

Cálculo de cargas térmicas en
la Cámara de Vacío del TJ-II
durante la inyección de Haces
Neutros

J. Guasp
C. Fuentes
M. Liniers



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 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: 238-96-001-0
ISSN: 1135-9420

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700412, 700380

NUMERICAL ANALYSIS, PLASMA, BEAM INJECTION, TOKAMAK DEVICES, HELIAC
STELLARATORS, THERMONUCLEAR DEVICES

"Cálculo de cargas térmicas en la Cámara de Vacío del TJ-II durante la inyección de Haces Neutros"

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.

68 pp., 26 figs. 12 refs.

Resumen

En este estudio se evalúan teóricamente las cargas térmicas que la inyección de haces neutros produce en la compleja estructura tridimensional de la cámara de vacío del TJ-II, modelada con considerable realismo.

Para ello ha sido necesario modificar el código de cálculo para las cargas térmicas (DENS B) con el fin de poder utilizar las paredes de la cámara del TJ-II a la vez como blanco y como elementos de intercepción del haz (*scrapers*) que puedan ocultarse unos a otros.

Tras una breve descripción de la versión primitiva de ese código (§2) y del de visualización MOVIE (§3), se describen las modificaciones efectuadas (§§4 y 5), finalmente se presentan los resultados obtenidos (§6).

Las modificaciones aportadas al código DENS B, junto con una mayor flexibilidad en la visualización de la complicada geometría de la cámara de vacío del TJ-II, ha permitido dar más realismo a los cálculos de cargas en la pared, tanto en presencia de plasma como sin él, confirmando esencialmente cálculos anteriores y mostrando claramente las zonas de la cámara que van a necesitar protección.

"Thermal loads on the TJ-II Vacuum Vessel under Neutral Beam Injection"

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.

68 pp., 26 figs. 12 refs.

Abstract

In this study a numerical analysis of power loads on the complex 3D structure of the TJ-II Vacuum Vessel, modeled with reasonable accuracy, under NBI, is done.

To do this it has been necessary to modify deeply the DENS B code for power loads in order to include the TJ-II VV wall parts as targets and as beam scrapers, allowing the possibility of self-shadowing.

After a short description of the primitive version of the DENS B code (§2) and of the visualisation code MOVIE (§3), the DENS B upgradings are described (§§4, 5) and finally the results are presented (§6).

These code modifications and the improving on the visualisation tools provide more realistic load evaluations, both with and without plasma, validating former results and showing clearly the VV zones that will need new protections.

Indice

1. Introducción.
 2. Versión primitiva del código de cargas DENSB.
 3. Código de visualización MOVIE.
 4. Utilización de blancos tridimensionales en DENSB.
 5. Utilización de *scrapers* tridimensionales en DENSB.
 6. Resultados.
 - 6.1 Cargas en los puntos críticos en ausencia de Plasma.
 - 6.2 Efecto de la atenuación causada por el Plasma.
 - 6.3 Cargas debidas a las pérdidas de iones rápidos.
 7. Conclusiones.
 - A1. Estructura de los ficheros utilizados.
 - A1.1. Ficheros de geometría.
 - A1.2. Ficheros de normales.
 - A1.3. Fichero de función.
 - A2. Utilización del código DENSB4.
 - A3. Distribución detallada de cargas.
- Referencias.
- Lista de Tablas.
- Pies de las Figuras.

1. Introducción

En este estudio se evalúan teóricamente las cargas térmicas que la inyección de haces neutros produce en la compleja estructura tridimensional de la cámara de vacío del TJ-II modelada con considerable realismo.

En anteriores trabajos se han analizado diversos aspectos de la inyección de haces neutros en el TJ-II: p. ej. evaluación de la potencia interceptada por diversos obstáculos [1], [2], comportamiento de la absorción en el plasma [3], [4], comportamiento de las pérdidas con la energía y la densidad [5], [6], cálculos de transporte [7], impactos de iones rápidos y de los neutros procedentes del intercambio de carga [8], [9], etc., etc. En todos ellos la cámara de vacío del TJ-II ha estado modelada por una estructura relativamente sencilla formada por fragmentos de cilindros y tramos rectos (Fig. 1.1, que muestra también la geometría de inyección). Esta simplificación, suficiente para estudios de Física y para evaluaciones aproximadas de cargas, es insuficiente cuando se desean calcular con detalle esas cargas en las zonas críticas, donde deberán colocarse protecciones adecuadas, ya que la forma real de la cámara del TJ-II es extremadamente complicada (Fig. 1.2). En particular, las placas verticales que separan anillos de sectores están ausentes en el modelo simplificado de cámara y son, precisamente esas placas, las que reciben más cargas y por lo tanto requieren las protecciones.

Por otro lado la ventana de entrada del haz (Fig. 1.3) no estaba incluida tampoco en el modelo simplificado y, sin embargo, resulta ser otro de los puntos críticos ya que recibe fuertes cargas, que no son atenuadas por el plasma, e intercepta una fracción de potencia notable del haz.

Por todo ello ha sido necesario modificar el código de cálculo para las cargas térmicas (DENS_B) con el fin de poder utilizar las paredes de la cámara del TJ-II a la vez como blanco y como elementos de interceptación del haz (*scrapers*) que puedan ocultarse unos a otros.

Tras una breve descripción de la versión primitiva de ese código (§2) y del de visualización MOVIE (§3), pasaremos a describir las modificaciones efectuadas (§§4 y 5) para finalmente presentar los resultados obtenidos (§6).

2. Versión primitiva del código de cargas DENS B

Los primeros cálculos para las cargas térmicas en la cámara del TJ-II se efectuaron con la versión primitiva del código DENS B [10].

Este código calcula la densidad de potencia que llega a cada punto de un blanco dado. Para ello se dividen las fuentes de los haces neutros en un número suficiente de fragmentos y se trazan rayos (*beamlets*) desde esos puntos de la fuente a cada uno de los del blanco. Para cada uno de esos rayos se analiza si intercepta los diafragmas (o placas) limitadoras del haz (*scrapers*) en cuyo caso el rayo se elimina. Si, por el contrario, el rayo atraviesa todos los *scrapers* se evalúa la densidad de potencia parcial que recibe ese punto del blanco teniendo en cuenta la desviación del rayo con respecto a las líneas focales, el decrecimiento lateral en intensidad que viene definido por las divergencias gaussianas horizontal y vertical del haz y su ángulo con la normal al blanco. La densidad total de potencia que recibe el punto del blanco es la suma de todas las contribuciones parciales de los rayos que llegan a él.

Una limitación muy importante de esa versión original de DENS B es que los blancos deben ser exclusivamente planos (rectángulos o elipses) o líneas rectas, mientras que los *scrapers* son siempre diafragmas huecos (o placas opacas) planos, definidos por un contorno cerrado.

El código permite la representación gráfica de las líneas de nivel de la densidad de potencia en el blanco y calcula también la potencia total interceptada. La geometría de la fuente, características del haz y forma del blanco y de los *scrapers* se suministran al programa en coordenadas *locales* (referidas al inyector o a los *scrapers*) por medio de un fichero de entrada (cf. [10]).

Para todos los cálculos descritos en este estudio esas características son las de la Tabla 2.1, similares a las del sistema de inyección de ATF. El sistema está dotado de un diafragma circular de radio variable (*shutter*) que sirve para colimar el haz y eliminar halos laterales para el que se ha tomado como radio de apertura el valor mínimo (0.10 m) y situado a 0.40 m de la ventana de entrada. Este *shutter* actúa como primer *scraper* y se supone que sobre él incide 1 MW de potencia.

El segundo *scraper* es la propia ventana de entrada (Fig.1.3), rectangular (27cm x 34 cm), verticalmente alargada, que no está centrada con el haz, el centro del haz #1 se encuentra separado 8.3 cm horizontalmente y 13 cm verticalmente de la esquina superior izquierda de la ventana. Un diafragma plano hueco, con el contorno interior de esa ventana, simula la intercepción del haz producida por el *ducto* que une el shutter a la ventana de entrada.

Usualmente se utiliza un tercer *scraper* con el contorno interno del anillo RA1 que se encuentra debajo de la bobina toroidal TFA1 que, como se verá, intercepta considerablemente el haz a la entrada.

Un ejemplo típico de resultados obtenidos con esa primera versión de DENS B, es el cálculo de la potencia interceptada por esos tres primeros *scrapers* que aparece en la Tabla 2.2 y Fig. 2.1, se observará que la mayor parte de la potencia es interceptada por el shutter (~17%) aunque los otros dos diafragmas intercepten también una parte importante, de

manera que la potencia transmitida, es decir, la que entra en el toro, es de un 75%. La versión inicial de DENSB sólo permite el cálculo aproximado de la densidad de potencia de pico que reciben esos diafragmas (ya que no poseen forma rectangular) que para la TFA I se sitúa alrededor de 1 kW/cm^2 .

El resto de los anillos situados bajo las bobinas toroidales también pueden ser utilizados como *scrapers* (por medio de diafragmas con su contorno interno) simulando así, de manera rudimentaria, la acción de intercepción de la cámara. La Fig.2.2 es el resultado de una composición de diferentes cálculos efectuados con DENSB, con esos contornos como *scrapers* y muestra, esquemáticamente, la posición relativa del haz y del plasma para diversos ángulos toroidales Φ , así como la distorsión que ocasiona la intercepción en los contornos de igual densidad de potencia del haz.

Es evidente que la forma helicoidal, fuertemente tridimensional de la cámara del TJ-II se presta muy mal a ser tratada con blancos rectangulares y diafragmas planos. Para el TJ-II es indispensable poder efectuar los cálculos no sólo con blancos de forma arbitraria cuyos elementos se adapten a la geometría de la cámara sino también poder considerar esos mismos elementos como limitadores del haz, permitiendo la "auto ocultación", es decir tener en cuenta no sólo que unos elementos apantallan a otros sino que un mismo elemento, a la vez, puede actuar de blanco y de *scraper* simultáneamente. Esto exige una modificación profunda del código (DENSB4) que será discutida en los §§4 y 5.

Por último también es indispensable disponer de posibilidad de visualización, rápida y versátil, que permita clarificar la intrincada (y a veces confusa) geometría del TJ-II.

Tabla 2.1

Características del haz y de la fuente

Fuente circular, radio	0.15 m
Distancia a la ventana	3.70 m
distancias focales	3.50 m (horizontal y vertical)
divergencia gaussiana	1.3° (horizontal y vertical)
Dirección de inyección	45° en el plano X-Y
	0.201 por debajo del ecuador (haz #1)
	0.201 por encima del ecuador (haz #4)
Energía del haz	40 keV
Mezcla energética	0.8 : 0.1 : 0.1
Potencia por haz	1 MW

Shutter

circular radio variable (0.10 m)
 distancia a la ventana 0.40 m

Ventana de entrada

anchura horizontal 0.27 m
 altura vertical 0.34 m

Tabla 2.2**Potencia interceptada por los *scrapers***

	Potencia interceptada (kW)	(%)	Densidad de pico (kW/cm ²)
Shutter	170	17%	-
Ventana	30	3%	-
TFA1	40	4%	~1
Transmitida	760	76%	-

3. El código de visualización MOVIE

El sistema de visualización adoptado es el código MOVIE [11], que aunque es totalmente independiente de DENSB4 utiliza una estructura común para los ficheros de geometría, por ello una breve descripción es indispensable.

Los sólidos, o más bien las superficies en 3D, que MOVIE representa están formados por *partes*, cada *parte*, que puede ser girada y escalada independientemente de las demás, está formada por *elementos*: poligonales de un número fijo de lados que forman la malla que modela al sólido. En la adaptación de DENSB4 solamente se utilizan *elementos* de 4 lados, no forzosamente planos. Los vértices de los *elementos* constituyen los *nodos* que pueden ser comunes a varios *elementos*.

Los ficheros que definen la geometría (cf. §A1) especifican la distribución de elementos en partes, las coordenadas de los nodos y el *diagrama de conectividad*, es decir la manera en que los nodos de cada elemento se conectan entre sí por líneas, que son las que se representan gráficamente.

MOVIE lee ese fichero de geometría y representa el sólido o superficie correspondiente con ocultación de líneas (también es posible una representación en "malla de alambre"), el modelo, entero o cualquier conjunto de sus partes, puede ser rotado, trasladado, escalado, etc., sus diversas partes suprimidas o restauradas a voluntad e incluso permite efectuar cortes del modelo en planos perpendiculares a la línea de visión (*clipping*). Todo ello de manera extremadamente rápida y sencilla.

Pero quizás su propiedad mas útil para la adaptación a DENSB es la de permitir la representación, sobre la superficie tridimensional, de las líneas de nivel de una función escalar definida en los nodos de la geometría. En nuestro caso esa función escalar no es otra que la densidad de potencia depositada por el haz en cada uno de los nodos.

Un ejemplo de representación obtenido con MOVIE aparece en la [Fig.3.1](#) que muestra la pared de la cámara en la zona de entrada del haz #1 (el COUNTER), es decir: el anillo RA1 que se encuentra bajo la TFA1 y el sector SA1 contiguo, hasta el SA3, junto con un fragmento de la carcasa de la bobina TFA1 que aparece en primer plano (el resto de la bobina es innecesario). Esta estructura es una simplificación de la compleja situación que se da a la entrada del haz (cf. §6.1) pero se visualiza mucho mejor y no produce resultados muy diferentes. Se observará la concentración de la deposición de potencia en la zona de entrada (densidad de pico 820 W/cm^2 , previamente calculados con DENSB4). También se observan algunas de las placas verticales del sector (la placa PLT1-1 que separa el RA1 del SA1 y al fondo la PLT1-2 que separa el sector SA1 del anillo RA2) que, en este caso, no reciben potencia, también aparece la concentración de potencia en la zona del Hard Core vista desde fuera de la cámara.

Otro ejemplo de visualización aparece en la [Fig.3.2](#) que muestra un periodo completo de la cámara visto desde arriba. En el §6 se mostrarán muchas otras representaciones de este tipo. Como ya se ha indicado, cálculos con DENSB4 y visualización con MOVIE son independientes y sucesivos.

Por último la [Fig.3.3](#) muestra la zona de salida del haz vista desde atrás en dirección opuesta a la del haz.

La generación de los ficheros de geometría se efectúa, de una vez para siempre, mediante programas separados (p. ej. genvy cf. §A2) que permiten modelar la cámara de vacío bien por medio de formas geométricas tomadas de los planos de diseño, bien directamente a partir de las coordenadas de los nodos suministradas por alguno de los sistemas de CAD.

Además junto con el fichero de geometría se genera siempre otro (el de *normales*) que contiene las coordenadas de los nodos, la dirección de la normal y el valor del área asociadas a cada nodo y, sobre todo, la identificación de cada parte del TJ-II, es decir si se trata de un nodo perteneciente al RA1 o a la PL12, etc. . Esto permite efectuar *ex post* un análisis detallado completo de la distribución de cargas en cada parte (cf. §A3).

Junto a estos programas de generación de partes de la cámara existen una gran cantidad de programas auxiliares (generadores de normales, agregación y separación de partes, transformación de coordenadas, etc..., cf. §A2).

Por último otro programa de visualización útil es el nbiphi (cf. §A2) que permite la representación, esta vez en dos dimensiones, de los contornos de la densidad de potencia recibida por blancos planos situados a ángulo toroidal dado y centrados con las bobinas, junto con el contorno de la cámara y la sección transversal del plasma (Fig.3.4) [12]. Esta representación bidimensional es muy útil para la localización de zonas de riesgo en la colocación de diagnósticos, etc.

4. Utilización de blancos tridimensionales en DENSB

La primera modificación importante que se introdujo en DENSB consistió en levantar la restricción de blancos planos o líneas rectas.

Para ello el código lee de un fichero las coordenadas de los nodos en los que se va a calcular la densidad de potencia. En una primera modificación (DENSB3) se leían, simultáneamente, la dirección de las normales y las áreas asociadas a cada nodo (fichero de normales tj2db, cf. §A1.2). Por el contrario en la versión definitiva de DENSB4 las coordenadas de los nodos son leídas de un fichero de geometría (tj2vv, cf. §A1.1) de MOVIE y con ayuda del diagrama de conectividad se calculan internamente las normales y las áreas asociadas (por lo tanto los datos de tj2db son ya superfluos). Posteriormente se transforman coordenadas y vectores normales al sistema interno de DENSB (referido al inyector). Una vez calculada la densidad de potencia en cada nodo se escribe en un fichero (tj2ff, cf. §A1.3). En estas primeras adaptaciones los *scrapers* continuaban siendo los clásicos diafragmas planos.

Una vez terminado el programa DENSB4, MOVIE permite la visualización de esas cargas sobre la geometría utilizada. También es posible, *off line*, un análisis detallado cuantitativo, de la distribución de cargas (programa analís, cf. §§A2,3).

Una comparación entre los resultados obtenidos con las dos versiones del código aparece en la Fig.4.1. En ambos casos, para poder efectuar correctamente la comparación, se han utilizado blancos planos cuadrados sucesivos (64 cm x 64 cm con 900 = 30x30 puntos) situados algo adelantados con respecto a la entrada de cada una de las bobinas TF. Los *scrapers* utilizados son los dos primeros mencionados en el §2 (*shutter* y ventana) así como los contornos internos de los anillos situados a la entrada de todas y cada una de las bobinas TF. Evidentemente, a medida que los diafragmas sucesivos interceptan el haz, la potencia total que recibe cada uno de los rectángulos decrece monótonamente. Los resultados de DENSB primitivo corresponden a la línea continua, las cruces a los del nuevo DENSB4, ambos son prácticamente indistinguibles.

MOVIE exige que los valores de la función vengan dados en los nodos, con el fin de incrementar la resolución existe una opción en DENSB4 que permite calcular la densidad de potencia no sólo en los nodos sino también, simultáneamente, en el centroide de los elementos (el cálculo de normales y áreas asociadas se modifica en consecuencia), lo que permite casi doblar la densidad de puntos del blanco y mejorar así la precisión en el cálculo de la potencia depositada (integral de área de la densidad de potencia) en cada parte. Los resultados obtenidos con ambas opciones (normal y de alta densidad) son muy similares; en un caso típico las potencias depositadas difieren en menos de un 1.5% mientras que las densidades de potencia de pico son indistinguibles. Sin embargo presenta el inconveniente de que el tiempo de cálculo para la opción de alta densidad es prácticamente el doble. En el caso de alta densidad se siguen pasando a MOVIE sólo los valores en los nodos que, en este caso, están ligeramente promediados.

5. Utilización de *scrapers* tridimensionales en DENSB

Esta es la modificación más importante de las introducidas en el código. Como ya se ha indicado, en la versión antigua los *scrapers* eran diafragmas huecos (o placas opacas) planos de contorno cerrado dado.

El procedimiento para detectar la posible intercepción era calcular el punto de intersección del rayo (*beamlet*) con el plano del diafragma y comprobar si ese punto se encuentra fuera o dentro del contorno del *scraper*. Esto último se efectúa por el procedimiento usual del *ángulo total*, simplemente se calcula, en el plano del *scraper* y desde el punto de intersección, el ángulo total añadido abarcado al recorrer completamente el contorno (cerrado) teniendo en cuenta el signo correcto. Si el punto está fuera del contorno el ángulo añadido vale 0 y el rayo intercepta el diafragma hueco y es descartado pues no llega al blanco (lo contrario sucedería con una placa opaca). Por el contrario si el punto está dentro el ángulo añadido es 360° y el rayo atraviesa el diafragma. Para evitar cálculos innecesarios sólo los *scrapers* que se encuentran entre el origen del rayo y el punto considerado del blanco (final del rayo) son tenidos en cuenta.

La nueva versión DENSB4 permite *scrapers* de forma arbitraria que vienen definidos por ficheros de geometría de MOVIE (tipo tj2vv) y que pueden ser iguales o no a los que definen los blancos. Como ya se ha indicado (cf. §3), esos ficheros contienen elementos cuadrangulares cuyos vértices son los nodos. Para utilizarlos como *scrapers* el programa divide automáticamente cada uno de esos cuadriláteros (que pueden no ser planos) en dos triángulos contiguos, de manera topológicamente consistente (con ayuda del diagrama de conectividad y evaluando las direcciones relativas de las normales en cada vértice). Hecho esto, cada uno de esos pequeños triángulos se hace actuar como interceptor de manera idéntica a la descrita más arriba.

Para evitar cálculos innecesarios se computan y almacenan previamente las dimensiones máximas, los límites espaciales y los vectores normales de cada uno de los triángulos, de manera que sólo se toman en consideración los rayos que pasan a distancia suficientemente corta de cada triángulo. También aquí sólo aquellos triángulos que tienen alguno de sus vértices entre el origen y el final del rayo son considerados.

Esto permite que cualquier estructura tridimensional pueda ser utilizada como *scraper*. En la versión actual pueden utilizarse simultáneamente hasta un total de 9 *scrapers* planos clásicos y 3 de tipo tridimensional, estos últimos conteniendo como máximo un total de 18000 nodos. Estos *scrapers* tridimensionales siempre son analizados después de haber efectuado el análisis de intercepción de los tradicionales, que como en general se encuentran a la entrada del haz lo interceptan antes, lo que ayuda a ahorrar tiempo de cálculo.

Una comparación entre la acción de *scrapers* tradicionales y tridimensionales aparece en la Fig. 5.1. Se trata de una disposición análoga a la utilizada para la Fig. 4.1, los blancos siguen siendo rectángulos sucesivos situados algo adelantados con respecto a la entrada de cada una de las bobinas TF, los diafragmas son también los contornos internos de los anillos situados a la entrada de las bobinas TF, pero en un caso son los diafragmas clásicos (línea continua en la Fig. 5.1) y en el otro un fichero de geometría 3D (símbolos). Se observará de la figura que ambos resultados son casi indistinguibles.

Una posibilidad adicional de la utilización de *scrapers* y blancos 3D es la capacidad de *auto ocultación*, el hecho de que el mismo grupo de elementos actúe, a la vez, de interceptor y de blanco. En el código se ha permitido esta posibilidad y también se tiene en cuenta cuándo un punto del blanco es vértice del mismo triángulo para el cual se está analizando la intercepción, en ese caso la intercepción se ignora.

En la versión actual de DENSB4, a menos que se inhíba explícitamente, siempre está presente como *scraper auto ocultante* la totalidad de la cámara (fichero de geometría *tj2vv.nbi*), es decir un periodo entero de la cámara más la zona de entrada del haz de neutros, que contiene un total de 8100 nodos y que se contabilizan en la limitación a un máximo de 18000 nodos de los *scrapers* 3D. Además, como ayuda para comprobaciones, es posible limitar la zona en que actúa la cámara auto ocultante a un intervalo arbitrario de ángulos toroidales (también para los *scrapers* 3D existe, independientemente, esta posibilidad), de forma que los elementos que se encuentran totalmente fuera de ese intervalo no interceptan, son *transparentes*.

El efecto de esa exclusión, y la comprobación del fenómeno de auto ocultación, aparece en los dos ejemplos de la Fig. 5.2, en donde se ha representado la potencia total que reciben dos grupos de elementos de la cámara cuando la región activa en la ocultación se va incrementando paulatinamente en ángulo toroidal ϕ . *Shutter* y ventana (pero no TF1) se incluyen aquí como *scrapers* clásicos. Para ϕ inferior a -12° no hay ninguna zona de la cámara que actúe, la potencia interceptada es constante (e igual a toda la que llega tras atravesar la ventana), entre -12° y 0° la estructura de entrada comienza a limitar el haz y se observa una fuerte caída en la potencia recibida. Posteriormente, a medida que se incrementa la zona de acción de la cámara, se suceden escalones en los que la potencia recibida permanece prácticamente constante ya que no hay ningún obstáculo en el camino del haz y caídas más o menos abruptas que coinciden con las sucesivas zonas de intercepción principales (Hard Core, RA5 etc.).

La parte superior de la Fig. 5.2 corresponde a la potencia recibida por la agrupación situada alrededor del Sector 5 (RA5, PLT5-5, SA5, PLT5-6) que se encuentra comprendido entre $\phi=40^\circ$ y $\phi=56^\circ$, en este caso a partir de 52° todos los elementos ocultantes ya han entrado en juego y la potencia total recibida permanece ya constante en su valor final (460 kW).

La parte inferior representa el mismo efecto en la agrupación situada alrededor del Sector 7 (RA7, PLT7-7, SA7, PLT7-8) que se encuentra comprendido entre $\phi=67^\circ$ y $\phi=78^\circ$, en este caso a partir de $\phi=58^\circ$ la cámara ya ha ocultado completamente ese sector que, definitivamente, recibe potencia nula.

6. Resultados

Es evidente que la aplicación más importante de DENS4 es el cálculo de cargas en la pared de la cámara del TJ-II. Para ello se ha modelado la cámara (geometría tj2vv.nbi) incluyendo un periodo entero (en rigor algo más: desde RA1 hasta RB1 Fig. 3.2) y añadiendo la parte correspondiente a la entrada del haz (ventana de inyección, incluyendo su garganta, parte del sector SD8, ventana lateral horizontal SD8S de ese sector, parte de la TFA1, etc, Fig. 6.1).

Esta modelación de la zona de entrada es mucho más realista que la mencionada en el §3 (Fig.3.1), está basada en los datos de los planos de diseño pero no es la definitiva. Otra, aún más detallada, basada directamente en datos procedentes del CAD, se encuentra en curso de elaboración y será incorporada en breve. No deberían esperarse discrepancias importantes con la utilizada aquí.

Esta voluminosa geometría (8100 nodos, 6408 elementos en 50 partes) actúa, a la vez, de blanco y de *scraper* 3D auto ocultante y se complementa con dos *scrapers* planos clásicos, los dos primeros diafragmas huecos mencionados en §2: el *shutter* y el borde de la ventana de entrada (que, de hecho, simula la intercepción del *ducto* y que, en adelante denominaremos así). El diafragma correspondiente a la TF-1 no se ha incluido puesto que forma parte, esta vez correctamente modelado, de la estructura de entrada.

Las características del haz son las de los inyectores de ATF (Tabla 2.1) y, como siempre, se supone que llega al *shutter* una potencia de 1 MW.

6.1 Cargas sobre la cámara en ausencia de plasma.

Los resultados, en ausencia de plasma, aparecen completos distribuidos por partes del TJ-II en el §A3. En la Tabla 6.1 se muestra una síntesis de esos resultados (y también los que aparecen con un plasma de densidad media) así como la comparación con resultados obtenidos anteriormente [2] (entre paréntesis en la tabla) con medios menos elaborados.

Se observará que existe un acuerdo razonable excepto en la potencia interceptada a la entrada que ahora, debido a la inclusión de un nuevo modelo para la zona de entrada, resulta ser el doble. Las cuatro grandes zonas en que se ha dividido la Tabla presentan las siguientes características:

a) La zona del *shutter* y del *ducto*: intercepta un 20% de la potencia inyectada y ha sido modelada sólo por medio de diafragmas planos clásicos con lo que se obtiene el mismo resultado que anteriormente (cf. §2). Esta zona será modelada en detalle en un futuro próximo. En total atraviesan *shutter* y el *ducto* 785 kW (79% de la potencia inyectada).

b) La zona de entrada del haz (Figs.6.2 y 6.3). Esta zona recibe cargas muy considerables, 850 W/cm^2 en la TFA1 que intercepta 23 kW (un 3% de los 785 kW que atraviesan la ventana) y también su parte interna (RA1) que recibe 650 W/cm^2 e intercepta también otro 3%. La pared vertical de la ventana horizontal SD8S situada en SD8 también recibe carga considerable: 520 W/cm^2 interceptando otro 3%.

La garganta de la ventana no recibe cargas demasiado elevadas debido al ángulo rasante con que el haz incide. La tapa superior, algo inclinada, es la que mas carga recibe (90 W/cm^2 , 13 kW) mientras que el resto de la garganta sólo recibe cargas en la pared lateral izquierda (40 W/cm^2 , 17 kW) .

Finalmente la estructura completa situada a la entrada del haz intercepta 100 kW (13%) de modo que la potencia total que entra en el toro es de 695 kW, un 70% de la inyectada.

Estos resultados deben compararse con los de la Tabla 2.2, para la que se utilizó la versión antigua de DENSB y en la cual la estructura de entrada se simulaba sólo con un diafragma situado a la entrada de la TFA1. La diferencia estriba en la inclusion de los nuevos elementos de entrada que en total interceptan 50 kW más que antes y que *grosso modo* corresponderían a los 30 kW de la garganta de la ventana y los 23 de la zona interna de la RA1.

Es evidente que esas zonas van a necesitar protección, además estas cargas no son atenuadas por la presencia del plasma que se situa más lejos.

La distribución de esa potencia entrante en el toro aparece representada en la Fig.6.4 (que muestra un periodo completo de la cámara) y su repartición sobre las diversas partes de la cámara en las Figs. 6.5 y 6.6. Como se observará, las cargas se acumulan en dos zonas importantes disjuntas:

c) La zona del Hard Core (HC) situada entre RA2 y SA4 (Fig.6.7 y 3.1), que es crítica, sobre todo en su parte circular central (CC) en donde protecciones suplementarias no son posibles. La zona de mayor deposición de potencia es precisamente ésa, el máximo se situa alrededor del SA2 (hacia $\phi \sim 17^\circ$ a unos 4 cm de la línea central) y recibe 390 W/cm^2 en ausencia de plasma. En total esa zona del HC intercepta unos 140 kW (~20% de la potencia entrante en el toro) casi totalmente concentrados en la parte CC (en esa zona la placa lateral PL1 recibe solamente 13 kW, con densidades de pico inferiores a 80 W/cm^2).

La Fig.3.1 muestra claramente otro aspecto de la acumulación de potencia en esta zona, esta vez vista desde fuera de la cámara, y con una estructura de entrada simplificada, aunque los resultados en esa parte son muy similares en ambos casos.

Afortunadamente estas cargas se van a atenuar considerablemente con la presencia de plasma (cf. §6.2).

Finalmente:

d) La zona de salida del haz (Figs 6.8 y 3.3): situada entre SA4 y SA6, en ausencia de plasma, resulta ser la más afectada. La placa vertical PLT5-6, situada entre SA5 y RA6 recibe una carga superior a 1.2 kW/cm^2 e intercepta 264 kW, nada menos que un 38%, seguida de cerca de la PLT4-5 (situada entre RA4 y SA5) con 770 W/cm^2 , 76 kW (11%) y de la placa lateral PL1 del HC contigua con 610 W/cm^2 y 144 kW (21%).

En este caso la parte circular del HC apenas recibe cargas (52 kW , 95 W/cm^2). De esta manera la distribución de cargas en el HC se distribuye de forma disjunta: el CC las recibe, casi exclusivamente, en la zona (c) mientras la PL1 lo hace en la (d). Por su parte la PL2 no recibe carga alguna.

En la Fig.6.8 puede apreciarse esta zona de acumulación, mientras que la Fig.3.3 muestra una vista desde atrás, en dirección contraria a la del haz.

Es evidente que también estas zonas van a necesitar protección, aunque el plasma atenué esas cargas (cf. §6.2).

Tabla 6.1Distribución de Cargas en la cámara

	Sin Plasma		Plasma de densidad media $n_e(0) = 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	
	Potencia intercept. (kW)	Densidad de pot. de pico (W/cm ²)	Potencia intercept. (kW)	Densidad de pot. de pico (W/cm ²)
Shutter + + Ducto	200 (200)	-	200	-
Entrada del Haz	<u>100</u> (50)	850 (800)	100	850 (800)
Hard Core	140 (130)	390 (370)	50	<u>150</u> (230)
Salida del haz	560 (620)	1200 (1200)	90	300 (360)

Valores entre paréntesis corresponden a cálculos más simples efectuados con anterioridad [2].

6.2 Efecto de la atenuación producida por el plasma.

En presencia de plasma los neutros del haz se ionizan y se convierten en iones rápidos (cf. §6.3), por lo que la densidad de neutros del haz se va atenuando a medida que atraviesa el plasma.

En nuestro caso hemos supuesto que la energía máxima del haz (H^0) es de 40 keV con mezcla energética 80:10:10, similar a las de ATF (Tabla 2.1) y que la ionización es debida a procesos de ionización por impacto electrónico, iónico y cambio de carga, predominando a estas energías los dos últimos.

La inyección de neutros se supone que comienza tras una fase de calentamiento ECRH (800 kW a 53.2 GHz resonando en modo extraordinario con el 2º armónico para un campo de 1 T). En las condiciones del TJ-II la densidad de corte alcanza un valor central de $1.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, que es con la que comienza la inyección.

De acuerdo con los resultados obtenidos en cálculos de transporte [7], la temperatura electrónica central cae rápidamente con la densidad desde 1000 eV en el inicio de la inyección, hasta unos 300 eV en cuando la densidad electrónica alcanza, a causa del crecimiento ocasionado por la inyección, densidades medias ($\sim 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). Los perfiles radiales para la densidad y temperatura del plasma se han tomado de la forma $(1 - s^\alpha)^\beta$ siendo s el radio medio del plasma normalizado a 1 en el borde, $\alpha=4$ y $\beta=1$ para el perfil de densidad y $\alpha=2$ y $\beta=1$ para el de temperatura, el perfil de densidad es algo más ancho que el de temperatura y se han mantenido fijos, de modo que no se tiene en cuenta que, en realidad, el ensanchamiento se acentúa ligeramente al subir la densidad [7].

Dada la duración prevista para el pulso en el TJ-II (entre 300 y 500 ms) no se espera sobrepasar la densidad central máxima de $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

Para el cálculo de la atenuación producida por el plasma se han utilizado los datos de cada rayo (*beamlet*): coordenadas del punto inicial (en la fuente) y del final (en el blanco) y su aporte parcial a la densidad de potencia que se escriben, durante la ejecución de DENSB4, en un fichero (el tj2bm, §A1). Posteriormente a esa ejecución el programa aten (cf. §A2) lo lee, divide cada rayo en pequeños segmentos (0.5 cm) y calcula la densidad del plasma en el centro de cada segmento, las secciones eficaces de ionización y el recorrido libre medio correspondiente y, con esos datos, atenúa exponencialmente la intensidad del rayo a lo largo de cada segmento.

La densidad y temperatura del plasma son funciones analíticas dadas del radio medio del plasma, o más bien del flujo magnético normalizado a la unidad en el borde, flujo que se obtiene en cada punto del espacio utilizando una red neuronal [12] extremadamente rápida.

Con estos datos se ha estudiado la atenuación que se produce en las cargas de la pared al crecer la densidad del plasma y los resultados aparecen en las Fig.6.9 a 6.10, tanto para la potencia interceptada (a), como para la densidad de potencia de pico (b), que presentan el típico decrecimiento exponencial.

La [Fig.6.11](#) muestra la distribución de la potencia a densidades medias de plasma, que debe compararse con la [6.5](#) que se encuentra en la misma escala. Una comparación similar aparece en las dos partes de la [Fig.6.6](#) que pone claramente de manifiesto la fuerte atenuación debida al plasma.

En la zona del HC ([Fig. 6.9](#)) las cargas descienden desde 285 W/cm^2 en el inicio de la inyección, hasta 50 W/cm^2 a alta densidad, con un ligero desplazamiento del máximo, que tiende, lógicamente, a acercarse al origen del haz (para densidad media $\sim 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, se sitúa ahora sobre RA2 hacia $\phi \sim 12^\circ$ y sobre la línea central).

La zona de salida, en particular la PLT5-6, resulta ser ahora la más afectada pues pasa de 500 W/cm^2 a 300 W/cm^2 ya que existe en esa placa (y también la PLT4-5) una pequeña zona que puede ser vista directamente desde la fuente sin interceptar el plasma, como se observa en las líneas correspondientes a PLT4-5 y PLT5-6 de la [Fig.6.10](#) que son casi horizontales.

Otro punto importante es la variación con la densidad del plasma de la fracción de *Shine Through*, que aparece representada en la [Fig. 6.12](#) y pasa desde un 54% en el inicio de la inyección hasta un 8% a alta densidad. La figura muestra también la comparación con la tasa calculada anteriormente con otros códigos (Fafner [7]) y se observa una buena coincidencia, las diferencias deben ser atribuidas al hecho de que en este cálculo los perfiles de densidad se mantienen fijos mientras que con Fafner iban variando con la densidad, ensanchándose ligeramente al crecer ésta, eso explica la ligera sobrevaloración al final de la descarga.

La existencia de una zona de visión directa desde la fuente, mencionada anteriormente (no detectada en estudios anteriores), hace que incluso si la densidad del plasma fuera tan alta que atenuara el haz totalmente cuando atravesara el plasma, aún permanecería una fracción de *ShineThrough* residual ($\sim 2.7\%$) confirmando la necesidad de protecciones.

6.3 Cargas debidas a las pérdidas de iones rápidos.

Como se analizó en [6],[8], las pérdidas de iones rápidos más importantes corresponden a las pérdidas *directas* (o *instantáneas*) que, al contrario de las de *shine through*, crecen con la densidad y son mayores para el haz CO que para el COUNTER. Esos iones rápidos van a parar, casi en su totalidad, a las placas laterales del Hard Core. Como el modelo de cámara simplificada utilizada en aquellos trabajos es, en estas zonas del HC, prácticamente idéntico al de la cámara detallada utilizada aquí, los resultados en cuanto a las zonas principales de deposición y niveles de densidad de potencia se mantienen.

Estas cargas aparecen representadas en las Fig. 6.13 y 6.14. La primera muestra las zonas de máxima acumulación, que aparecen en la placa lateral del HC del SD6 para el haz CO (con densidades de pico de 600 W/cm^2) y en la del SD7 para el haz COUNTER (con unos 210 W/cm^2). La segunda figura da una vista de un periodo entero del HC visto desde abajo y separado del resto de la cámara.

Ambas zonas de impacto son alargadas toroidalmente y, sobre todo no se solapan con los impactos de *shine through*.

Por su parte los impactos debidos a las pérdidas de iones rápidos *retardados* (los que que sufren *pitch-angle scattering* y termalización antes de escapar) poseen distribución periódica y suave, con valores muy bajos ($\sim 20 \text{ W/cm}^2$) que también afectan, fundamentalmente, al HC (las densidades de pico fuera del HC son inferiores a 6 W/cm^2), por lo que los resultados obtenidos anteriormente [8] también permanecen válidos.

Algo similar ocurre con los neutros procedentes de intercambio de carga (CX) de los iones rápidos [9] que producen densidades de pico del orden de 40 W/cm^2 en el HC e inferiores a 10 W/cm^2 fuera de él.

7. Conclusiones

Las modificaciones introducidas al código DENS B permitiendo la utilización de blancos y de *scrapers* tridimensionales con posibilidad de auto ocultación, junto con una mayor flexibilidad en la visualización de la complicada geometría de la cámara de vacío del TJ-II, ha permitido dar más realismo a los cálculos de cargas en la pared, tanto en presencia de plasma como sin él, confirmando esencialmente cálculos anteriores y mostrando claramente las zonas de la cámara que van a necesitar protección.

El trabajo inmediato se centrará en la mejora en la fidelidad de modelación de la zona de entrada del haz, utilizando directamente datos provenientes del CAD, en el cálculo de la distribución de temperaturas debidas a las cargas aquí obtenidas, que se efectuará por medio del código de elementos finitos ANSYS y el diseño de las protecciones necesarias y del ducto de unión entre el *shutter* y la ventana de entrada.

Apéndice 1. Estructura de los ficheros utilizados

A1.1. Ficheros de geometría de MOVIE.

Estos ficheros tienen todos *name file* tj2vv y *tipo* variable que alude a la zona de la cámara que representan. Así p. ej. el fichero tj2vv.sc5 representa una agrupación de partes situadas alrededor del Sector 5 (RA5, PLT5-5, SA5 y PLT5-6), el tj2vv.nbi representa un periodo entero de la cámara junto con la zona especial de entrada del haz#1, etc.

Son ficheros secuenciales, formateados y están formados por cuatro secciones distintas [11]:

- 1º) Una primera línea, en formato (16I5) conteniendo las 4 variables enteras:
NPART, NOD, NEL, NCON

en donde

NPART = Número de partes (≤ 70)
 NOD = Número de nodos (≤ 9000)
 NEL = Número de elementos (≤ 9000)
 NCON = Número de valores del diagrama de conectividad.
 En el caso de elementos cuadrangulares se tiene
 NCON=4*NEL (cf. sección 4a)

- 2º) Una descripción de la agrupación de elementos en partes, en formato (16I5), en la forma:

((NPL(I,J), I=1,2), J=1,NPART)

En donde, para cada una de las NPART partes, la variable NPL contiene el número de identificación del primer elemento y del último de los que la forman.

- 3º) Las coordenadas de los nodos (en cartesianas y m) en formato (6E12.5) en el orden x, y, z (dos nodos por línea)

((X(I,J), I=1,3), J=1,NOD)

- 4º) El diagrama de conectividad: NCON valores, en nuestro caso de elementos cuadrangulares, 4 valores por elemento (4*NEL) en formato (16I5) y en la forma:

(ICON(I), I=1,NCON)

cada uno de esos cuatro valores indica el número de identificación del nodo (en el orden en que se encuentran almacenados en la sección 3ª del fichero) de cada uno de los cuatro vértices del elemento, en el orden en que se conectan entre si. Al último valor de esos 4 se le da signo negativo para indicar que ese nodo conecta con el primero de la serie de 4, cerrando el elemento. Este convenio permite utilizar elementos con cualquier número de lados, aunque en nuestro caso solamente se utilicen 4. Por lo tanto uno de cada 4 de esos números tendrá signo negativo.

Se encontrará una multitud de ficheros de geometría en el directorio /fusion/ateubel/densb4 .

A1.2. Ficheros de normales

Tienen *file names* de la forma tj2db y el mismo tipo que el de geometría a que corresponden (p. ej. tj2db.sc5, etc.). Aunque, como ya se ha comentado en el §4, la dirección de las normales y las áreas asociadas a los nodos se calculan ahora internamente tanto en MOVIE como en DENSb4, por lo que estos ficheros (resto de versiones intermedias) son, en realidad, superfluos, se han mantenido para conservar la identificación de las partes del TJ-II y facilitar el análisis cuantitativo posterior.

Constan de dos secciones:

1ª) Una línea, en formato libre, conteniendo las variables enteras:

NOD, NPHI, NTH, NTB, NPL

en donde:

NOD =	Número de nodos (redundante, se ignora)
NPHI =	Número de cortes toroidales de cada sector o anillo de la cámara del TJ-II
NTH =	Número de cortes poloidales de cada parte del HC
NTB =	Número de cortes poloidales de las partes externas de los sectores o anillos de la cámara
NPL =	Número de cortes "toroidales" de cada placa vertical PLT (todas tienen NTB cortes poloidales).

En el caso en que esta geometría no corresponda a partes del TJ-II (ventanas, rectángulos, ducto, zonas de entrada, TF-1, etc.) NPHI y NTH corresponden, respectivamente, al número de cortes toroidales y poloidales y el resto de los valores se ignoran.

2ª) NOD líneas (tantas como nodos) en formato libre conteniendo:

X, Y, Z, UNX, UNY, UNZ, IH, IS, AREA

en donde:

X, Y, Z : son las coordenadas de los nodos (en cartesianas y cm) en el mismo orden en el que se almacenan en el fichero de geometría tj2vv (orden que, casi sin excepción, corresponde a que para cada corte toroidal el ángulo poloidal crece en el sentido antihorario y, posteriormente, los cortes toroidales se almacenan en el sentido de ángulo ϕ creciente).

UNX, UNY, UNZ : componentes del vector normal asociado al nodo, normalizado

IH : Indice de identificación de la parte del TJ-II a que corresponde el nodo.
 IH = 1 : Hard Core
 IH = 2 : Parte exterior de anillo o sector
 IH = 3 : Placa vertical PLT

IS : Indice de identificación del número de sector a que corresponde el nodo.
 Si IH \leq 2
 IS $>$ 0 : anillo R"IS" (IS=+2 corresponde a RA2, etc.)
 IS $<$ 0 : Sector S"-IS" (IS=-2 " " " SA2, etc.)

Si IH = 3 (placas verticales PLT)
 IS $>$ 0 corresponde a la placa que separa el anillo del sector del mismo número (así IS=+2 es la PLT2-2)
 IS $<$ 0 corresponde a la placa que separa el sector de número anterior del anillo del mismo número (así IS=-3 es la PLT2-3)

Otras partes del TJ-II (ventana de inyección, ventana lateral horizontal del SD8, etc.) tienen diferentes números de identificación

AREA: Area asociada al nodo (en cm^2).

Como ya se ha indicado, en la última versión de DENSB4, las coordenadas de los nodos, las componentes de la normales y las areas se ignoran pues son calculadas internamente. Sólo son utilizados, a fines de facilitar el análisis cuantitativo, los dos números de identificación IH e IS.

A1.3. Fichero de función.

Tienen por file name tj2ff (así p. ej. tj2ff.sc5). Son generados por DENSB4 y contienen los valores de la densidad de potencia (en kW/cm^2) en cada nodo, uno tras otro en el mismo orden en el que están almacenados en el fichero de geometría, con formato (6E12.5), es decir 6 valores por línea.

DENSB4 genera varios otros ficheros: resultados de análisis detallados (tj2an), un fichero binario (tj2bm) que contiene la aportación parcial de cada rayo, el de salida clásico dens.dat con la repetición de los datos de entrada y algunos otros resultados [10], etc.

Apéndice 2. Utilización del código DENSB4

El código se encuentra instalado en la CRAY-J90 del CIEMAT en el directorio de uso público /fusion/publica/nbi.dir en lo que sigue supondremos que la variable \$pb señala a ese directorio.

La ejecución del código se hace mediante la sentencia

```
$pb/densb4      targ  sc1  sc2  sc3
```

en donde targ es el tipo del fichero que contiene la geometría del blanco (es decir tendrá que existir un fichero tj2vv.targ), sc1, sc2, y sc3 son los tipos de los tres *scrapers* 3D (alguno, o todos, pueden estar ausentes, sus geometrías estarán descritas en los ficheros tj2vv.sc1, etc.).

Además debe existir un fichero clásico de entrada a DENSB (cf. [10]) conteniendo la descripción de los scrapers tradicionales y del haz, de nombre dens.tj2, si ese fichero no existiese se utiliza, por defecto, uno de la cuenta pública; que contiene los dos primeros *scrapers* planos del §2 (*shutter* y ventana) y las características de los haces dadas en la Tabla 2.1, similares a las de los inyectores de ATF.

Con esto el programa calcula las densidades de potencia en cada nodo y las escribe en el fichero tj2ff.targ, utilizando unos 512 seg. de CPU para el caso descrito en §6.1 en una CRAY-J90 con 16 procesadores. Esa distribución puede ser visualizada con una llamada a MOVIE mediante la sentencia:

```
$pb/movie targ
```

y respondiendo con un asterisco (*) a la primera petición de entrada. A partir de ahí se pueden utilizar las sentencias usuales de MOVIE (HELP, VIEW, DRAW, CONT, ROTA, SHIFT, CENTER, DIST, REST, EXIT, etc.) (cf. [11]).

La distribución cuantitativa de potencia y densidad en cada parte del TJ-II puede observarse mediante la sentencia

```
$pb/analís targ
```

que tras el resumen global (cf. §A3) permite analizar individualmente partes o nodos.

La atenuación debida a la presencia del plasma puede ser observada mediante la sentencia

```
$pb/aten targ
```

que pide el valor central de la densidad electrónica (en unidades de 10^{13} cm^{-3}) y que, a partir de ahí, se comporta de manera semejante a analís.

Finalmente la representación 2D de la distribución de potencia para rectángulos situados en planos de ángulo toroidal fijo se obtiene mediante la sentencia:

```
$pb/nbiphi
```

que tras pedir el ángulo toroidal (en grados, contados respecto a la dirección N), efectúa el cálculo y presenta, automáticamente, la figura 2D, junto con el contorno de la cámara de vacío y del plasma (cf. §3, [Fig.3.4](#)). No es necesario, en este caso, utilizar ningún fichero de geometría (se crean internamente).

En cuanto a los programas auxiliares la fusión de varios ficheros de geometría puede efectuarse mediante la sentencia

```
$pb/merge sc1 sc2 sc3
```

donde sc1, sc2 y sc3 (que puede estar ausente) son los tipos de los tres (o dos) ficheros de geometría a agregar, que se genera con el nombre tj2vv.dat . Si existen los correspondientes ficheros de normales y de función, también generan los agregados tj2db.dat y tj2ff.dat .

La separación de partes seleccionadas de un fichero de geometría puede efectuarse mediante la sentencia

```
$pb/separ sc1
```

que pide una enumeración de las partes a separar y las escribe en una nueva geometría tj2vv.dat , junto con sus correspondientes ficheros de normales y de función.

Por último la generación de las diversas partes de la cámara del TJ-II puede efectuarse mediante la sentencia

```
$pb/genvv
```

siguiendo posteriormente las instrucciones del programa.

Apéndice 3. Distribución detallada de cargas

Se presenta aquí un listado completo de los análisis de la distribución de potencia en cada parte del TJ-II. El primero corresponde al caso sin plasma, el segundo al de plasma con densidad media (valor central $5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$).

El caso sin plasma corresponde al fichero tj2an.nbi (Tabla A3.1) conteniendo la distribución de cargas en la cámara del TJ-II cuando se toma como blanco y, simultáneamente, como scraper 3D auto ocultante la cámara entera (incluyendo la zona de la ventana de inyección, cf. §6.1)

La primera sección muestra la distribución de potencia por partes, partes que aparecen definidas en la primera y última columnas tituladas "Parte" y "Zona-Sector". La segunda columna es el valor de pico de la densidad de potencia en esa parte (en kW/cm^2), la tercera (%) es el porcentaje de cada valor con respecto al máximo total (que se encuentra en la parte#23 PLT5-6 con 1.23 kW/cm^2). La cuarta columna ("Sfunc*area") da el valor de la potencia total interceptada por esa parte (en kW) y la 5ª su porcentaje respecto al total en toda la cámara. Total que aparece en la última fila como Parte #0. (795 kW, en este caso).

La segunda sección presenta la distribución en cada parte del HC, distinguiendo entre zona circular central (CC) y placas laterales PL1 (la superior, situada arriba para $\phi=0^\circ$) y PL2 (inferior). Sólo se muestran valores no nulos. Con, al final, la cantidad total depositada en CC y PL1 (PL2 no recibe nada en este caso).

Finalmente aparecen detalles sobre la localización del máximo de la densidad de potencia, con sus coordenadas (en cartesianas, cilíndricas, toroidales, respecto al centro de las bobinas y respecto al punto de entrada del haz).

El caso correspondiente a plasma de densidad media (fichero tj2atm.sc2a8, Tabla A3.2) es enteramente similar, aunque se han excluido las partes correspondientes a la zona de entrada (que no son afectadas por el plasma) y sólo difiere en la adición, al final, de la fracción de *shine through*.

Una serie completa de análisis de este tipo para numerosos valores de la densidad central del plasma se encontrará en el fichero:

/fusion/guasp/loads.dir/shine.dat

Tabla A3.1

=====

No Plasma

tj2vv.nbi

Parte	Fmax	(%)	Sfunc*area	(%)	Zona - Sector
1	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-TF - 1
2	0.6520	53.16	23.46	2.95	TF - 1
3	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-SCT- 1
4	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 1
5	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 1 1
6	0.3826	31.19	19.43	2.44	HC-TF - 2
7	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 2
8	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 1 2
9	0.3908	31.86	39.85	5.01	HC-SCT- 2
10	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 2
11	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 2 2
12	0.2848	23.22	42.85	5.39	HC-TF - 3
13	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 3
14	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 2 3
15	0.1419	11.57	20.59	2.59	HC-SCT- 3
16	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 3
17	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 3 3
18	0.1107	9.03	8.112	1.02	HC-TF - 4
19	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 4
20	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 3 4
21	9.9334E-02	8.10	10.37	1.30	HC-SCT- 4
22	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 4
23	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 4 4
24	0.2161	17.62	24.71	3.11	HC-TF - 5
25	2.9385E-02	2.40	7.611	0.96	TF - 5
26	0.7663	62.48	75.68	9.51	PLATE - 4 5
27	0.6090	49.65	144.6	18.17	HC-SCT- 5
28	0.1226	10.00	15.91	2.00	SCT - 5
29	0.1886	15.38	0.4786	0.06	PLATE - 5 5
30	0.5700	46.47	13.93	1.75	HC-TF - 6
31	1.6865E-02	1.38	0.4186	0.05	TF - 6
32	1.227	100.00	264.0	33.19	PLATE - 5 6
33	0.2720	22.18	6.219	0.78	HC-SCT- 6
34	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 6
35	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 6 6
36	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-TF - 7
37	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 7
38	2.0701E-02	1.69	0.4615	0.06	PLATE - 6 7
39	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-SCT- 7
40	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 7
41	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 7 7
42	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-TF - 8
43	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 8
44	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 7 8
45	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-SCT- 8
46	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 8
47	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 8 8
48	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-TF - 9
49	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 9
50	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 8 9

51	4.1677E-02	3.40	16.56	2.08	Ventana NBI- 1
52	8.7264E-02	7.11	12.50	1.57	Tapa super. Vent. NBI- 1
53	0.5169	42.14	20.82	2.62	Contorno vent. lateral S-
54	0.4004	32.65	3.719	0.47	SCT-8, NBI- 1
55	0.8475	69.10	23.21	2.92	TF-1, NBI- 1
56	0.000	0.00	0.000	0.00	TF-1 inferior, NBI- 1
57	0.000	0.00	0.000	0.00	Tapa infer. Vent. NBI- 1
58	0.000	0.00	0.000	0.00	Vent. lateral exterior S-
0	1.227	100.00	795.5	100.00	TOTAL tj2vv.nbi -

Distribucion en HC
=====

Zona-Sector	Lado	kW/cm2	kW	Parte
HC-TF - 2	CC	0.3826	19.43	6
HC-SCT- 2	CC	0.3908	39.85	9
HC-TF - 3	CC	0.2848	42.66	12
HC-TF - 3	PL1	2.0582E-02	0.1835	12
HC-SCT- 3	CC	0.1419	18.66	15
HC-SCT- 3	PL1	2.9098E-02	1.929	15
HC-TF - 4	CC	0.1107	5.081	18
HC-TF - 4	PL1	5.4294E-02	3.031	18
HC-SCT- 4	CC	9.9334E-02	1.970	21
HC-SCT- 4	PL1	8.7246E-02	8.405	21
HC-TF - 5	CC	9.5384E-03	5.2873E-02	24
HC-TF - 5	PL1	0.2161	24.66	24
HC-SCT- 5	PL1	0.6090	144.6	27
HC-TF - 6	PL1	0.5700	13.93	30
HC-SCT- 6	PL1	0.2720	6.219	33
TOTAL HC	CC	0.3908	127.7	
TOTAL HC	PL1	0.6090	202.9	

Maximo en nodo 4748 Parte 32

Zona:	PLATE	5	6
X, Y, Z =		79.98	116.9 -18.89
R, Phi =		141.6	55.62
ra, Tht, Thc =		20.65	-113.9 108.6
rs, Ths, Zs =		39.97	-71.81 -37.97
Xb, Yb, Zb =		1.447	1.213 229.4

Tabla A3.2

=====

With Plasma (medium density)

tj2vv.sc2a8

ne(0) = 5.389 (10**13 cm-3)

Parte	kW/cm2	(%)	kW	(%)	Zona - Sector
1	0.1452	46.80	7.642	5.75	HC-TF - 2
2	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 2
3	0.1376	44.35	14.28	10.74	HC-SCT- 2
4	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 2
5	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 2 2
6	8.3408E-02	26.87	14.07	10.58	HC-TF - 3
7	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 3
8	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 2 3
9	3.3848E-02	10.91	6.354	4.78	HC-SCT- 3
10	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 3
11	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 3 3
12	2.4977E-02	8.05	2.307	1.73	HC-TF - 4
13	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 4
14	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 3 4
15	1.9693E-02	6.35	2.298	1.73	HC-SCT- 4
16	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 4
17	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 4 4
18	2.0541E-02	6.62	3.006	2.26	HC-TF - 5
19	1.2510E-02	4.03	2.796	2.10	TF - 5
20	0.3104	100.00	41.35	31.09	PLATE - 4 5
21	6.1984E-02	19.97	9.568	7.19	HC-SCT- 5
22	3.4928E-02	11.25	4.668	3.51	SCT - 5
23	0.1802	58.06	0.4552	0.34	PLATE - 5 5
24	1.9382E-02	6.24	0.4046	0.30	HC-TF - 6
25	4.8907E-04	0.16	1.2766E-02	0.01	TF - 6
26	0.1635	52.69	23.59	17.74	PLATE - 5 6
27	5.9605E-03	1.92	0.1558	0.12	HC-SCT- 6
28	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 6
29	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 6 6
30	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-TF - 7
31	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 7
32	9.5703E-04	0.31	2.2543E-02	0.02	PLATE - 6 7
33	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-SCT- 7
34	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 7
35	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 7 7
36	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-TF - 8
37	0.000	0.00	0.000	0.00	TF - 8
38	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 7 8
39	0.000	0.00	0.000	0.00	HC-SCT- 8
40	0.000	0.00	0.000	0.00	SCT - 8
41	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 8 8
42	0.000	0.00	0.000	0.00	PLATE - 8 9
0	0.3104	100.00	133.0	100.00	TOTAL tj2vv.sc2a8 -

Distribucion en HC

Zona-Sector	Lado	kW/cm2	kW	Parte
HC-TF - 2	CC	0.1452	7.642	1
HC-SCT- 2	CC	0.1376	14.28	3
HC-TF - 3	CC	8.3408E-02	13.98	6
HC-TF - 3	PL1	1.0302E-02	9.2123E-02	6
HC-SCT- 3	CC	3.3848E-02	5.416	9
HC-SCT- 3	PL1	1.3810E-02	0.9381	9
HC-TF - 4	CC	2.4977E-02	1.192	12
HC-TF - 4	PL1	1.5059E-02	1.115	12
HC-SCT- 4	CC	1.9693E-02	0.3743	15
HC-SCT- 4	PL1	1.3382E-02	1.924	15
HC-TF - 5	CC	1.5000E-03	8.3149E-03	18
HC-TF - 5	PL1	2.0541E-02	2.998	18
HC-SCT- 5	PL1	6.1984E-02	9.568	21
HC-TF - 6	PL1	1.9382E-02	0.4046	24
HC-SCT- 6	PL1	5.9605E-03	0.1558	27
TOTAL HC	CC	0.1452	42.90	
TOTAL HC	PL1	6.1984E-02	17.19	

Maximo en nodo 2947 Parte 20

Zona:	PLATE	4	5
X, Y, Z =	105.4	93.36	-36.53
R, Phi =	140.8	41.54	
ra, Tht, Thc =	37.67	-104.1	62.01
rs, Ths, Zs =	34.90	-58.52	-29.77
Xb, Yb, Zb =	2.583	-16.43	194.8

Potencia total recibida en la pared

Sin Plasma:	695.3	(kW)
Con Plasma:	133.0	(kW)
En el Plasma:	562.3	(kW)
Fr. Sh.Thr.:	19.13	(%)

Referencias

- [1]. M.LINIERS, J. GUASP . "An alternative scenario of NBI injection into TJ-II". Neutral Injection Joint Development Committee Meeting, JDC 4/94, 30 October 1994, KFK, Jülich, Germany.
- [2]. M.LINIERS, J. GUASP . "Present Status of TJ-II NBI injection system and deposition power calculations for shine through and fast ion losses". Neutral Injection Joint Development Committee Meeting, JDC 6/95 27 November 1995, CIEMAT, Madrid. Spain.
- [3]. J. GUASP and M. LINIERS. *Fusion Technol.* **24**, 251 (1993)
- [4]. M. LINIERS , J. GUASP , C. ALEJALDRE and A. PEREZ-NAVARRO. *Proc. 20th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics.* (Lisbon), ECA, **17C**, Part III, 993, EPS Geneva. (1993)
- [5]. J.GUASP, M.LINIERS. "Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II". Septiembre 1995. Report EUR-CIEMAT-761.
- [6]. J. GUASP, M.LINIERS. "Fast ion behaviour for NBI scenarios in TJ-II". 10th Int. Conf. on Stellarators. Madrid. Mayo 1995.
- [7]. J. GUASP, F.CASTEJON, M.LINIERS, B. VAN MILLIGEN. "Transport studies in TJ-II". 10th Int. Conf. on Stellarators. Madrid. Mayo 1995.
- [8]. J.GUASP. "Impactos de iones rápidos en la cámara de vacío del TJ-II durante la inyección de neutros". Septiembre 1995. Report EUR-CIEMAT-763.
- [9]. J.GUASP. "Impactos de los neutros de CX en la cámara de vacío del TJ-II durante la inyección de neutros". Septiembre 1995. Report EUR-CIEMAT-766
- [10]. F.P. PENNINGSFELD. "DENS Code". Report IPP4/229. IPP. Garching, 1986
- [11]. MOVIE.BYU. "A general Purpose Computer Graphics System".Version 5.3. Brigham Young University, Utah. November 1985.
- [12]. V. TRIBALDOS, B.PH. VAN MILLIGEN. "Electron Cyclotron Emission calculations for TJ-II stellarator". *Nucl. Fusion* **36** (1996) 283 .

Lista de Figuras

- Fig. 1.1. Vista superior de la disposición de los haces neutros en el TJ-II y del modelo simplificado de la cámara.
- Fig. 1.2. Vista CAD de un octante de la cámara
- Fig. 1.3. Vista CAD de la zona de entrada del haz#1 (COUNTER).
-
- Fig. 2.1. Potencia interceptada por tres *scrapers* planos (DENS B): *shutter*, ventana (ducto), bobina TFA1 y potencia transmitida. Los contornos representan las líneas de igual densidad de potencia.
- Fig. 2.2. Posición relativa del haz#1 (COUNTER) y del plasma para varios ángulos toroidales Φ , mostrando la distorsión en las líneas de nivel de la densidad de potencia ocasionada por los diafragmas que simulan la intercepción de los anillos de las bobinas TF.
-
- Fig. 3.1. Visualización con MOVIE de un fragmento de la cámara mostrando los puntos de acumulación de la deposición de potencia (entrada del haz simplificada).
- Fig. 3.2. Visualización con MOVIE de un periodo completo de la cámara visto desde arriba.
- Fig. 3.3. Vista de la deposición de potencia en la zona de salida del haz (sólo desde RA4 hasta SA5) observada desde atrás en dirección opuesta a la del haz#1.
- Fig. 3.4. Ejemplo de representación bidimensional con el programa nbiphi. Líneas de nivel de la densidad de potencia sobre un plano de ángulo toroidal $\Phi = 85^\circ$ medido respecto a la dirección N (centro del SD8) junto con los cortes transversales de la cámara y del plasma.
-
- Fig. 4.1. Comparación entre blancos iguales en las dos versiones de DENS B. Blancos rectangulares algo adelantados con respecto a la entrada de las bobinas TF. Scrapers clásicos situados a la entrada de las bobinas. Los símbolos corresponden a geometría 3D (DENS B4), la línea a los blancos planos clásicos (DENS B).

- Fig. 5.1. Comparación entre *scrapers* iguales en las dos versiones de DENSB. Figura similar a la 4.1. Los símbolos corresponden a *scrapers* 3D (DENSB4) la línea a los difragmas planos clásicos (DENSB).
- Fig. 5.2. Comprobación de la auto ocultación. Resultado de ir incrementando el ángulo toroidal ϕ_2 en el que actúa la cámara como interceptor sobre dos zonas distintas de la misma cámara:
 a) La zona situada alrededor del SA5
 b) La situada alrededor del SA7.
- Fig. 6.1. Vista de la zona de entrada del haz, modelada según los planos de diseño. Se observará la garganta de la ventana de inyección, con su parte superior irregular y algo inclinada, la pared vertical de la ventana lateral SD8S y los fragmentos del sector SD8, de la bobina TFA1 y del interior del anillo RA1.
- Fig. 6.2. Distribución de potencia en las diversas partes de la estructura de entrada del haz#1:
 a) Potencia total interceptada (kW).
 b) Densidad de potencia de pico (kW/cm²).
- Fig. 6.3. Vista de las zonas principales de acumulación de potencia en la estructura de entrada del haz#1:
- Fig. 6.4. Vista de las zonas principales de acumulación de potencia en el interior de la cámara.
- Fig. 6.5. Distribución de potencia en las diversas partes del interior de la cámara en ausencia de plasma:
 a) Potencia total interceptada (kW).
 b) Densidad de potencia de pico (kW/cm²).
- Fig. 6.6. Repartición de la potencia entrante en el toro:
 a) En ausencia de Plasma
 b) Plasma de densidad media ($n_e(0) = 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$).
- Fig. 6.7. Vista de la deposición de potencia en la zona del Hard Core. La estructura de entrada, RA1, SA1 y la zona situada más allá del SA4 han sido suprimidas.
- Fig. 6.8. Vista de la deposición de potencia en la zona de salida del haz (sólo desde RA4 hasta SA5) observada en la dirección del haz#1.
- Fig. 6.9. Decrecimiento de las cargas con la densidad del plasma en la zona circular del HC:
 a) Potencia total interceptada (kW).
 b) Densidad de potencia de pico (kW/cm²).

- Fig. 6.10. Decrecimiento de las cargas con la densidad del plasma en la zona de salida del haz#1:
a) Potencia total interceptada (kW).
b) Densidad de potencia de pico (kW/cm²).
- Fig. 6.11. Distribución de potencia en las diversas partes del interior de la cámara para plasma de densidad media ($n_e(0) = 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) (a comparar con la Fig.6.5):
a) Potencia total interceptada (kW).
b) Densidad de potencia de pico (kW/cm²).
- Fig. 6.12. Dependencia de la tasa de *Shine Through* con la densidad. Comparación con otros cálculos (Fafner [7]).
- Fig. 6.13. Vista de la concentración de las pérdidas directas de iones rápidos (RD5 a SD7)
- Fig. 6.14. Vista de la concentración de las pérdidas directas de iones rápidos sobre un periodo del HC visto desde abajo.

Lista de Tablas

- Tabla 2.1. Características de los haces y geometría de inyección (similar al sistema de ATF).
- Tabla 2.2. Potencia interceptada por tres *scrapers* clásicos (diafragmas huecos): *shutter*, ventana (ducto) y TFA1. Cálculo con DENSB.
- Tabla 6.1. Síntesis de la distribución de potencia y de las cargas máximas en ausencia de plasma y para densidad media ($n_e(0) = 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). Los valores entre paréntesis corresponden a resultados anteriores [2].
- Tabla A3.1 Listado completo de la distribución de potencia y de las cargas máximas sobre cada parte de la cámara en ausencia de plasma
- Tabla A3.2 Listado completo de la distribución de potencia y de las cargas máximas sobre cada parte de la cámara para densidad media del plasma ($n_e(0) = 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$).

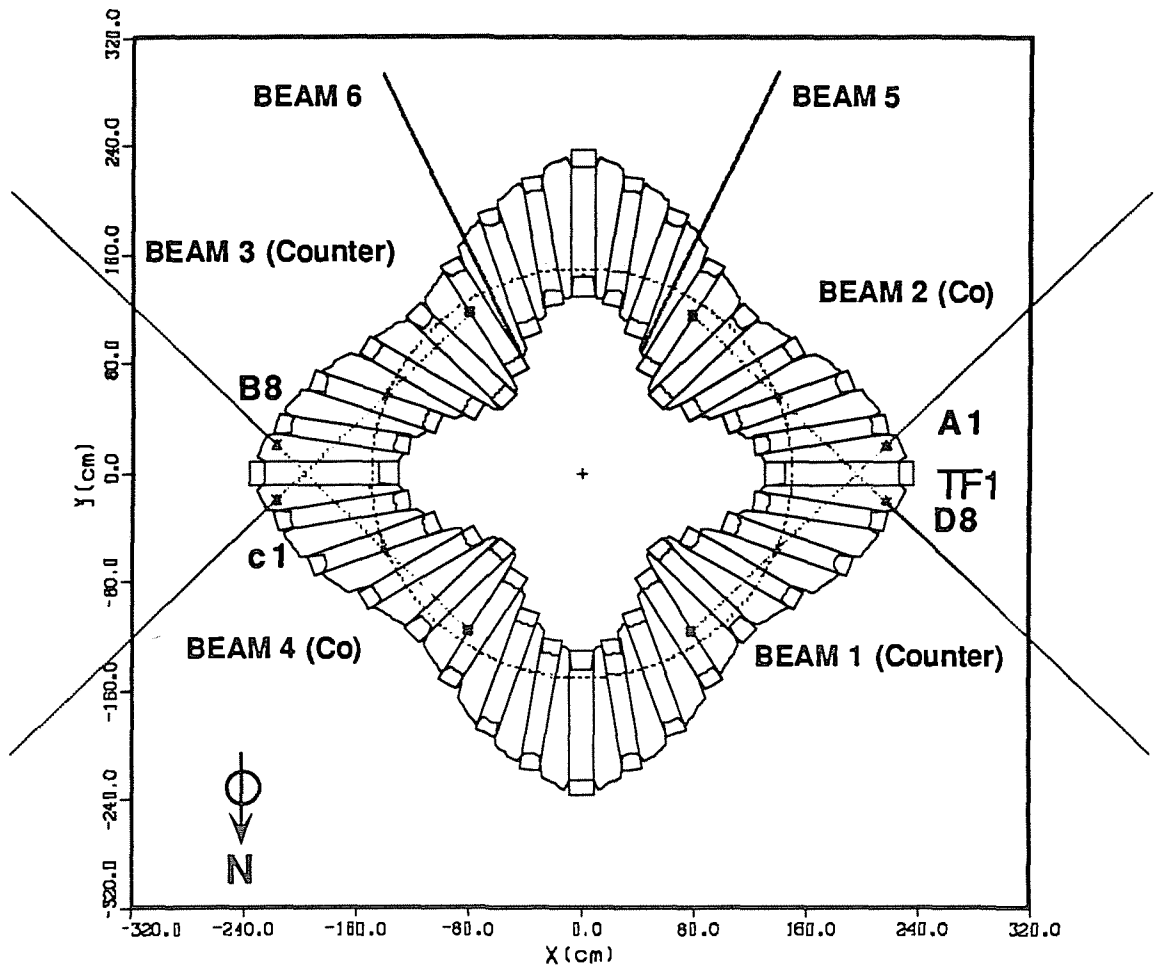


Fig.1.1

TJ-II Vacuum Vessel Octant

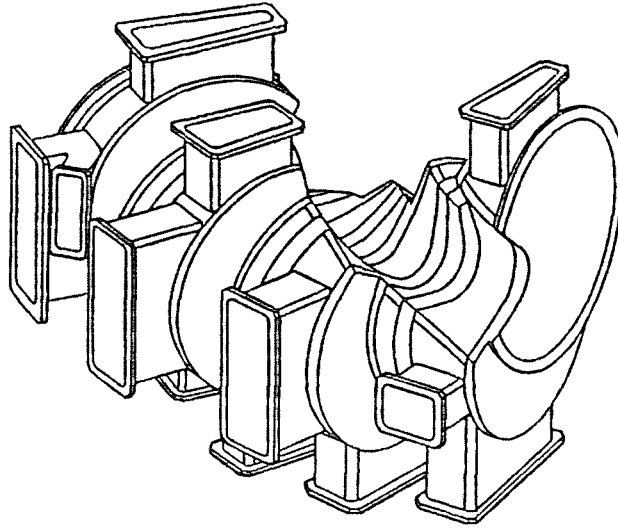


Fig. 1.2

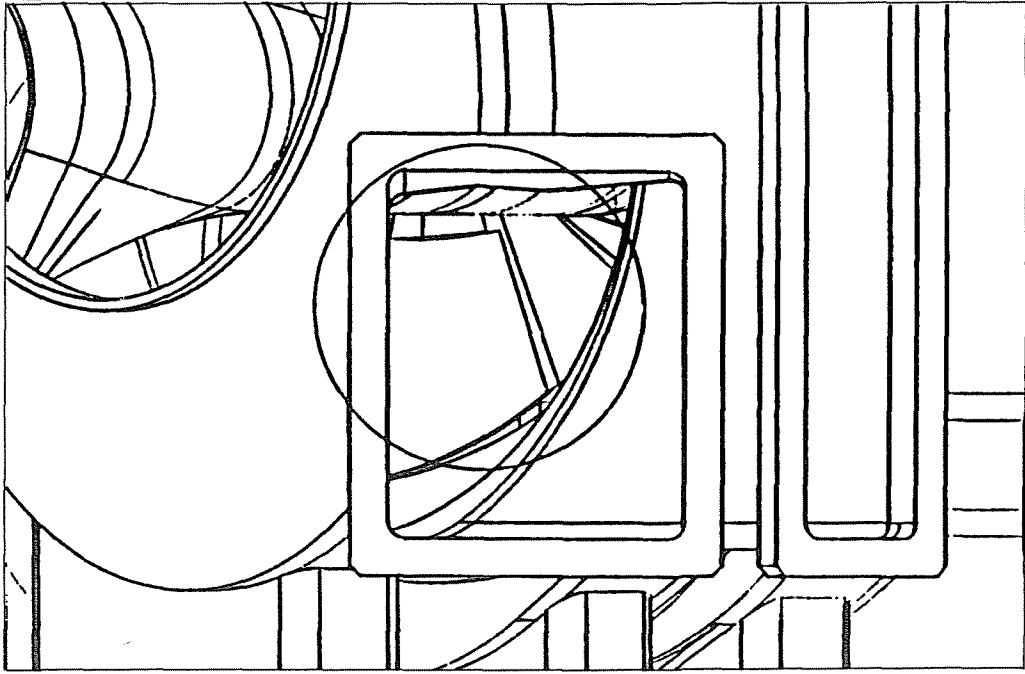
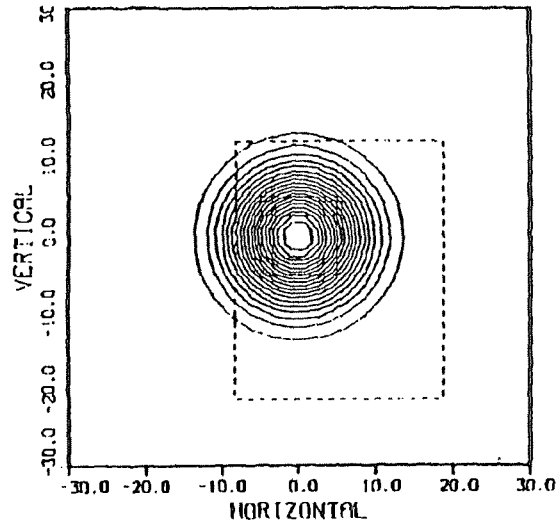
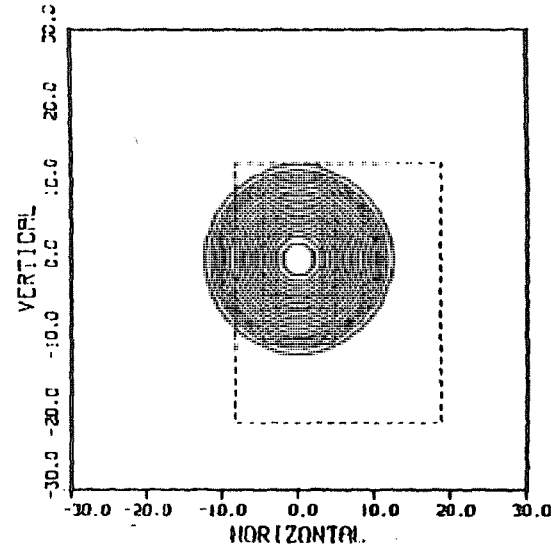


Fig. 1.3

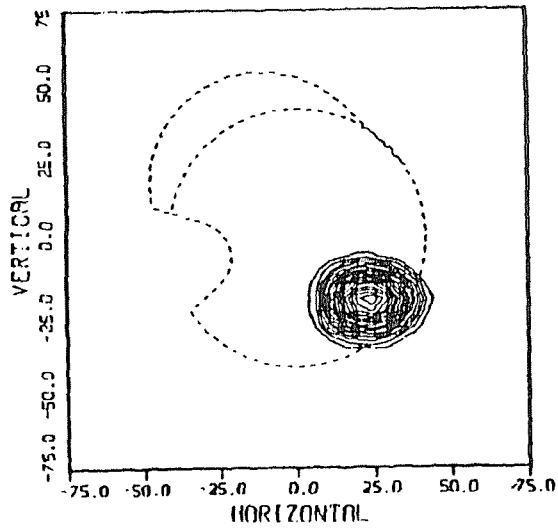
SHUTTER: Pot.=170kW



PORT: Pot.= 32KW



TF1: Pot.=40kW



TRANSMITTED POWER: 75%

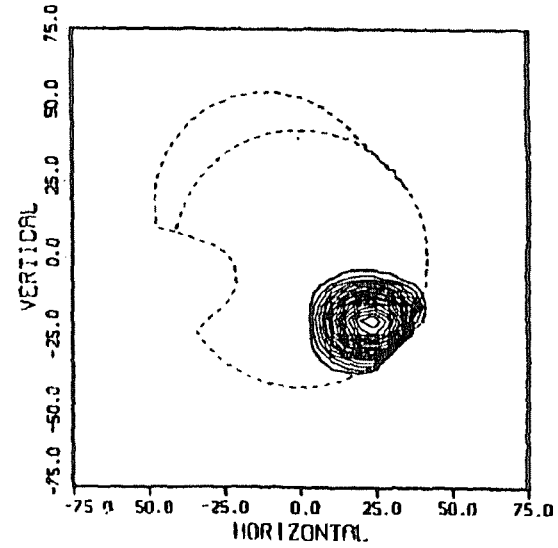


Fig.2.1

Plasma-Beam Cross Sections

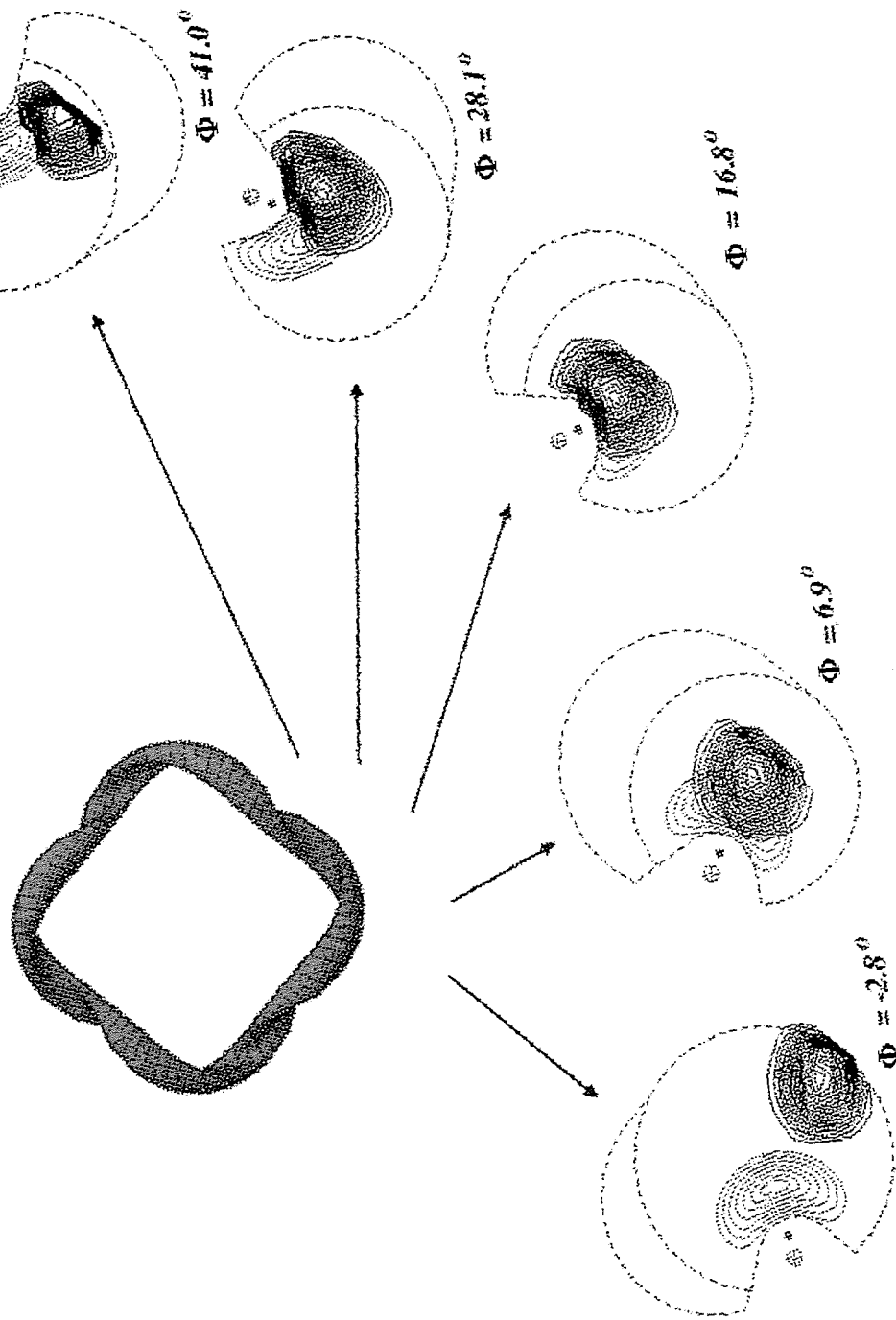


Fig. 2.2

SHINE THROUGH

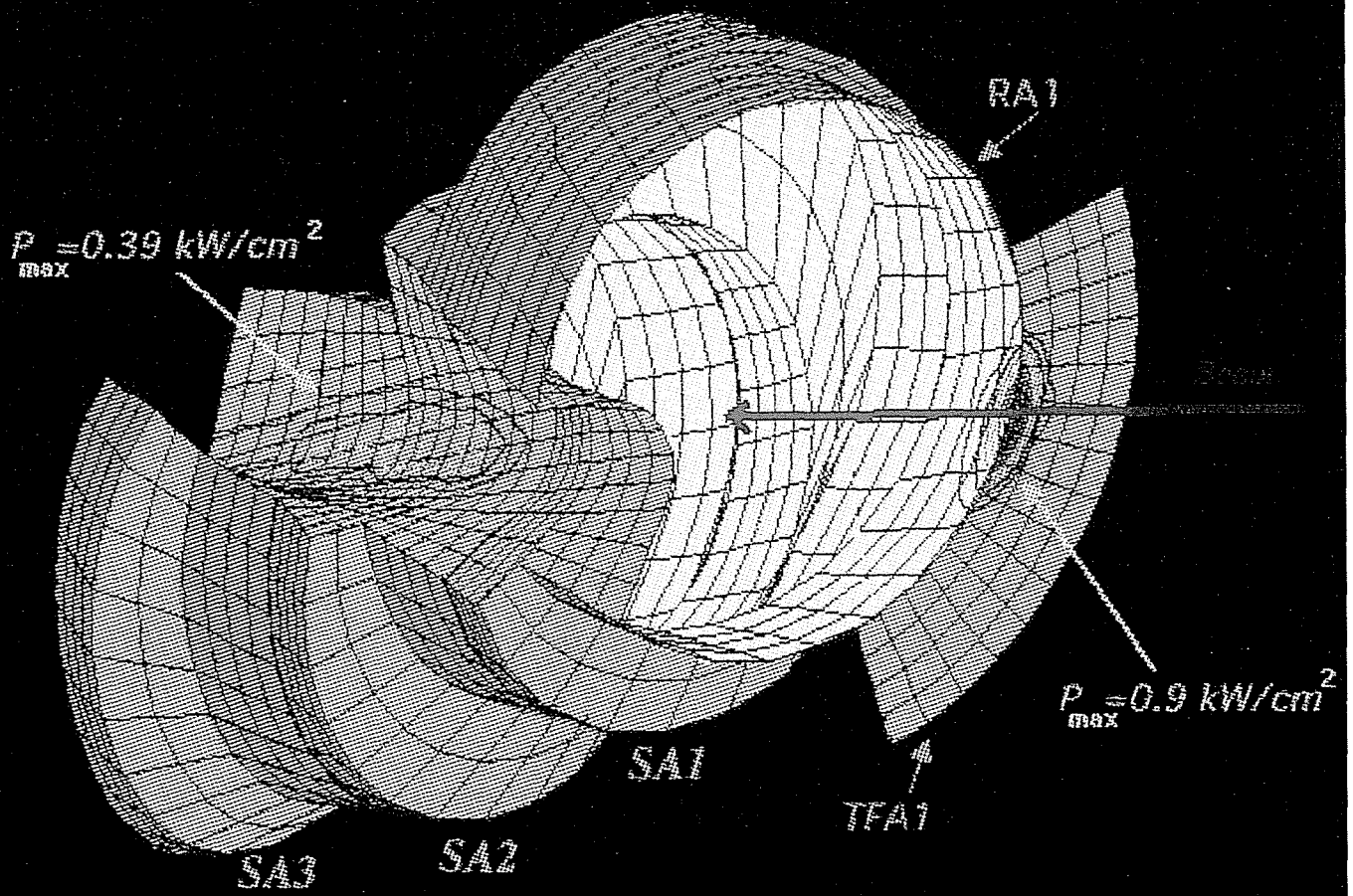


Fig.3.1

VACUUM VESSEL

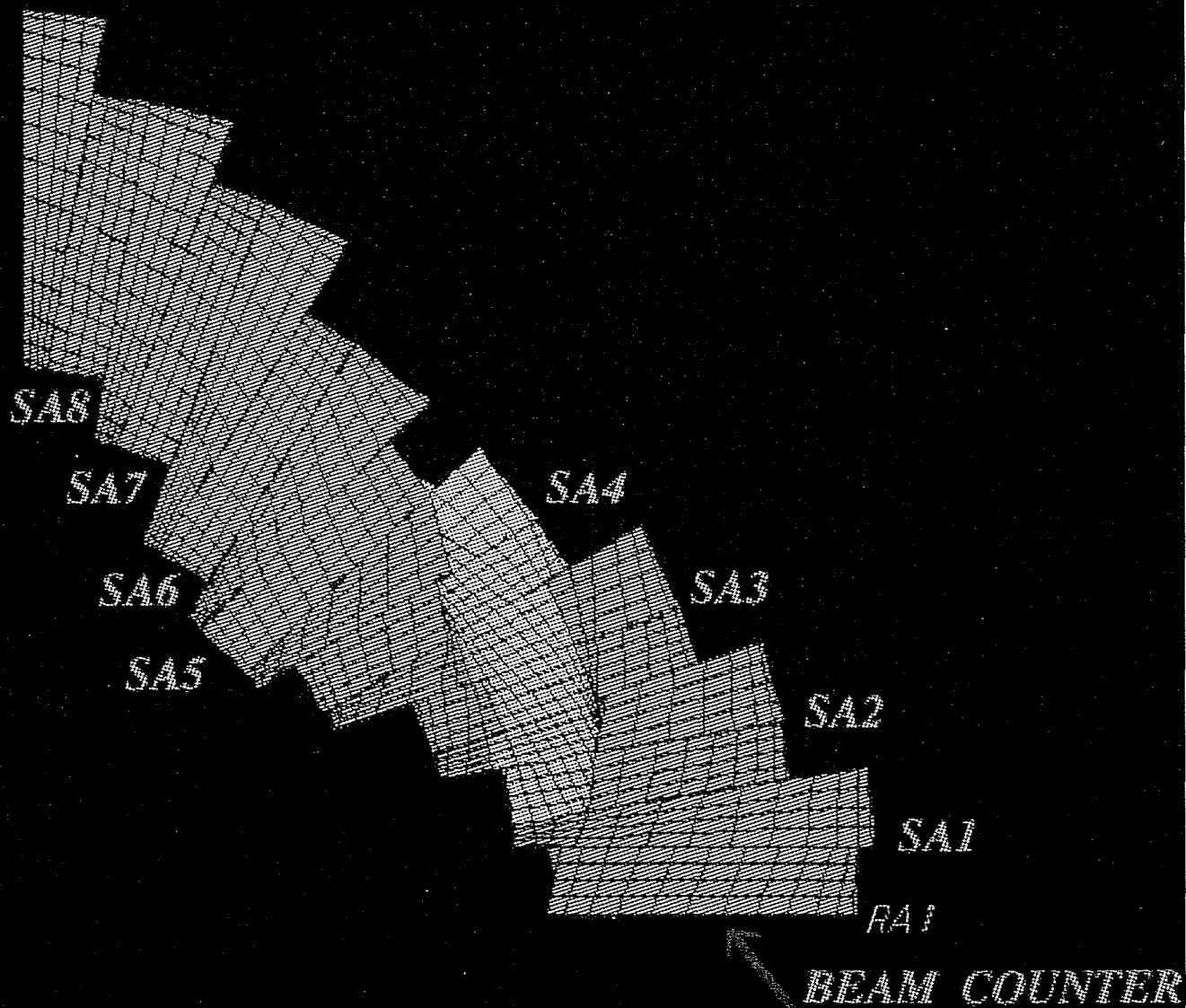


Fig. 3.2

SHINE THROUGH

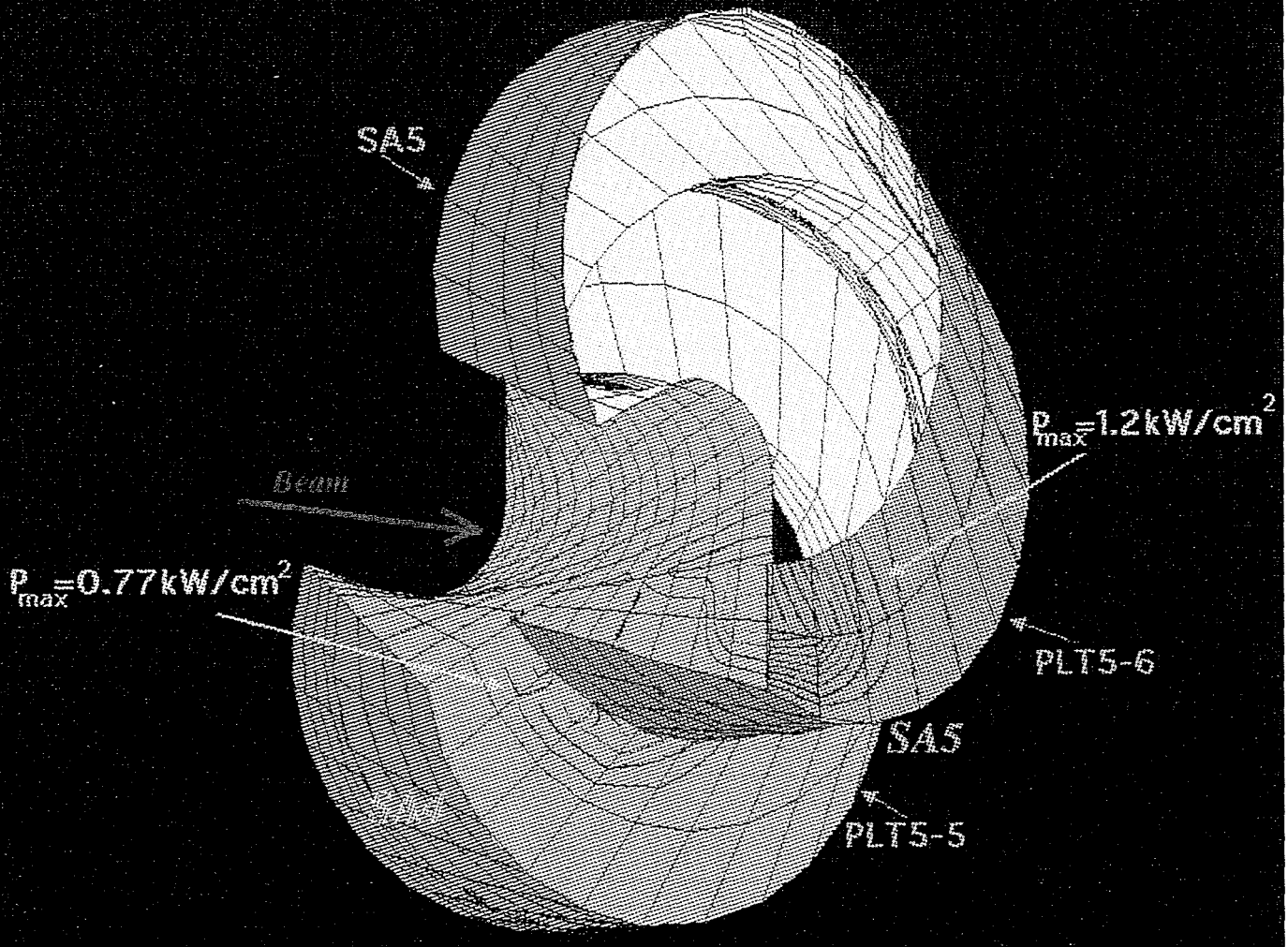


Fig.3.3

PHI - 85.50

Max. (W/cm²) - 2276.

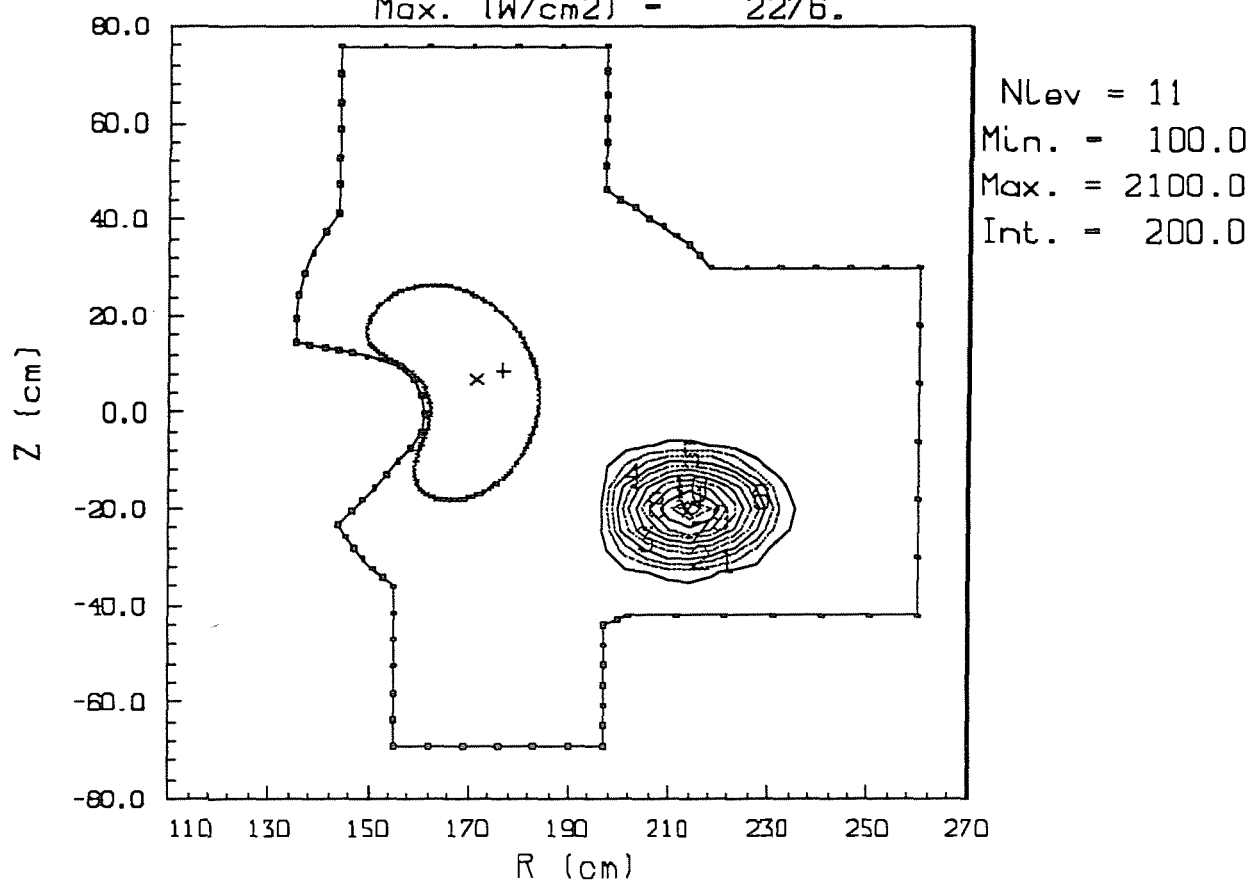


Fig.3.4

Comparación de potencia interceptada por blancos planos y tridimensionales

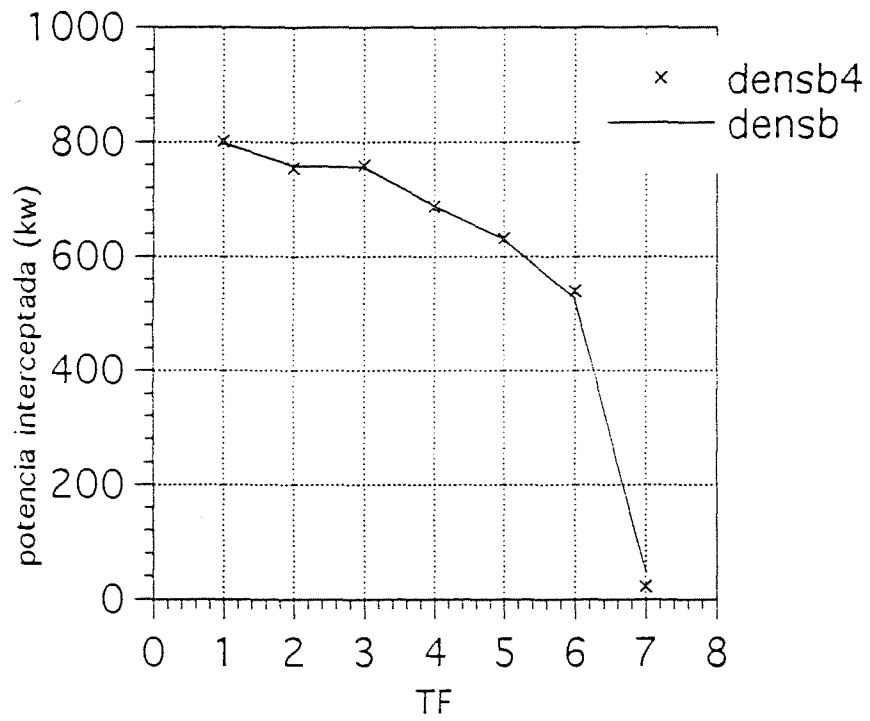


Fig.4.1

comparacion de scrapers tradicionales
y scrapers de movie

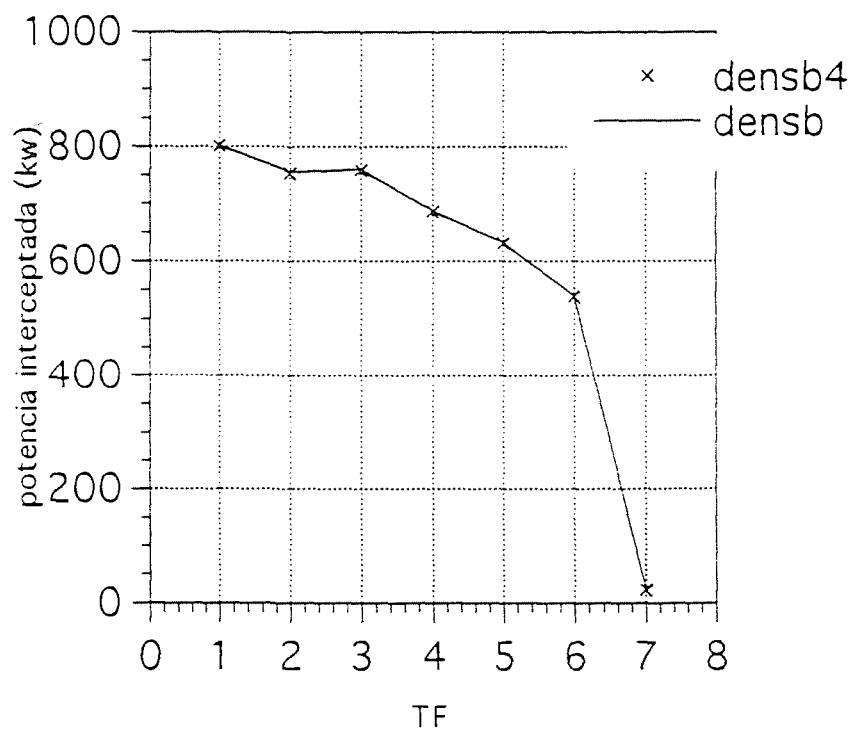


Fig.5.1

Potencia interceptada
RA5 + SA5

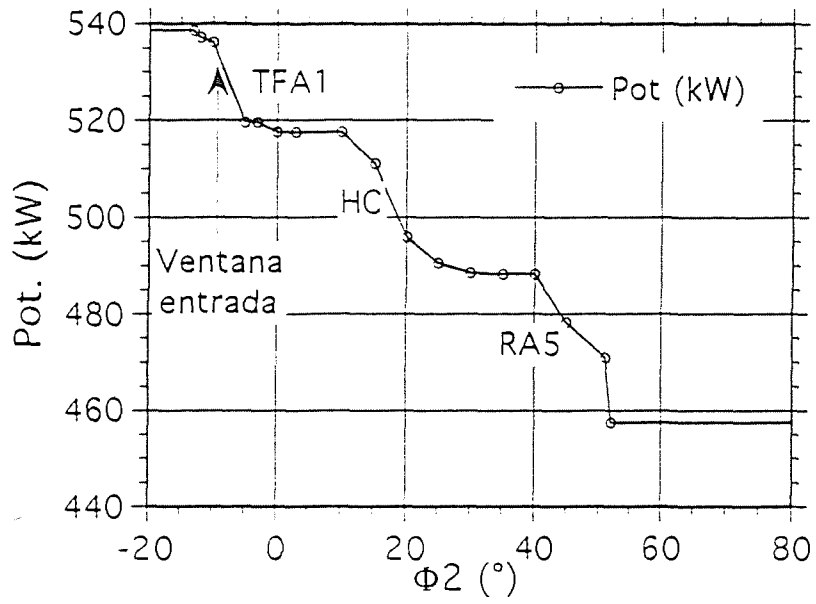


Fig.5.2.a

Potencia interceptada
RA7 + SA7

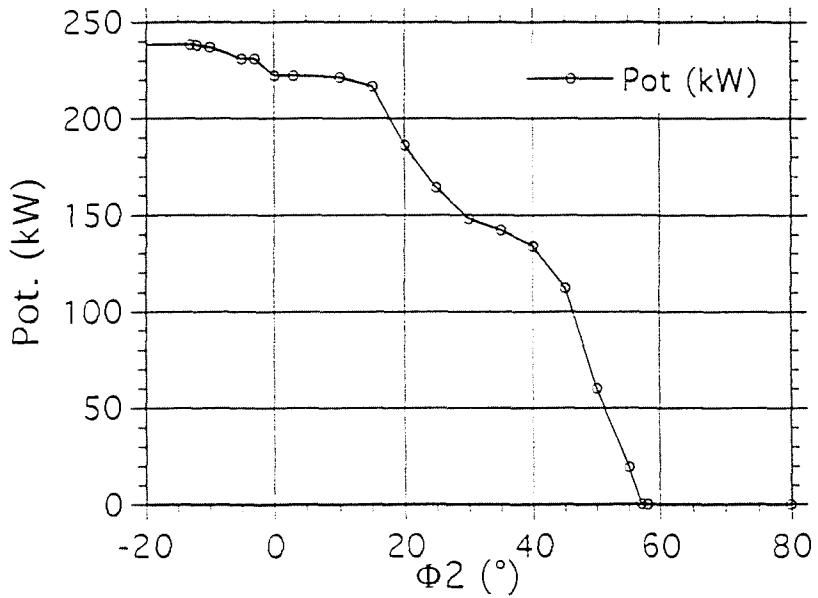


Fig.5.2.b

VENTANA DE ENTRADA

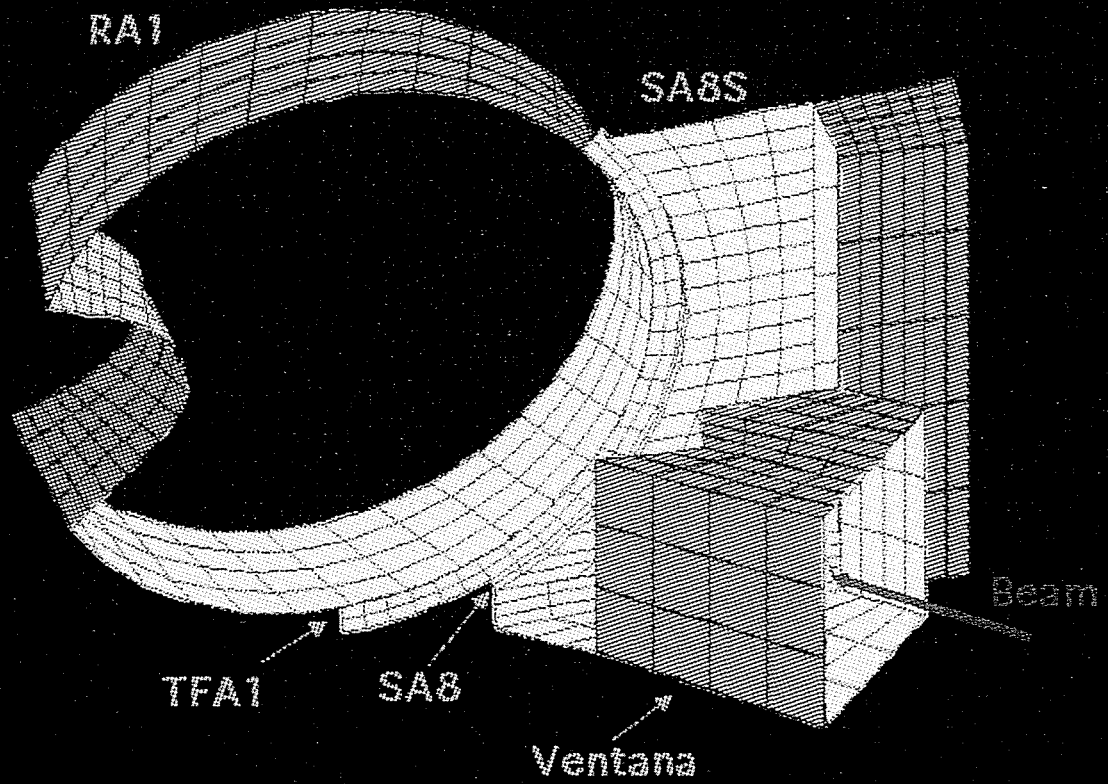


Fig.6.1

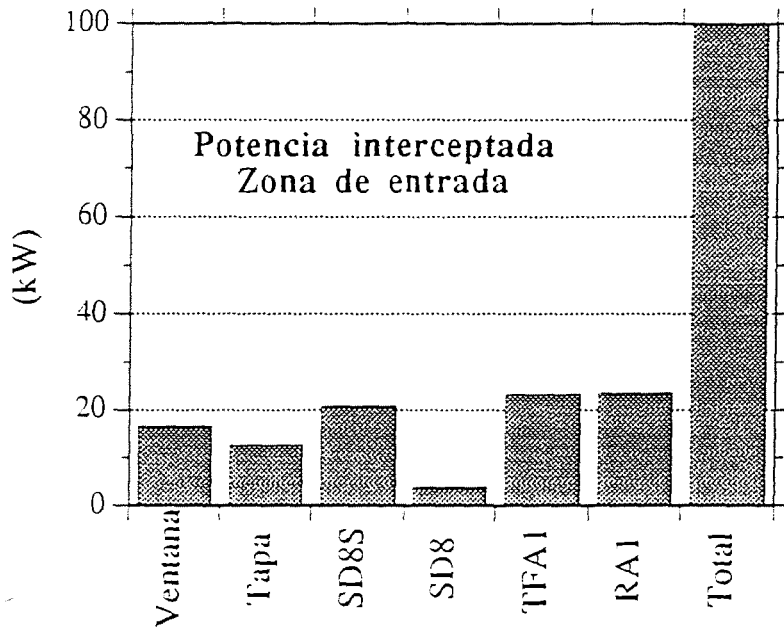


Fig.6.2.a

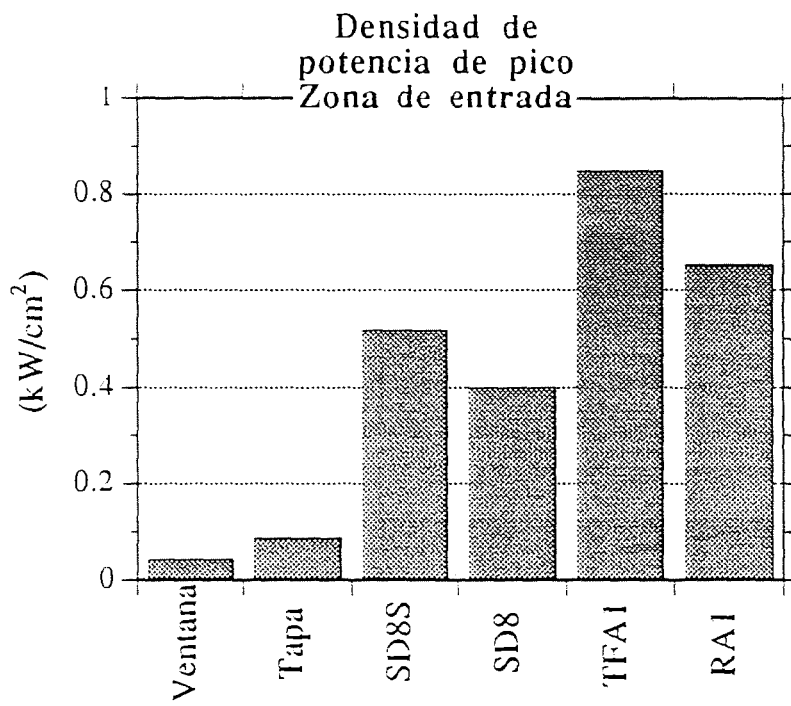


Fig.6.2.b

ENTRADA DEL HAZ

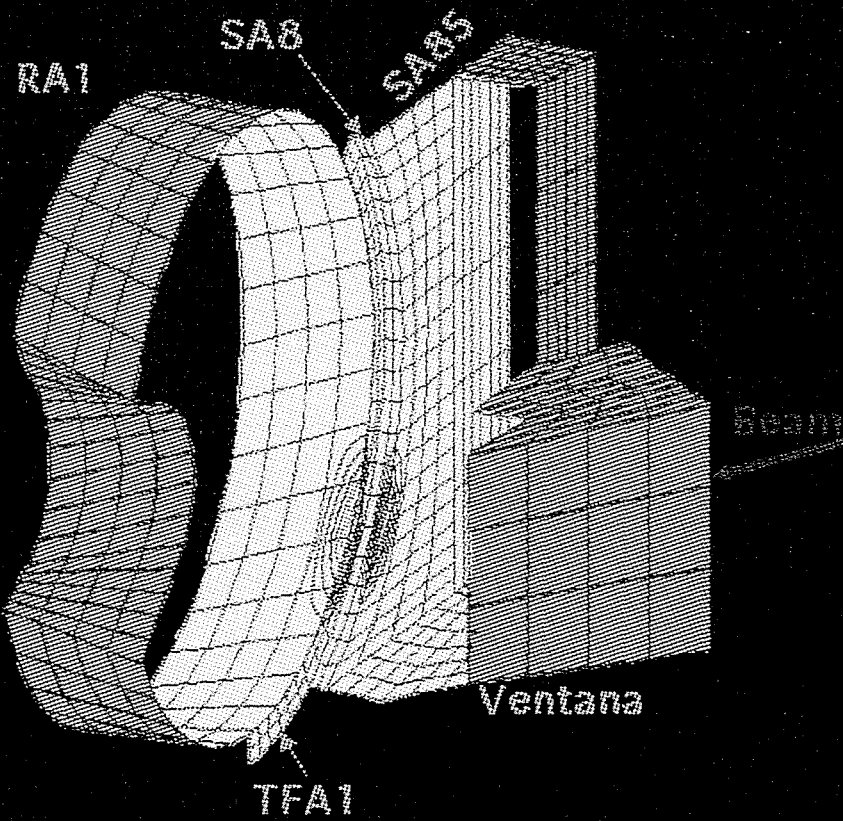


Fig.6.3

SHINE THROUGH

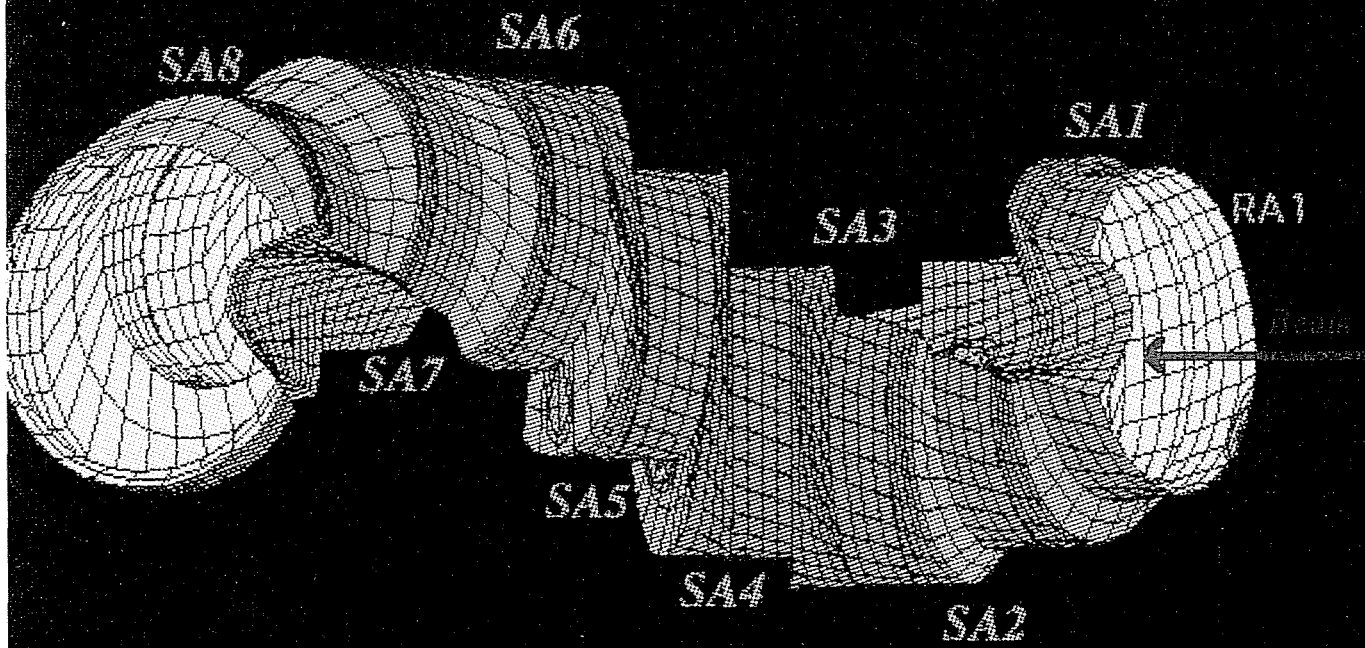


Fig. 6.4

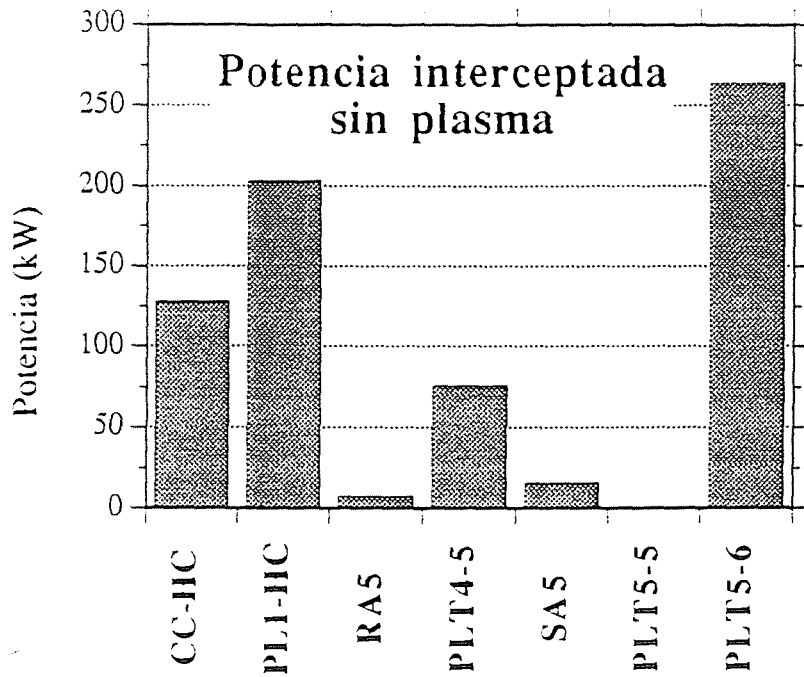


Fig.6.5.a

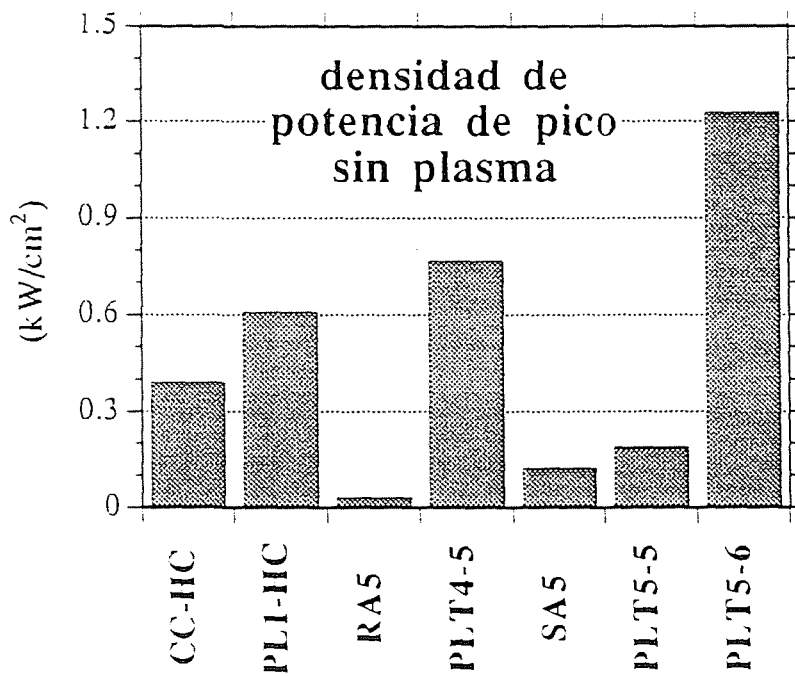
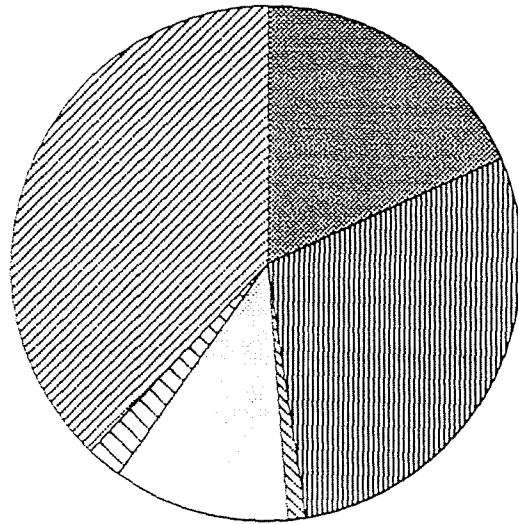


Fig.6.5.b

Distribución de potencia interceptada sin plasma

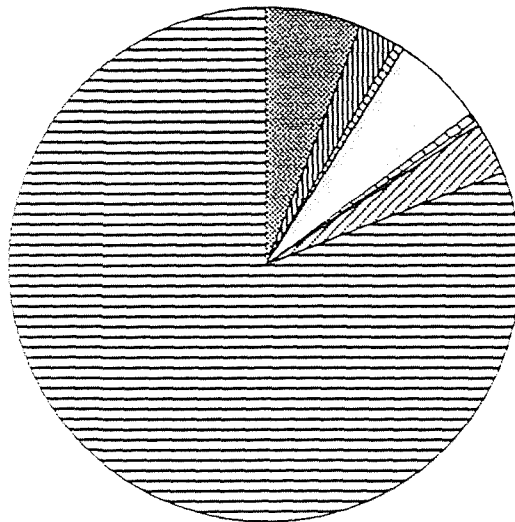


- CC-HC
- ▨ PL1-HC
- ▧ RA5
- PLT4-5
- ▩ SA5
- ▤ PLT5-5
- ▥ PLT5-6

Fig.6.6.a

Distribución de potencia interceptada Plasma densidad media

$$n_e(0) = 5.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$



- CC-HC
- ▨ PL1-HC
- ▧ RA5
- PLT4-5
- ▩ SA5
- ▤ PLT5-5
- ▥ PLT5-6
- ▨ Plasma

fig.6.6.b

SHINE THROUGH

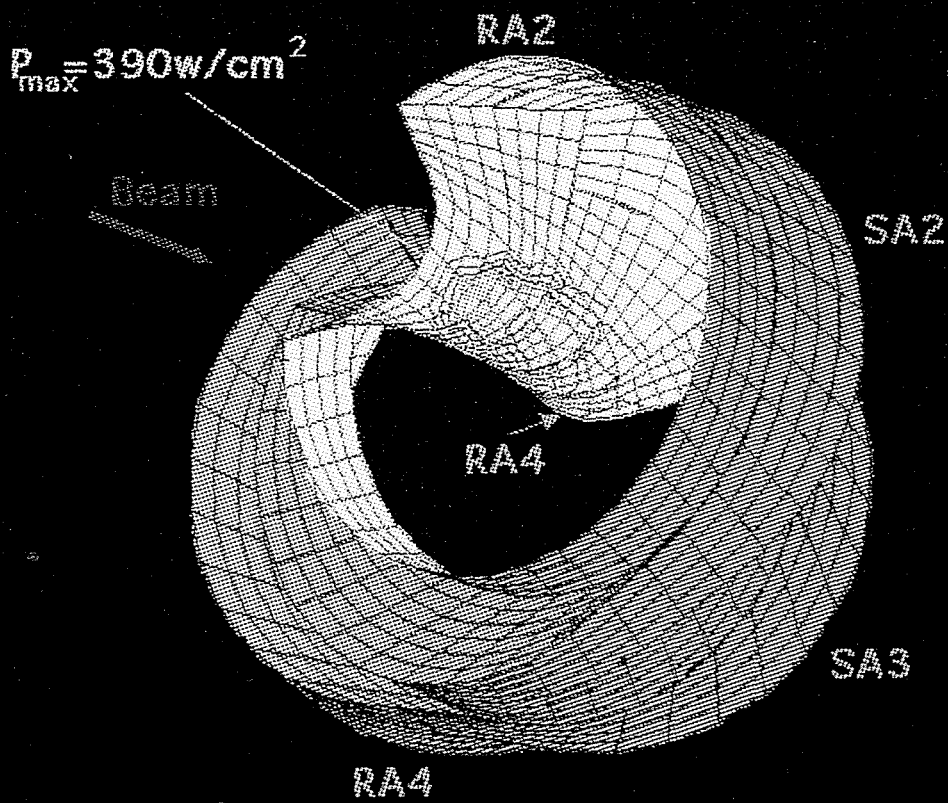


Fig.6.7

SHINE THROUGH

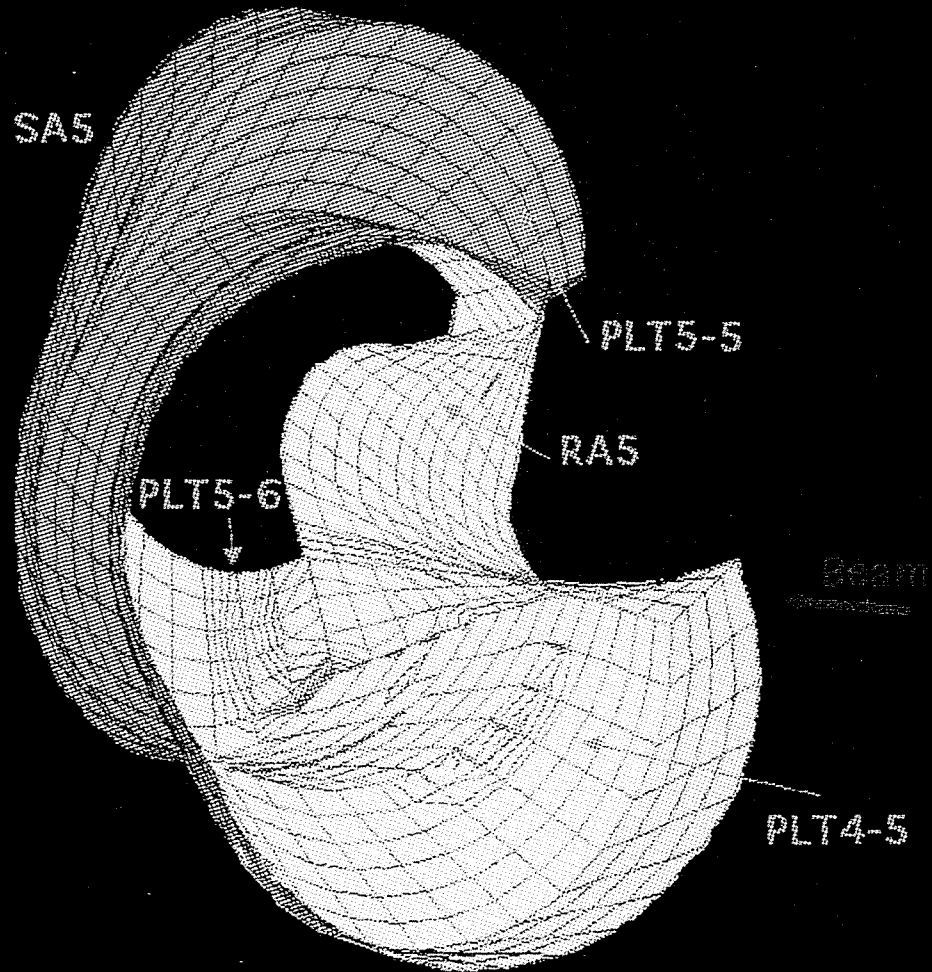


fig.6.8

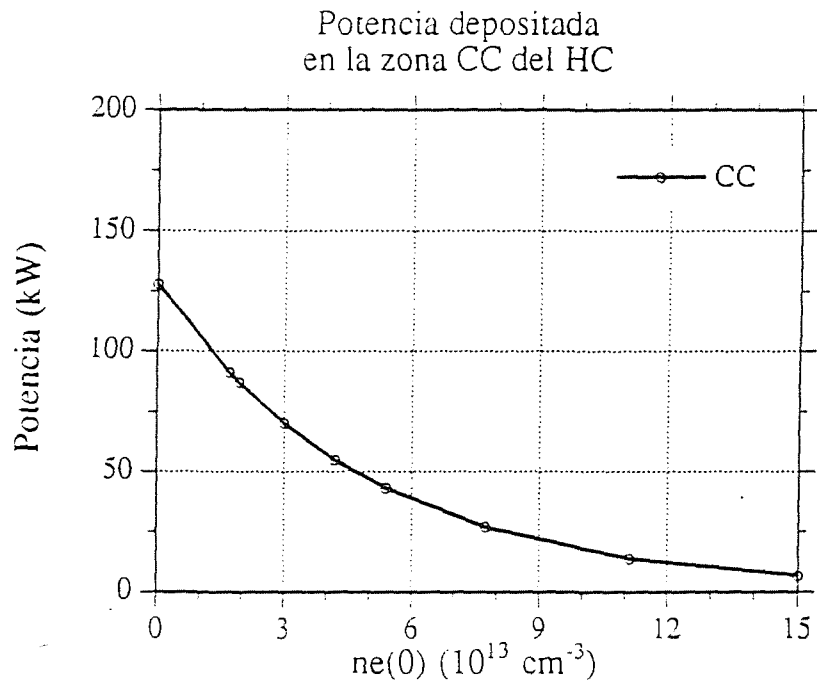


Fig.6.9.a

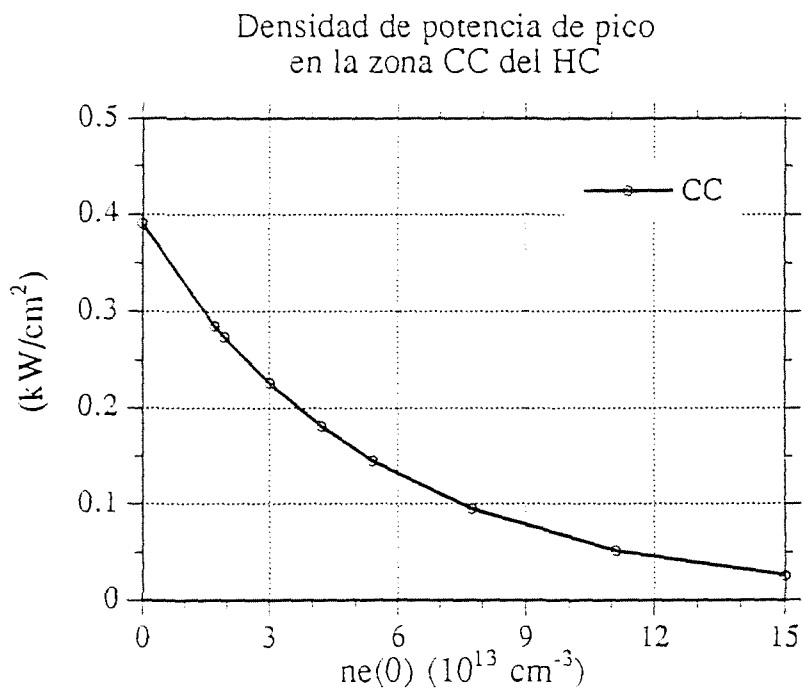


Fig.6.9.b

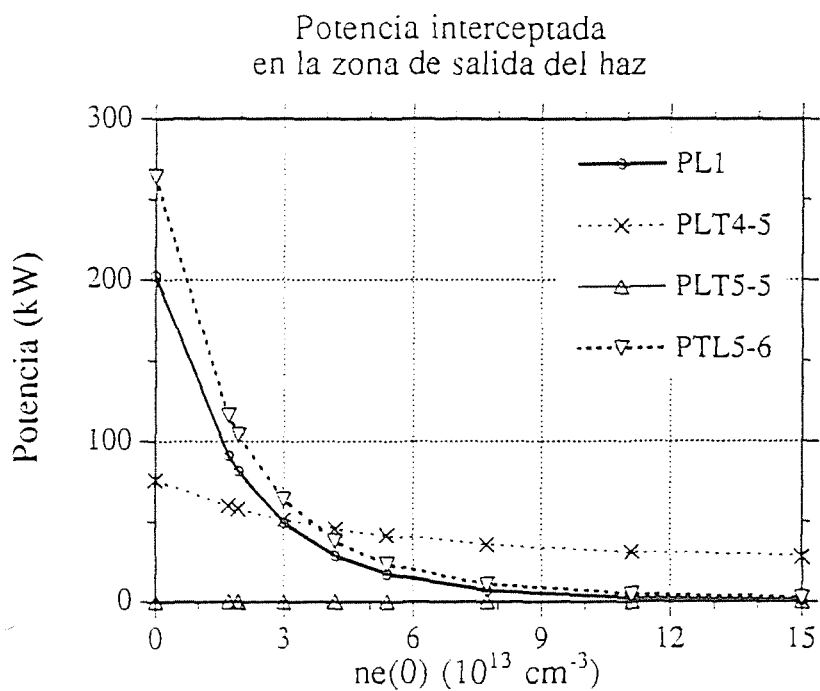


Fig.6.10.a

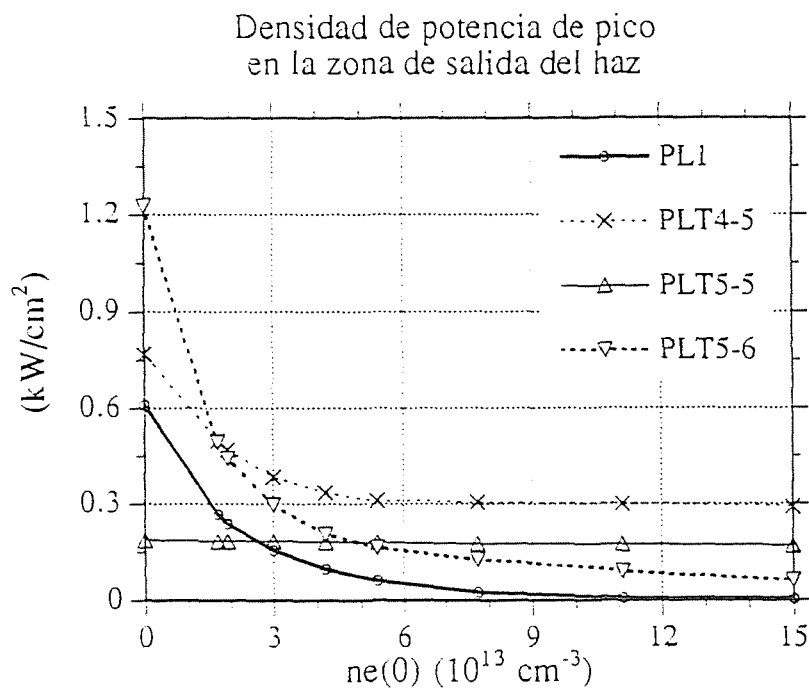


Fig.6.10.b

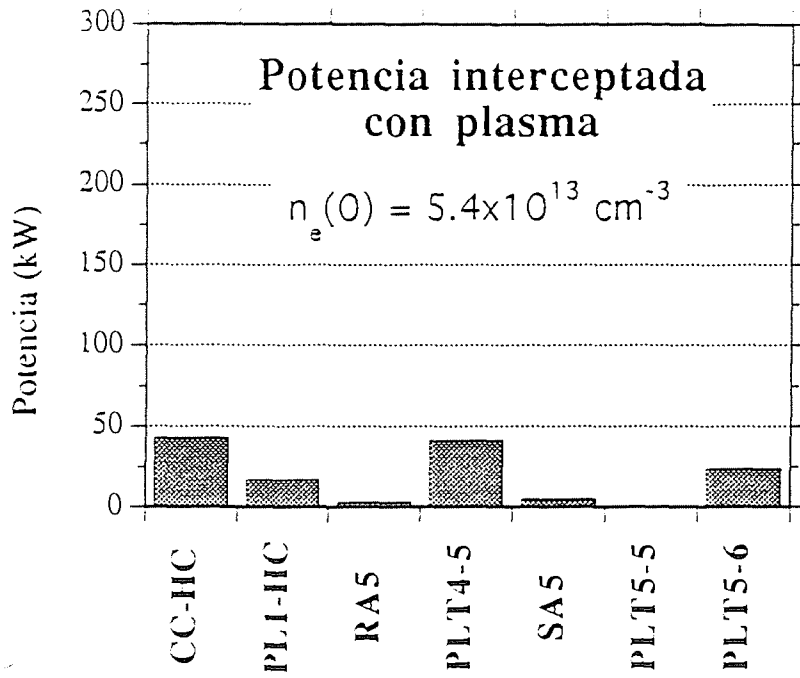


Fig.6.11.a

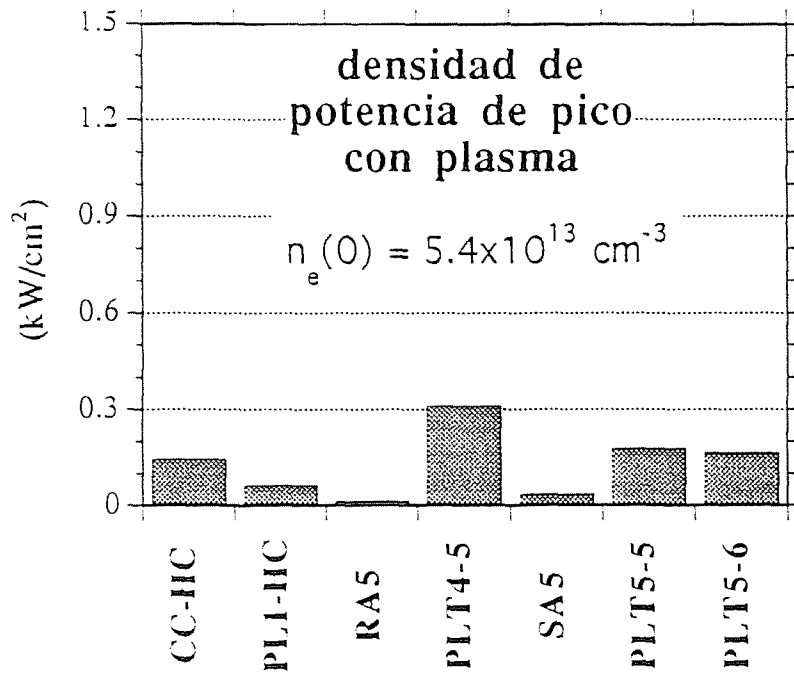


Fig.6.11.b

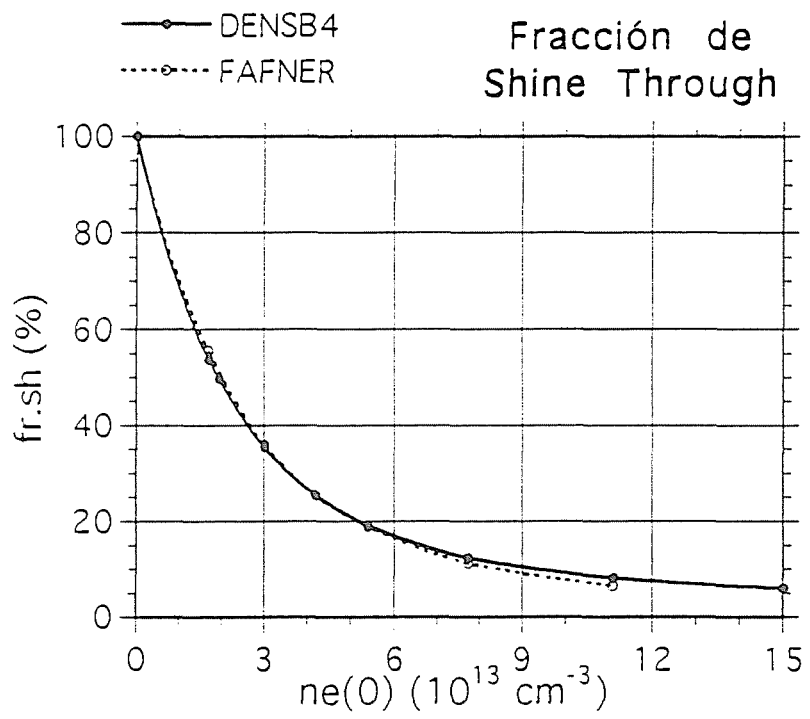


Fig.6.12

FAST ION IMPACTS

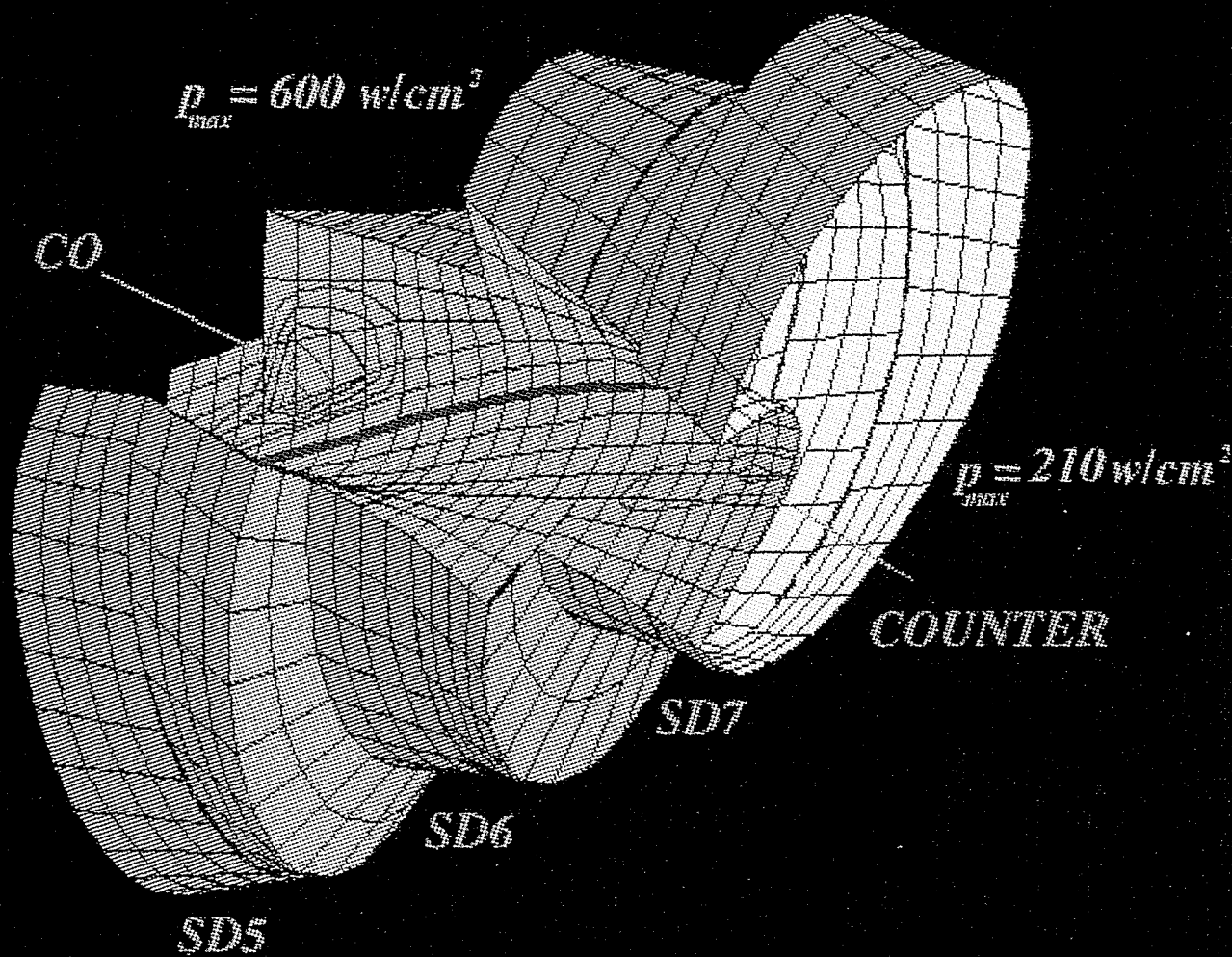


Fig. 6.13

FAST ION IMPACTS

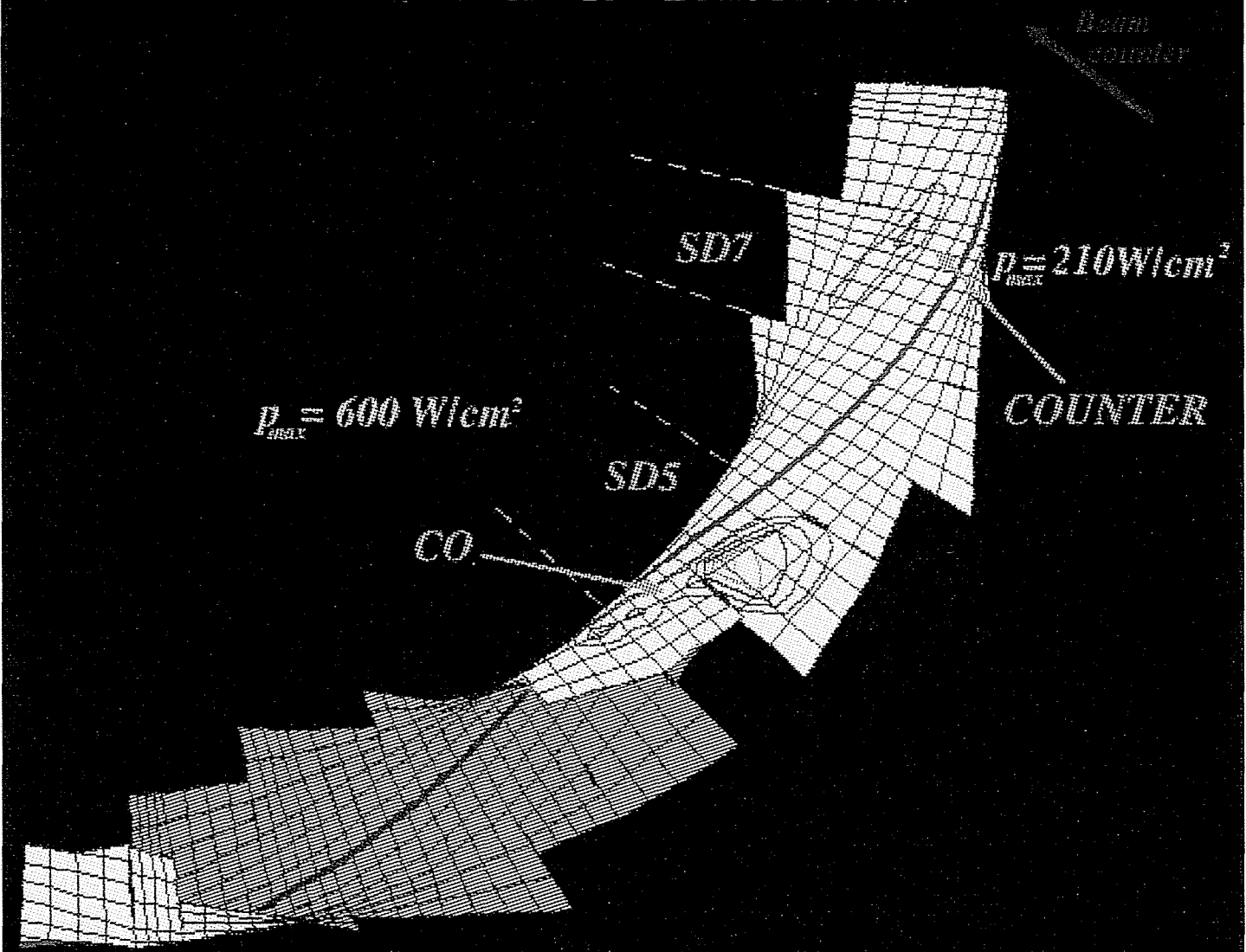


Fig. 6.14

