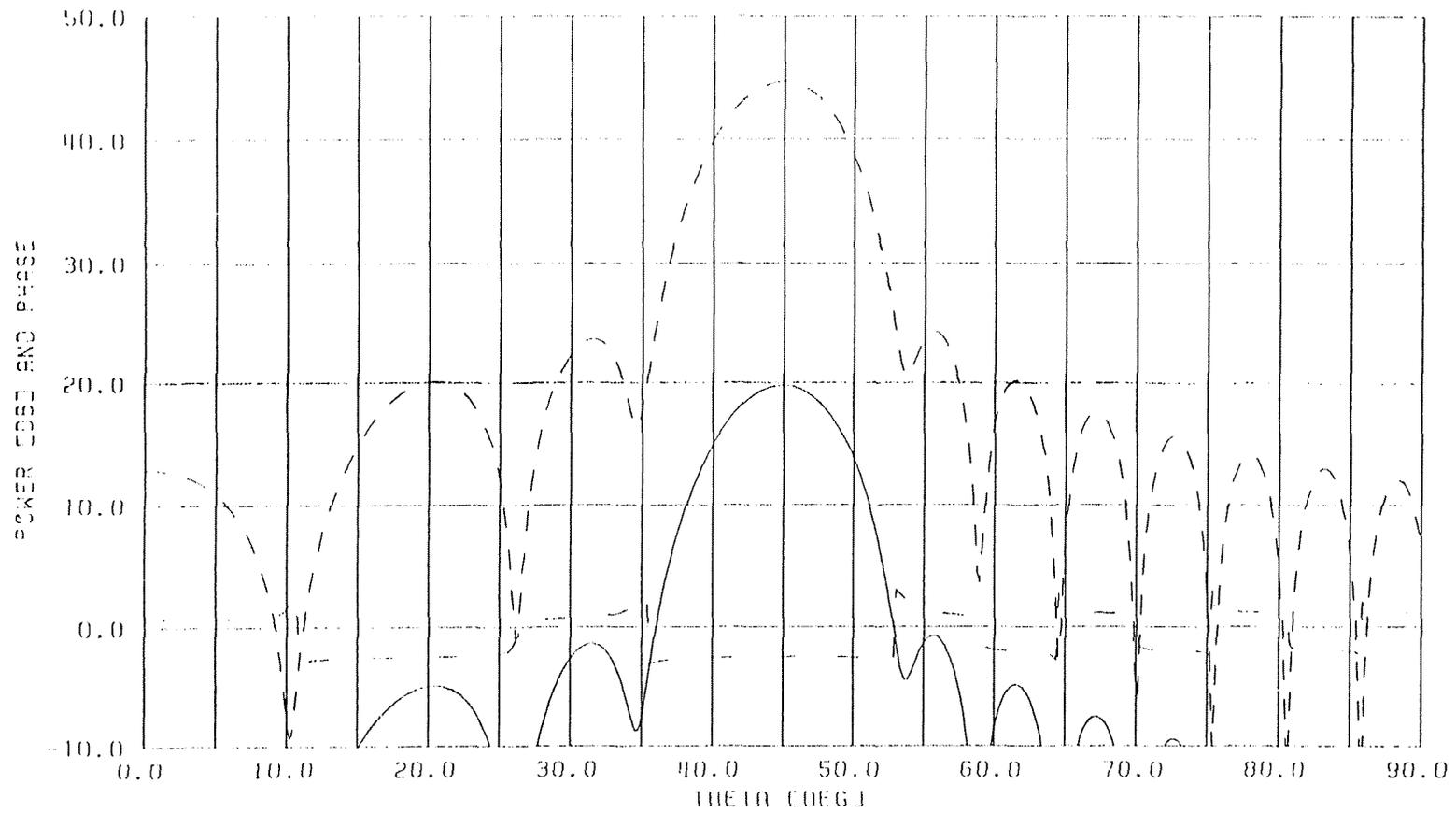


Figura 8

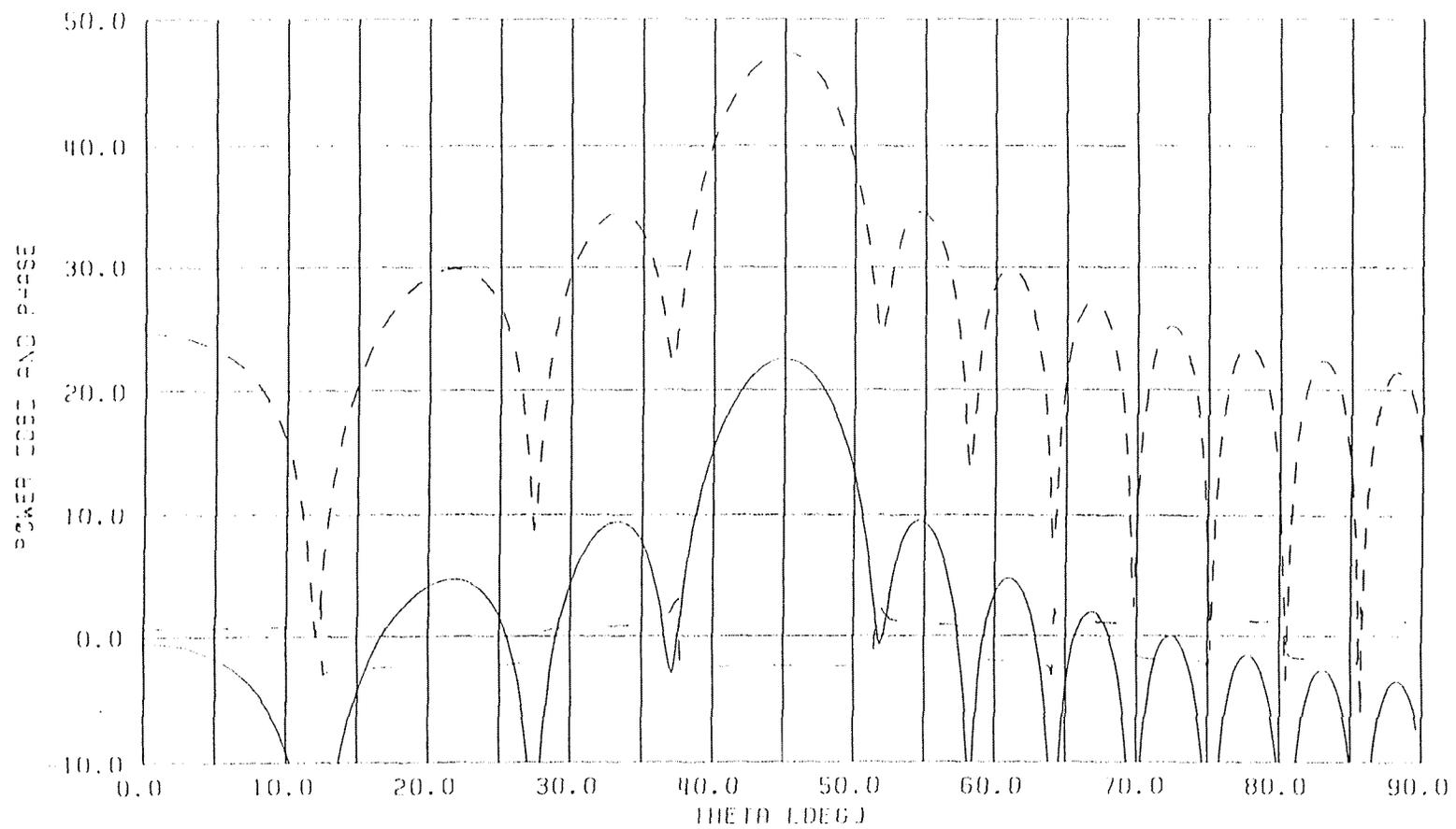


A = 30.0 ARM = 900.0 W = 0.0 F = 53. GHz

PLM1 = 5.8320 PHM1 = 45.0

PH(1) = 3.4

Figura 11

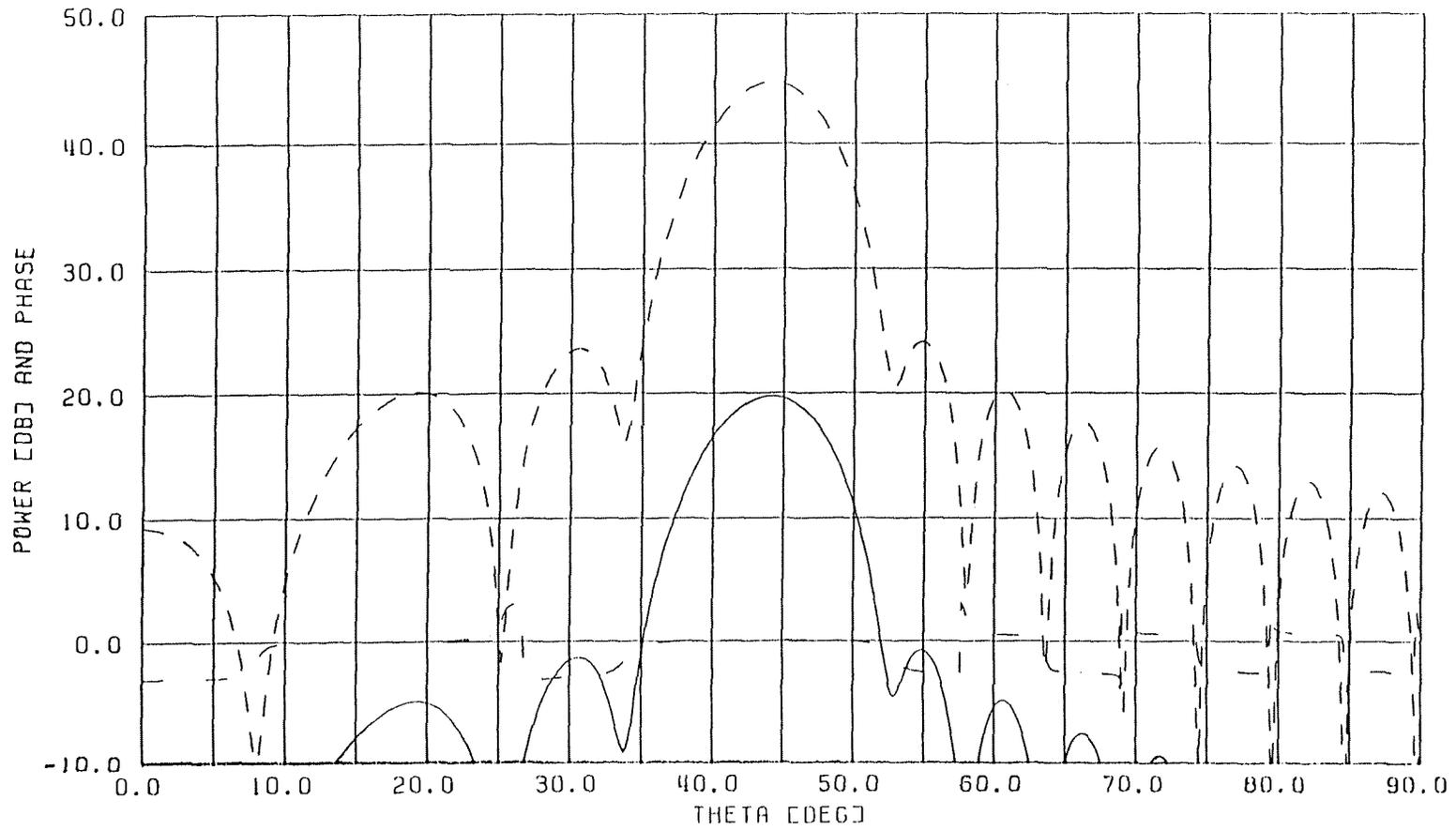


$\Lambda = 30.0$ $ARM = 900.0$ $W = 0.0$ $\Gamma = 53. \text{ GHz}$

$PLM1 = 3.8320$ $PHI1 = 45.0$

$PH(1) = 3.4$

Figura 12

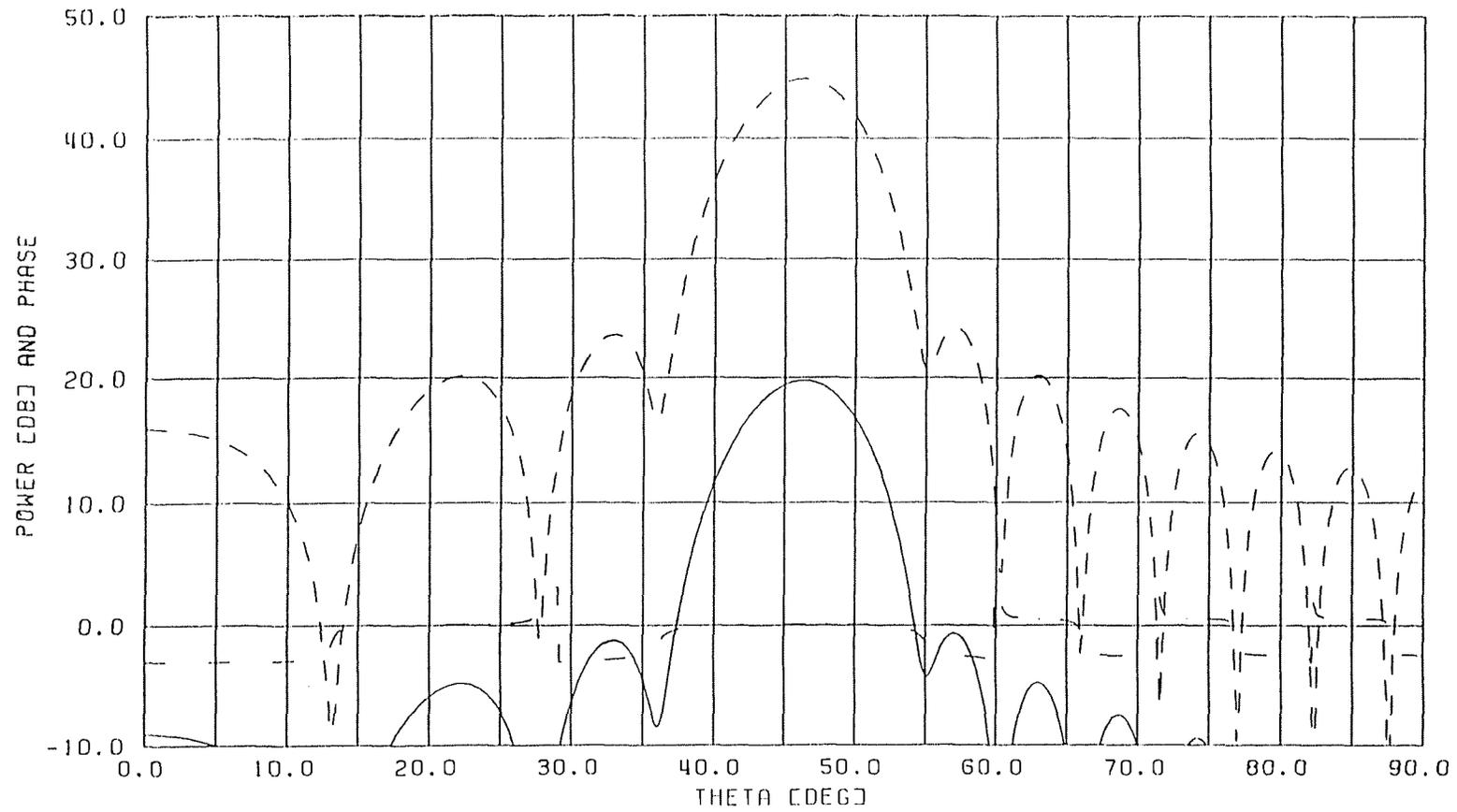


A = 30.0 ARM = 900.0 W = 0.0 F = 54. GHZ

PLM1 = 3.8320 PHI1 = 44.2

PH(1) = 3.4

Figura 13



A = 30.0 ARM = 900.0 W = 0.0 F = 52. GHZ

PLM1 = 3.8320 PH11 = 46.3

PH(1)= 3.4

Figura 14

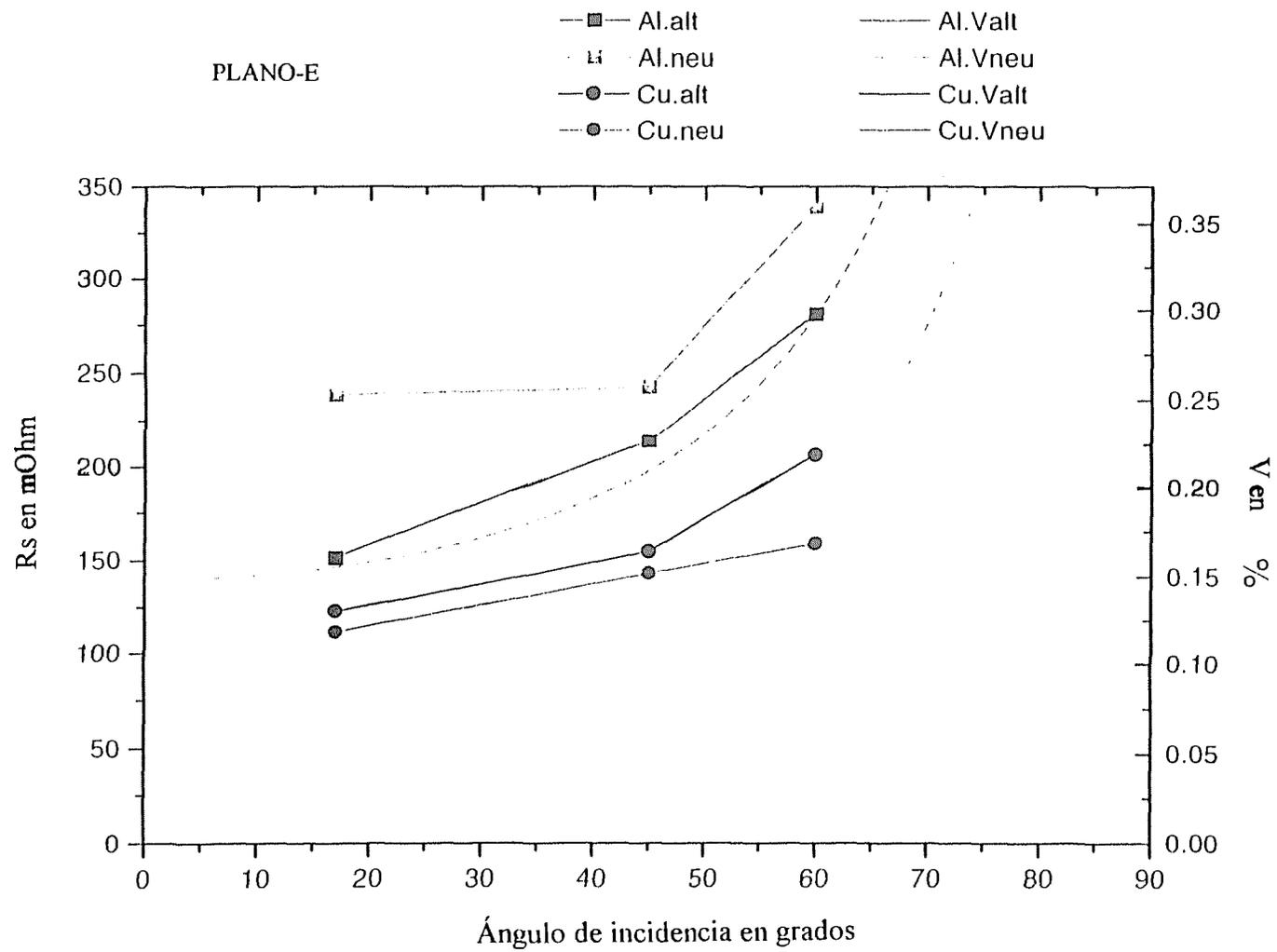


Figura 15

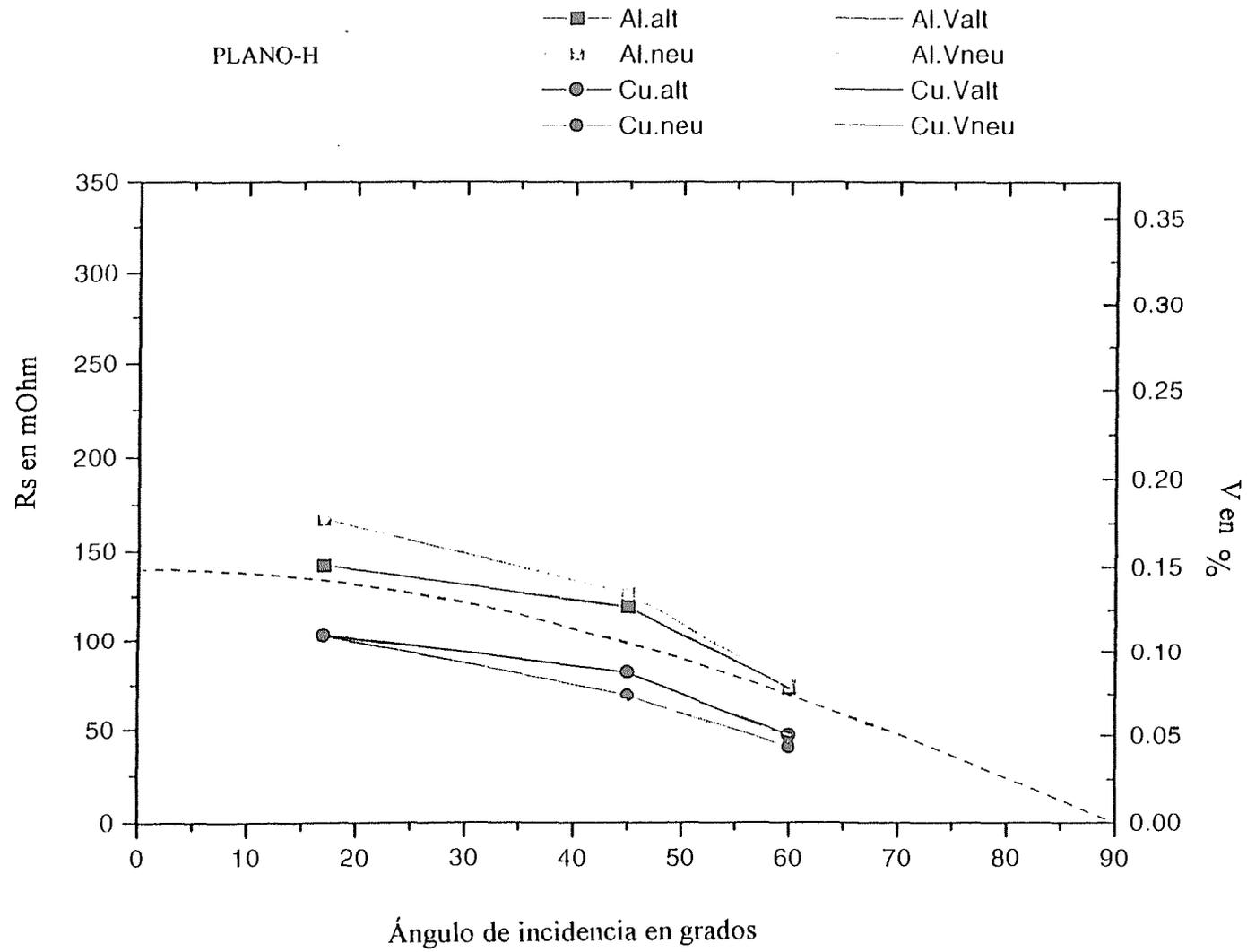


Figura 16

Absorption of Copper Surfaces (140 GHz)

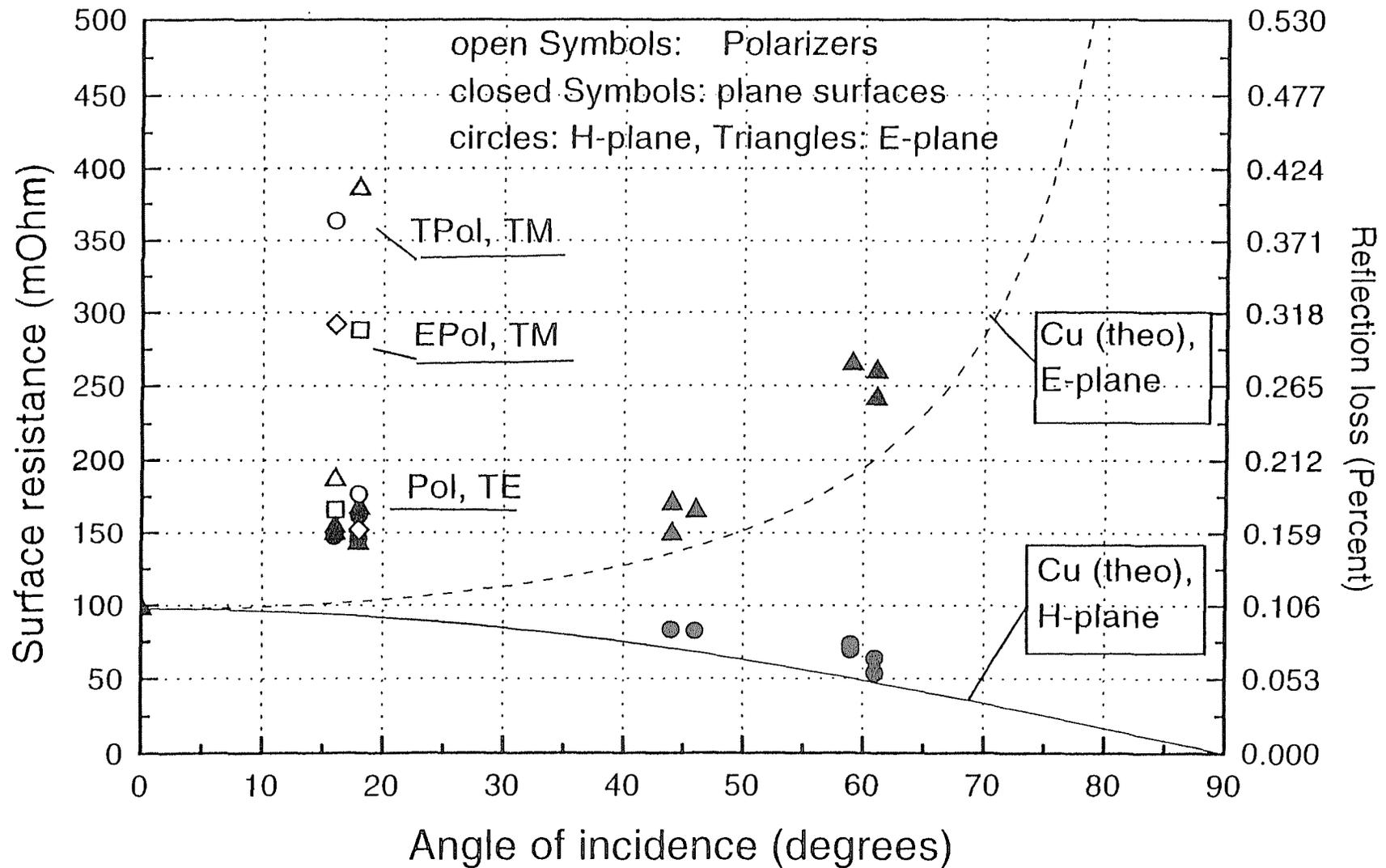


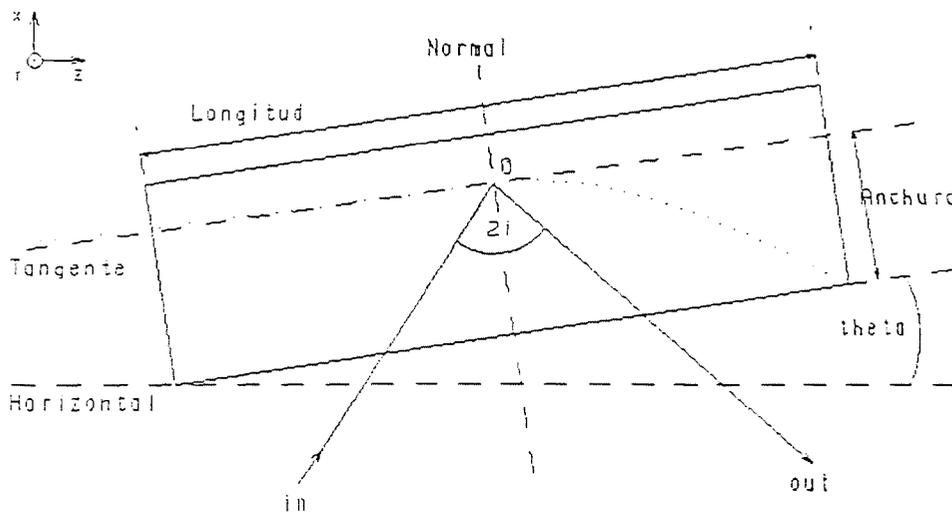
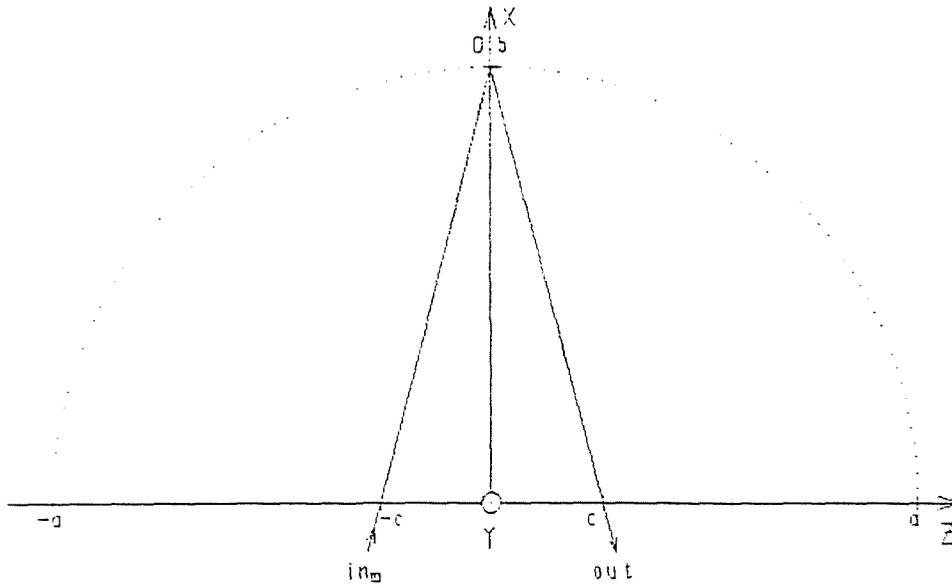
Figura 17

APÉNDICE

Figuras de los espejos 4,6,7,8,9, y 10

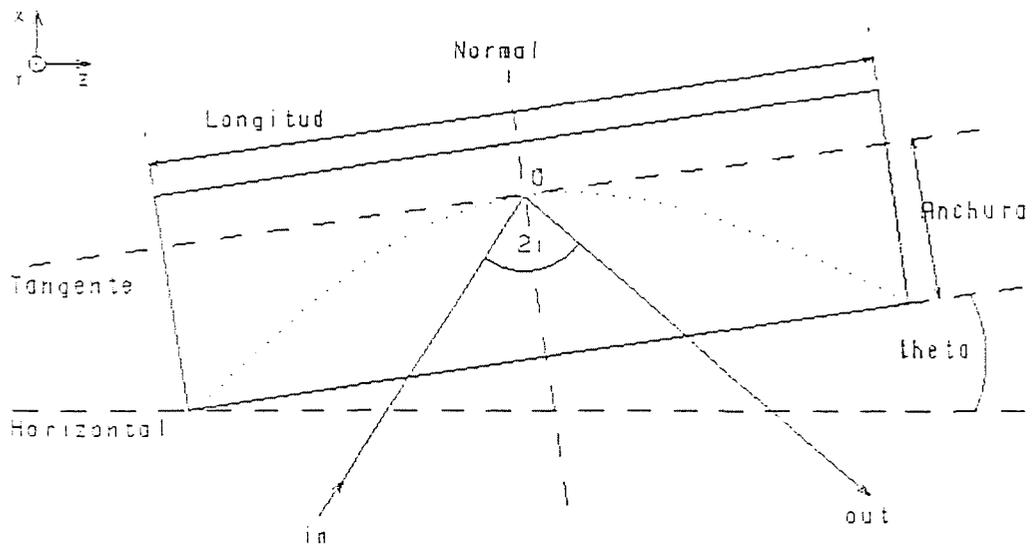
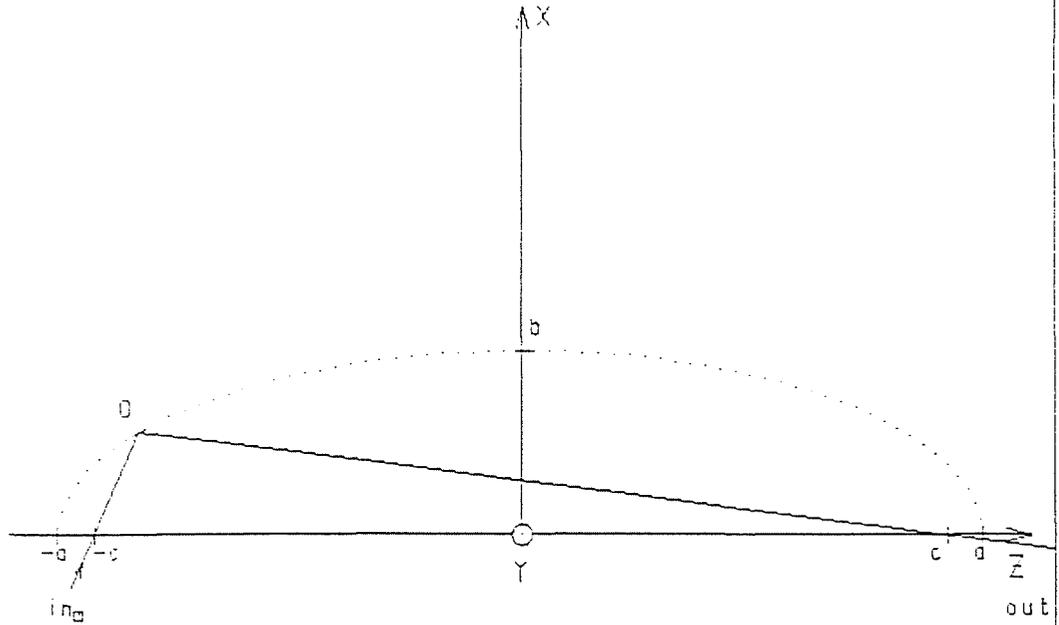
Figura de la posición del espejo interno dentro de la cámara de vacío del TJ-II

ESPEJO 4 Y 6



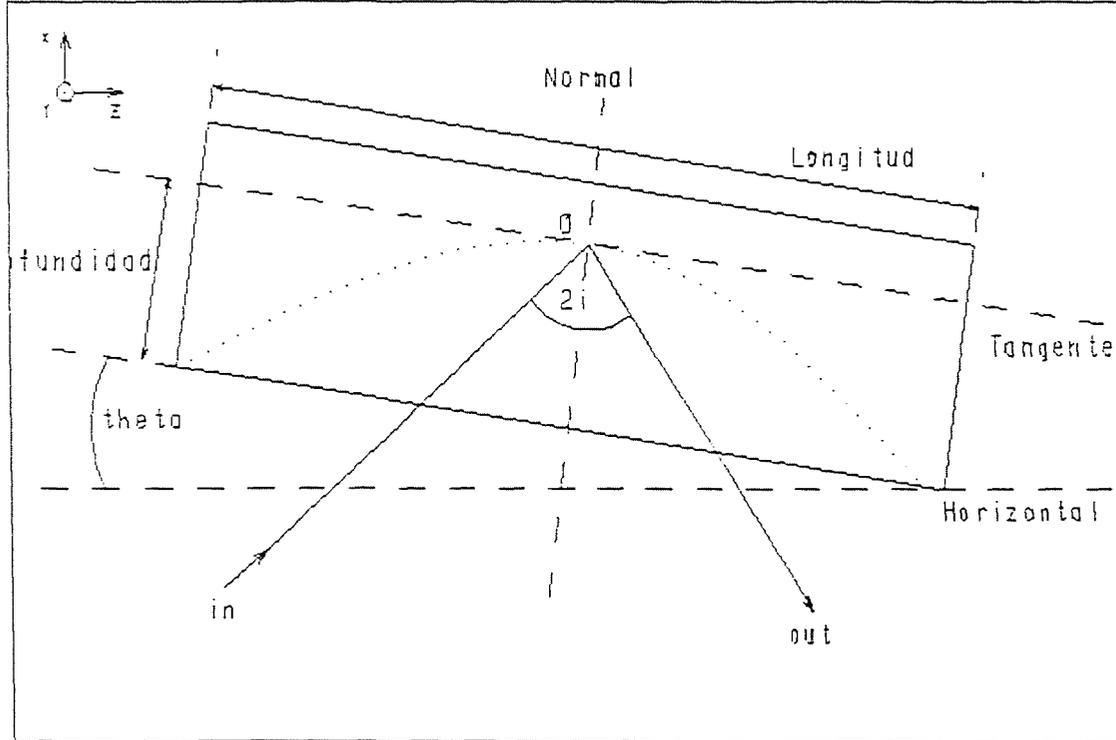
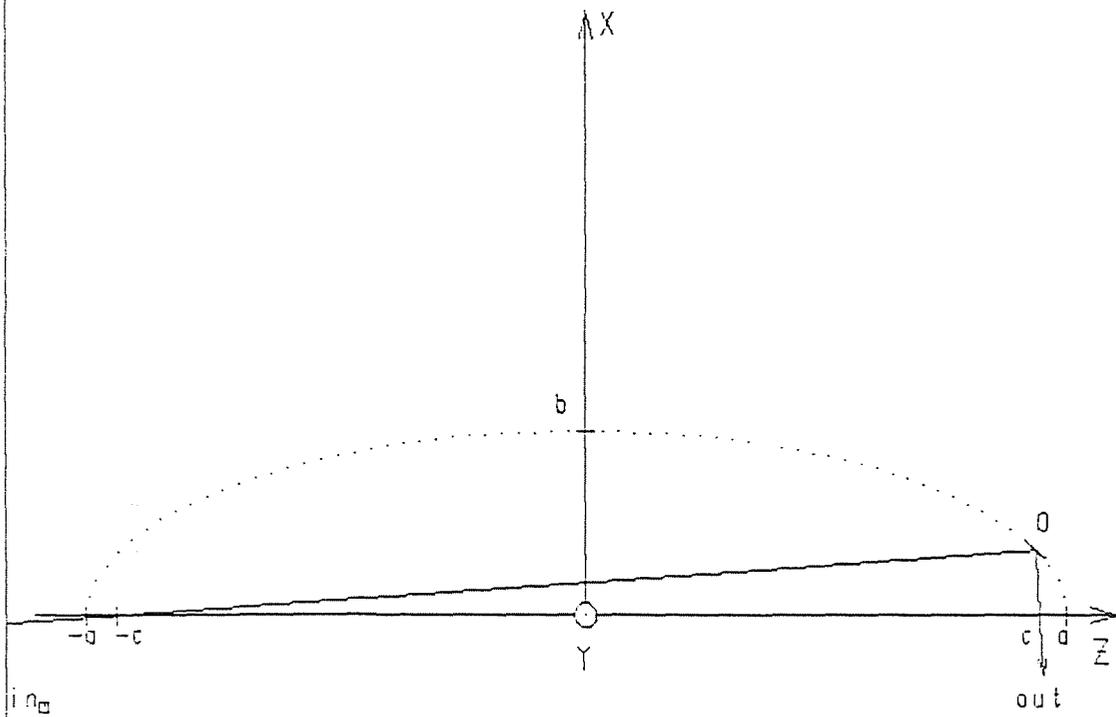
HACES :	DIMENSIONES:	ELIPSOIDE :	ESPEJO :
v01 = 59.83 nm	Profundidad = 3.76 mm (Plano xZ)	a = 3999.56 nm	l = 1994.28 nm
v02 = 59.83 nm	Longitud = 341.31 mm (Plano xZ)	b = 3852.55 nm	x0 = 3852.55 nm
d1 = 1924.13 nm	Anchura = 328.49 mm (Direccion Y)	c = 1032.32 nm	r0 = 0.00 nm
d2 = 1924.13 nm			z0 = -0.01 nm
ia = 3.76 nm			theta = 0.00 Grad
i = 15.00 Grad			

ESPEJO 7



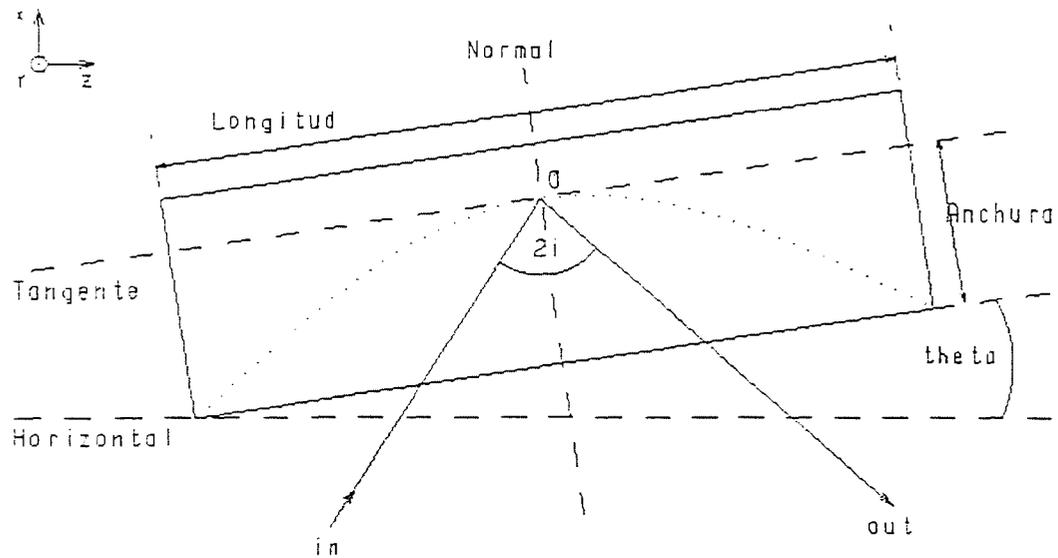
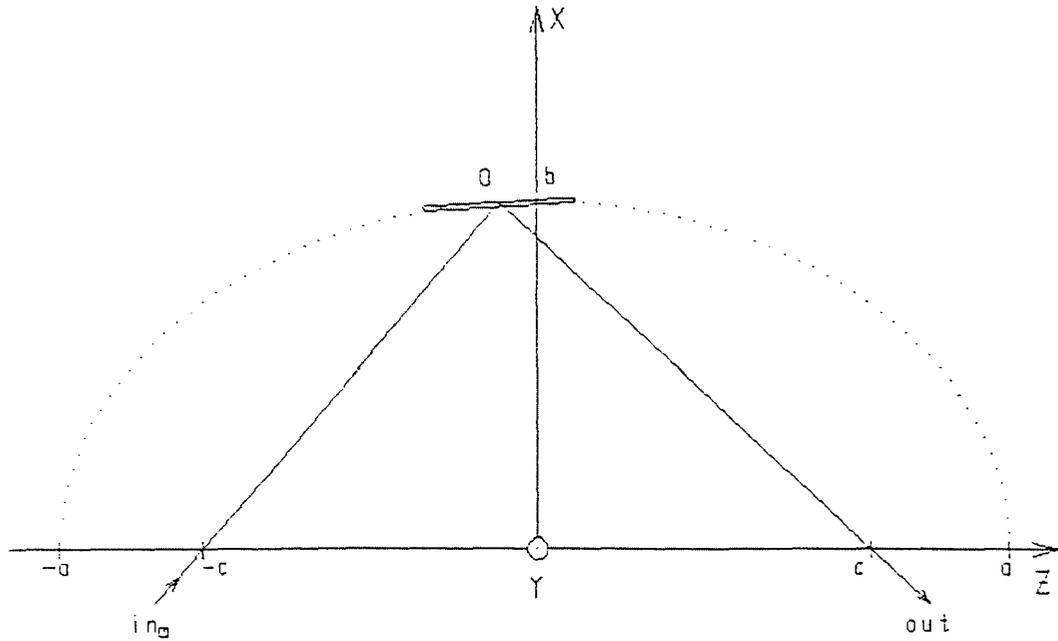
HACES :	DIMENSIONES:	ELIPSOIDE :	ESPEJO :
*01 = 58.33 mm	Profundidad = 3.64 mm (Plano XZ)	a = 17036.58 mm	l = 3521.56 mm
*02 = 16.98.48 mm	Longitud = 595.01 mm (Plano XZ)	b = 2508.11 mm	X0 = 3642.21 mm
*1 = 16.98.48 mm	Anchura = 338.44 mm (Direccion Y)	c = 15744.51 mm	Z0 = 0.00 mm
*2 = 16.98.48 mm			ZC = -14118.81 mm
*3 = 5.34 mm			theta = 29.90 Grad
*4 = 53.55 Grad			

ESPEJO 8



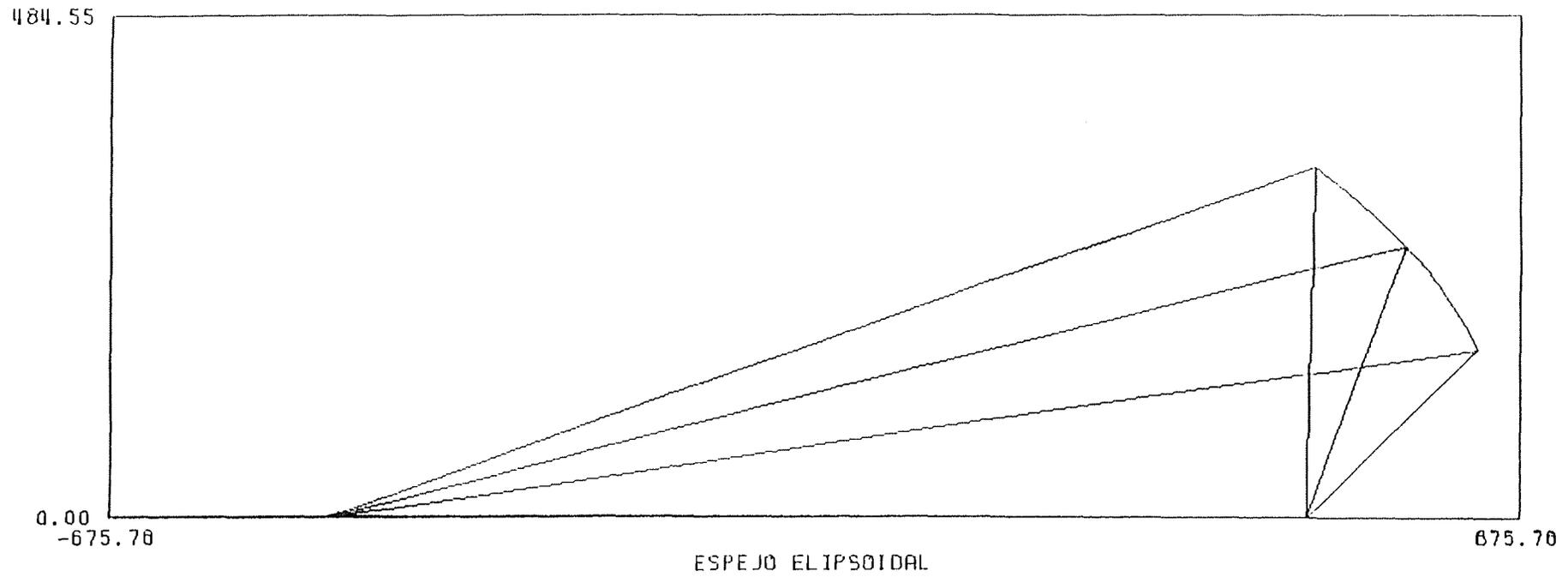
HACES :	DIMENSIONES:	ELIPSOIDE :	ESPEJO :
$\alpha 01 = 83.88 \text{ nm}$	Profundidad = 8.96 mm (Plano XZ)	$a = 11592.69 \text{ nm}$	$i = 1304.99 \text{ nm}$
$\alpha 02 = 27.83 \text{ nm}$	Longitud = 529.06 mm (Plano XZ)	$b = 3889.52 \text{ nm}$	$x0 = 1385.27 \text{ nm}$
$d1 = 729.30 \text{ nm}$	Anchura = 341.28 mm (Direccion T)	$c = 10920.72 \text{ nm}$	$y0 = 0.00 \text{ nm}$
$d2 = 1242.51 \text{ nm}$			$z0 = 10832.50 \text{ nm}$
$\alpha 0 = 5.54 \text{ nm}$			$\theta = 41.36 \text{ Grad}$
$i = 45.00 \text{ Grad}$			

ESPEJO 9



HACES :	DIMENSIONES:	ELIPSOIDE :	ESPEJO :
*01 = 27.33 nm	Profundidad= 9.96 mm Plano XZ	a = 1071.11 nm	i = 533.82 nm
*02 = 30.39 nm	Longitud = 345.11 mm Plano XZ	b = 756.16 nm	x0 = 753.71 nm
*1 = 777.43 nm	Anchura = 230.29 mm Direccion T1	c = 750.61 nm	y0 = 0.00 nm
*2 = 322.34 nm			z0 = -86.06 mm
l0 = 5.34 mm			theta = 3.25 Grad
i = 45.30 Grad			

ESPEJO 10



LARGO	ANCHO	FREC	THETA				
235.72	208.10	53.20	56.00				
X	Y	RPY1	RPX1	RPY2	RPX2?		
565.76	265.00	163.34	636.22	341.74	479.08		
A	B	WO	D ?	F	WOSAL	DSAL	
675.78	484.55	30.09	712.16	222.82	9.54	271.96	

ESPEJO 10 - INTERIOR DE LA CÁMARA DE VACÍO

PUERTO B3 LATERAL

