

Aplicación del Código
OPTIMUS al Sistema de
Inyección de Neutros del TJ-II.

C. Fuentes

M. Liniers

J. Guasp

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: 238-98-002-5

ISSN: 1135-9420

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700412; 700380

NEUTRAL ATOM BEAM INJECTION; PLASMA HEATING; COMPUTER CODES;
TOKAMAK DEVICES

Aplicación del código OPTIMUS al Sistema de Inyección de Neutros del TJ-II

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

60 pp. 19 figs. 8 refs.

Resumen:

Los diferentes procesos de pérdidas que afectan a un haz de neutros desde su generación en la fuente de iones hasta su entrada en el dispositivo de fusión, dependen en gran medida de la distribución de presión del gas residual dentro del inyector. El código OPTIMUS analiza estas pérdidas y calcula la distribución de presiones en un inyector con una geometría determinada.

Dado que la adaptación de los inyectores al TJ-II no ha precisado cambios importantes de diseño sólo se requiere ajustar los rangos de operación del flujo de gas y de las velocidades de bombeo. Se encuentra que para flujos de gas que optimizan el funcionamiento del sistema es necesario un sistema de bombeo independiente para el cajón del calorímetro estimándose en 120,000 l/s la velocidad de bombeo óptima.

Se comprueba también que la eficacia del sistema no se ve gravemente deteriorada al considerar un hipotético *efecto beaming* y que con un acondicionamiento apropiado de las paredes del inyector, de forma que los coeficientes de absorción no superen excesivamente la unidad, la operación del inyector se mantiene en condiciones aceptables.

Application of the OPTIMUS Code to the Neutral Beam Injection System of TJ-II

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

60 pp. 19 figs. 8 refs.

Abstract:

The different losses processes affecting a neutral beam since is born into the ions source until is coming into the fusion machine, are dependent of the residual gas pressure distribution inside the injector. The OPTIMUS code analyzes that losses and calculates the pressure distribution inside one injector with specific geometry.

The adadtation of injector to TJ-II has not required important design changes, only the operating range of the gas flow and the pumping speed have been modified. The calculations show that the required gas flows for the optimal operation of the system nedd an independent pumping system for the calorimeter box with a pumping speed of 120000l/s.

The system efficiency is not affected by an hypothetical *beaming effect* and it is found also that with a proper conditioning of the injector walls, so that the absorption coefficients do not surpass excessively the unity value, the injector operation remains optimal.

INDICE

1. Introducción

2. Inyectores de Haces Neutros del TJ-II

- 2.1. Descripción de componentes
- 2.2. Procesos físicos implicados

3. Código OPTIMUS

- 3.1. Descripción general
- 3.2. Método
- 3.3. Modelo geométrico utilizado

4. Resultados

- 4.1. Variación de la velocidad de bombeo en el cajón del calorímetro
- 4.2. Variación del flujo de gas en la fuente de iones y el neutralizador
- 4.3. Efecto *beaming*
- 4.4. Variación de flujo desorbido
- 4.5. Variación del potencial de aceleración
- 4.6. Caso optimizado

5. Conclusiones

A1. Diagrama lógico del código OPTIMUS

A2. Estructura de ficheros utilizados

- A2.1. Datos de entrada
- A2.2. Fichero de salida
- A2.3. *Namelist* y *Block Data* del código OPTIMUS

A3. Utilización del código OPTIMUS

- A3.1. Ejemplo de ejecución del código OPTIMUS

Referencias

Lista de figuras

1.INTRODUCCION

En el interior de un inyector de neutros, representado esquemáticamente en la Fig. 2.2, tienen lugar los procesos de generación del haz de iones, neutralización, y transporte del haz de neutros hasta la cámara que contiene el plasma confinado magnéticamente.

En el curso de estos tres procesos tienen lugar pérdidas de potencia del haz debidas a diferentes mecanismos y que tienen un gran impacto en la eficiencia del inyector. Y dado que las potencias inyectadas son considerables (1 MW de neutros para los inyectores del TJ-II) y las eficiencias de inyección relativamente bajas (del orden del 25 %) cualquier mejora de la eficiencia es bienvenida, tanto desde el punto de vista del consumo de energía como de el del envejecimiento de los componentes del inyector que han de soportar elevadas cargas térmicas.

La generación del haz de iones tiene lugar en la fuente de iones (ver Fig.2.3), en la que mediante una descarga de arco se produce un plasma denso (10^{12} cm^{-3}) del que se extraen los iones mediante un electrodo (electrodo de plasma) polarizado ligeramente negativo respecto al ánodo (100 V). El gas inyectado en la fuente se difunde a través de los electrodos de rejilla, en donde puede ser ionizado y dar lugar a iones secundarios que son interceptados por las rejillas. Este proceso puede dar lugar a pérdidas de hasta 5-6 %, además de producir un calentamiento de las rejillas con el consiguiente deterioro de la óptica del haz debido a las deformaciones. Es por consiguiente necesario conseguir mejorar la eficiencia de gas de la fuente, o lo que es lo mismo, minimizar el flujo de gas necesario para obtener una potencia de arco determinada.

En el neutralizador, los iones extraídos y acelerados sufren reacciones de intercambio de carga con las moléculas de gas neutro, capturando un electrón y quedando convertidos en átomos neutros muy energéticos (40 keV en el caso de los inyectores del TJ-II). Este proceso tiene una eficiencia que disminuye con la energía de los iones (60 % para iones de 40 keV) para un target de gas de saturación (aquél en que las reacciones de intercambio de carga y de reionización están equilibradas de modo que un aumento de la densidad de gas o la longitud recorrida no conduce a un aumento de la fracción neutralizada). Normalmente el gas que entra en el neutralizador por difusión desde la fuente de iones no es suficiente debiendo inyectarse gas dentro mismo del neutralizador.

A la salida del neutralizador el haz tiene una fracción de iones no neutralizados, con órbitas dominadas por los campos magnéticos residuales siempre presentes en las cercanías de una máquina de fusión. Con objeto de apartar los iones de la trayectoria del haz de neutros se instala un imán deflector a la salida del neutralizador, que deflecta las trayectorias de los iones llevándolos a la “trampa

iónica”. La superficie metálica de la trampa está fuertemente refrigerada debido a las altas densidades de potencia que pueden alcanzarse allí. La trampa iónica constituye una nueva fuente de gas al producirse la desorción por impacto o efecto de temperatura del gas atrapado en el material.

El haz de neutros con su óptica determinada por la geometría de los electrodos (distribución aproximadamente gaussiana de densidad de potencia en el foco), ha de ser transportado hasta el plasma. En el camino, dos mecanismos de pérdidas han de ser tenidos en cuenta: las pérdidas geométricas y las pérdidas por reionización.

Las pérdidas geométricas vienen determinadas por la divergencia del haz. Cuanto mayor es esta divergencia, mayor es la fracción de haz interceptada por los diafragmas que encuentra en su camino. En el caso de los inyectores del TJ-II la divergencia del haz es 1.3^0 y la eficiencia total de transmisión geométrica del 62 %.

Las pérdidas por reionización se deben a colisiones de los átomos del haz con las moléculas de gas dentro del inyector. El proceso tiene un carácter catastrófico en el sentido de que a mayores pérdidas por reionización mayor es la cantidad de gas desorbido por impacto de los iones y mayor por tanto el target de reionización. Para minimizarlas ha de reducirse lo más posible la presión base durante el pulso de haz, es decir, ha de contarse con velocidades de bombeo muy elevadas (300,000 l.s-1).

Todos los mecanismos de pérdidas mencionados contribuyen a disminuir la eficiencia del inyector, que está en torno a un 25 %. Para mejorarla, así como para impedir procesos catastróficos que puedan llegar a dañar componentes del inyector, se puede actuar sobre los siguientes mecanismos:

- Óptica del haz
- Eficiencia de gas y eficiencia de arco en la fuente de iones
- Eficiencia de neutralización
- Sistema de bombeo primario
- Diseño de diafragmas apropiados

Los inyectores del TJ-II, descritos en §2, son un préstamo del Laboratorio de Fusión de Oak Ridge, en Tennessee, E.E.U.U. , en donde estuvieron en funcionamiento en ATF (Advanced Toroidal Facility), con parámetros de inyección similares a los de TJ-II. Por consiguiente, tanto la fuente de iones y las rejillas de aceleración, como los principales componentes dentro del inyector están ya definidos, con la excepción del sistema de bombeo primario, para el que se han sustituido las criobombas originales, por bombas de gettering de titanio.

La optimización de la óptica del haz para el TJ-II [SLAC] se ha limitado por el momento a la elección del gap entre electrodos más apropiado para el rango de energías 30-40 keV.

El diseño de diafragmas y del ducto de transición entre inyector y TJ-II, así como estudios de transmisión geométrica y cargas térmicas, han sido realizados en gran detalle en nuestro laboratorio[DENSB].

Los flujos de gas en la fuente y el neutralizador pueden variar en torno a los valores óptimos de diseño de estos componentes, en función de la capacidad de bombeo instalada en el inyector. Es importante conocer el comportamiento del haz en función de los flujos de gas y velocidades de bombeo, pues las pérdidas de neutralización y reionización dependen en gran medida de ellos.

En este informe se presentan los resultados obtenidos con el código OPTIMUS, que modela el inyector desde el punto de vista de balance de gases. Para una geometría dada del inyector y unos parámetros de haz (energía e intensidad) determinados, el código calcula en función de los flujos de gas y las velocidades de bombeo, las fracciones del haz perdidas por neutralización y reionización, la distribución de presiones dentro del inyector, y la potencia del haz inyectado en el plasma.

En el apartado §2 se describen los componentes y geometría del inyector, así como los procesos físicos que tienen lugar en ellos. En §3 se describe el código OPTIMUS, en §4 se presentan los resultados obtenidos para los inyectores del TJ-II, y en §5 las conclusiones de este trabajo.

2- INYECTORES DE HACES NEUTROS DEL TJ-II

La Fig.2.1 muestra los dos inyectores de neutros conectados al TJ-II. La inyección se realiza en ambos casos tangencialmente y con los mismos valores nominales de potencia y energía (40 KeV y 1.5 MW en shutter por inyector) aunque inyectado uno de ellos en el sentido del campo magnético toroidal (haz CO) y otro en sentido contrario (haz COUNTER).

Se describen a continuación los componentes de que constan así como los principales procesos físicos que tienen lugar en su interior.

2.1 Descripción de componentes

En el inyector se distinguen básicamente: una fuente de iones, dos cámaras de vacío con sistema de bombeo independiente y un conducto que ensambla el inyector con la cámara de vacío del TJ-II (Fig.2.2.)

a)- Fuente de iones

En nuestro caso se trata de una fuente duoPIGatron (Fig.2.3.) de 12 filamentos con una corriente de arco de 1400A que induce plasma sobre una pequeña cámara de vacío en la que es inyectado gas hidrógeno. La extracción y aceleración de los iones se realiza con un sistema electrostático de tres rejillas denominadas sucesivamente de extracción (o plasma) deceleración (supresión de e^-) y aceleración.

Las rejillas de 30 cm de diámetro, tienen un número de agujeros (1980) cuyo diámetro y perfil, junto con la separación entre rejillas, constituyen los parámetros de optimización de la óptica del haz.

Este diseño nos permite la extracción de corrientes iónicas de hasta 100 A, a energías de 40 keV.

b)- Cámara de vacío I

También denominado cajón principal dado que ocupa mas de dos terceras partes de la longitud total de la línea del haz y que en él se localizan la mayor parte de los componentes del inyector (Fig.2.2). Consta de los siguientes elementos:

Neutralizador

Celda cilíndrica de cobre (28cm de diámetro x 130 cm de longitud) que contiene gas hidrógeno en la que los iones rápidos quedan neutralizados por reacciones de intercambio de carga.

Se sitúa inmediatamente después de la fuente de iones y dispone de un sistema propio de inyección de gas.

Deflector magnético

Su función es eliminar del haz de neutros los iones residuales a la salida del neutralizador. Es un electroimán con núcleo de hierro, que produce en el entrehierro el campo magnético de 0.8 Teslas necesario para curvar las trayectorias de los iones de 40 KeV, desviándolos hacia la parte inferior del inyector (trampa iónica).

Trampa iónica

Blanco en el que son frenados todos aquellos iones rápidos extraídos del haz por el deflector magnético. Esta diseñado para soportar cargas térmicas de hasta 3 kW/cm² con refrigeración inercial.

Bombas de gettering titanio

Constituyen el sistema de vacío primario del inyector, necesario para asegurar una presión base en su interior en el rango de 10⁻⁴ Torr durante el pulso de inyección. Han sido diseñadas en el IPP de Garching y suponen el principal cambio realizado en los inyectores de Oak Ridge, ya que sustituyen a las criobombas con inicialmente contaba el sistema.

El diseño, basado en la gran capacidad del titanio para capturar moléculas de Hidrógeno y otros elementos, posee una estructura modular (4 módulos por bomba) que maximiza la superficie activa de titanio (Fig. 2.4). Cada módulo se compone de tres paneles de aluminio corrugado, que rodean a los hilos de titanio; el calentamiento de los hilos mediante una corriente eléctrica da lugar a la evaporación del Ti sobre las superficies de los paneles circundantes, donde quedarán fijadas las moléculas de gas.

La velocidad específica de bombeo con este diseño es de 11 l /s.cm² perpendicularmente a la estructura de la bomba.

Con la instalación de dos bombas de titanio, una a cada lado del haz, de 2 y 0.75 m de altura , la velocidad de bombeo estimada para el cajón principal es de 200,000 l/s.

Placas limitadoras del haz (*Beam defining plates*)

Placas metálicas refrigeradas por agua que conforman un diafragma rectangular de dimensiones variables (desde 15x15 cm hasta 30x30 cm). Su misión es ajustar el diámetro del haz retirando los halos laterales y de esta forma proteger de fuertes cargas térmicas posteriores componentes. Se ubica al final del cajón principal sirviendo de conexión entre éste y el cajón del calorímetro

c) - Segunda cámara de vacío

De dimensiones mucho mas reducidas que el cajón principal (75 cm de longitud), esta cámara solo encierra al calorímetro por lo que se suele denominar como "cajón del calorímetro" (Fig.2.2.).

Posee también un sistema de bombeo propio con dos bombas de titanio de 0.75m de altura, una a cada lado del haz, que proporcionan una velocidad de bombeo de 120.000 l/sec

Calorímetro

Está compuesto por dos placas de Cu de 2 cm de espesor, refrigeradas y dispuestas en forma de "V" con el objeto de hacer la incidencia del haz lo más rasante posible.

La potencia total del haz es evaluada por procedimientos calorimétricos (medida del caudal y temperatura diferencial del agua).

d)- Zona de conexión al TJ-II

Esta zona, con una longitud total de poco más de un metro (111 cm), cuenta con numerosos componentes encargados no solo de conectar correctamente el inyector, sino también de aislar los dos sistemas mientras no se produzca inyección (Fig.2.5) en el plasma.

La distribución de componentes que incluye desde el cajón del calorímetro a la cámara de vacío del TJ-II es la siguiente:

Placas de apertura

Se ubican a la salida del cajón del calorímetro y representan la primera barrera de aislamiento entre el inyector y la cámara de vacío del TJ-II.

Consiste en un diafragma circular de diámetro variable (de 10cm a 20 cm) y refrigerado por agua, encargado de interceptar los halos de potencia más externos del haz, ya que éstos neutros tan periféricos en ningún caso llegarían a alcanzar el plasma pero sí podrían dañar alguna zona posterior no refrigerada.

Shutter

Es una válvula de alto vacío, cuya misión es aislar el inyector cuando es necesario hacer pulsos de acondicionamiento entre dos pulsos de plasma.

Tubo flexible

Su estructura en acordeón asegura el necesario desacoplamiento mecánico entre el inyector y la máquina.

Válvula

Es una válvula de membrana que aísla el sistema de vacío del TJ-II del sistema de vacío del inyector.

Pieza de acoplo

Acopla físicamente la salida de sección circular del inyector con la ventana rectangular del TJ-II. Posee por tanto una geometría complicada que se dificulta aún más si tenemos en cuenta que el haz no es concéntrico con la ventana de inyección. Ha sido diseñado y construido en el CIEMAT y cuenta con un sistema de refrigeración propio.

2.2. PROCESOS FISICOS IMPLICADOS

Como se mencionó en la introducción, en el interior del inyector tienen lugar numerosos procesos físicos que van a determinar la potencia total que finalmente llega al plasma. Todos ellos van mermando la corriente de neutros en detrimento de la eficiencia del sistema. Veamos brevemente en qué consisten los más relevantes.

Conductancias

Todo ducto conector de grandes volúmenes en una línea o sistema de vacío, impide el libre flujo de gas a su través, siendo entendida esta resistencia como la caída de presión existente entre los extremos del ducto por unidad de flujo, se denomina conductancia de un elemento a la inversa de dicha resistencia, es decir, la capacidad que éste muestra en dejar fluir gas de un volumen a otro [6].

$$Q = C (P_1 - P_2) \quad (1)$$

Aunque la conductancia es una propiedad básicamente geométrica, ésta también vendrá determinada por el tipo de régimen que caracterice al flujo y de si ha lugar ó no un cambio de régimen en el transcurso de su paso por el interior del conducto.

El tipo de régimen con el que fluye un gas depende del recorrido libre medio de sus moléculas (ec. 2) y de las dimensiones del recipiente que lo contiene.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot D^2 \cdot N}, \text{ donde } D = \text{diámetro de la molécula de gas y } N = \text{moléculas/cm}^3.$$

Para aire a 20 °C:

$$\lambda = \frac{0.005}{P} \text{ [cm, Torr]} \quad (2)$$

De forma que si λ es veces mayor que el diámetro del conducto, los choques entre las moléculas del gas son menos frecuentes que los choques entre éstas y las paredes del conducto, en cuyo caso el gas fluye bajo un régimen molecular.

Si por el contrario λ es mucho mas pequeña que el diámetro del conducto, la tasa de interacción de las moléculas con las paredes es mucho menor que la existente entre ellas mismas estableciéndose un régimen viscoso.

Para una geometría dada los límites de ambos regímenes pueden expresarse en función de la presión:

- si $\bar{P} \cdot D \geq 0.18$. (\bar{P} = presión media, D= diámetro del conducto). Flujo en régimen viscoso

- Si $\bar{P} \cdot D \leq 0.004$. Flujo en régimen molecular.

- Finalmente, si $0.004 \leq \bar{P} \cdot D \leq 0.18$. Flujo en régimen mixto.

En nuestro sistema las presiones que se establecen están alrededor de 10^{-3} Torr y por tanto el recorrido libre medio alrededor de unos 50 cm. Teniendo en cuenta que el diámetro característico de las rejillas es de 0.5 cm y el del neutralizador de 28 cm, es de esperar que tengan que ser tenidos en cuenta ambos regímenes para el cálculo de la conductancia del neutralizador, y en algunos casos también para la conductancia de la fuente.

A este respecto, se han realizado con OPTIMUS diversos análisis comparativos sin que se encuentre ningún efecto de importancia sobre los resultados de potencia inyectada, pérdidas por reionización, eficacia de neutralización y demás propiedades del sistema de inyección, por lo que en los restantes análisis se considerará únicamente flujo molecular para el cálculo de conductancias.

Dependiendo de los diámetros, perímetros y longitudes concretas de cada elemento conductor, la conductacia podrá venir expresada o por la conductancia de una apertura, un diafragma, un conducto, o una combinación en serie de varias de ellas [5], [6].

Concretamente, para el caso de ductos cilíndricos de sección constante:

$$C_c = 3.64 (T/M)^{1/2} A \quad K \quad (3)$$

$$K = \frac{20+16 \cdot (l/d)}{20+38 \cdot (l/d)+12 \cdot (l/d)^2}$$

Donde K, denominado factor de Clausing, tiende a la unidad para tubos cortos, aproximándose el valor de la conductancia al de una apertura:

$$C_A = 3.64 (T/M)^{1/2} A \text{ l.s}^{-1}$$

Cuando el gas pasa de una región a otra caracterizada por un diámetro menor, aunque comparable, la conductancia corresponde a la de un diafragma:

$$C_e = C_A / [1 - (A/A_0)]$$

donde $A_0 > A$ son las secciones de las regiones en contacto. Cuando $A = 0.5 A_0$, $C_e = 2 C_A$ (efecto diafragma). Este caso se presentará a menudo dentro de nuestros inyectores.

Para el caso de ductos con sección rectangular variable:

$$C_r = \frac{C_d \cdot C_a}{C_d + C_a} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{19.4 \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}}{\int_0^l \frac{H \cdot dl}{K' \cdot A^2}} \quad C_a = 3.64 \cdot \frac{T}{M} \cdot A$$

$$K' = \frac{3 \cdot (l+r)}{8 \cdot r^2} \cdot \left[r \cdot \ln(r + \sqrt{1+r^2}) + r^2 \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1+r^2}}{r} + \frac{1}{3} \cdot (1+r^3 - (1+r^2)^{3/2}) \right]$$

$$r = \frac{b}{a} \leq 1$$

Donde:

A, H, l: sección, perímetro y longitud del ducto

d, a, b: diámetro ó dimensiones del ducto

T, M: temperatura y masa del gas

Neutralización

Los campos magnéticos que confinan el plasma hacen inviable la posibilidad de inyectar partículas cargadas en una máquina de fusión. Por tanto y a pesar de que ello supone una pérdida importante de potencia, el haz iónico extraído de la fuente ha de ser neutralizado con anterioridad.

La neutralización se consigue haciendo que los iones atraviesen un volumen de gas neutro relativamente denso en el que se producen reacciones de intercambio de carga entre los iones rápidos y los neutros fríos. Sin embargo, en su recorrido por la cámara de gas, un mismo átomo ser nuevamente ionizado. Por lo tanto, el porcentaje final de átomos neutralizados vendrá dado en función de las secciones eficaces de ambas reacciones.

$$f_n = \frac{\sigma_{10}}{\sigma_{10} + \sigma_{01}} \cdot [1 - \exp(-t_n \cdot (\sigma_{01} + \sigma_{10}))] \quad (5)$$

$$t_n = \frac{9.63 \cdot 10^{15} \cdot \bar{p} \cdot x}{T} \quad (6)$$

siendo:

σ_{10} = sección eficaz de neutralización

σ_{01} = sección eficaz de reionización

\bar{p} = presión media

T = temperatura del gas de neutralización

Nótese que aunque en la práctica el haz iónico es una mezcla de iones H^+ , H_2^+ y H_3^+ , (concretamente en nuestro caso de 80, 10 y 10% respectivamente), por simplicidad en los cálculos hemos supuesto secciones eficaces idénticas para las tres especies.

Además del flujo de gas inyectado de la fuente y del adicional introducido en el neutralizador, el espesor efectivo de neutralización (*target* de neutralización) depende de la conductancia del neutralizador. La forma geométrica de nuestro neutralizador es cilíndrica de sección constante, por tanto, la conductancia del mismo estará dada por la ecuación (3), hallándose la caída de presión que se produce a la salida sin más que dividir por la conductancia.

Pérdidas por reionización

En cuanto el haz abandona el neutralizador y hasta que alcanza el plasma, los neutros pueden sufrir reionizaciones por choque con átomos del gas residual .

La anchura del *target* de reionización para el gas residual viene dado por la ecuación (6) asumiéndose para el cálculo, que la presión para cada una de las diferentes zonas del inyector es constante a lo largo de la línea del haz.

Divergencia

A la salida de la región de aceleración, los iones presentan una componente perpendicular de velocidad , de modo que cada uno de los pequeños haces que componen el haz total tiene una distribución angular de potencia alrededor de su eje que puede representarse por una gaussiana. Se llama divergencia al ángulo que corresponde a la densidad de potencia igual a 1/e el valor máximo.

El haz total es la suma de todos los pequeños haces que convergen hacia el foco, y puede demostrarse que en dicho foco (y sólo en él), la distribución de potencia del haz total es también gaussiana.

Evidentemente, cuanto mayor divergencia muestre el haz, mas proporción de éste será interceptada en el camino restándole potencia inyectada al plasma. Sin embargo y aunque es factible ajustar los parámetros de la fuente de forma tal [1] que se obtengan haces de divergencias notablemente pequeñas, este hecho siempre conlleva un grave deterioro de la corriente iónica extraída por lo que se precisa llegar a un compromiso entre ambas magnitudes. En nuestro sistema hemos considerado tolerable una divergencia de 1.3° con corrientes de 100 A.

Pérdidas geométricas

Entrada y salida del neutralizador, bordes del deflector magnético, *defining plates*, *shutter*, garganta de entrada, etc. representan, además de la función concreta asignada, una sucesión de obstáculos en el camino del haz que irán limando

paulatinamente los contornos mas externos de éste. La pérdida de potencia que este hecho supone es evaluada por distintos métodos:

- un código que modele el haz: DENSB
- medidas experimentales [7]
- una estimación aproximada:

$$f_g = \exp[-(\varphi / \varphi_e)^2] \cdot \frac{x}{l_b} \quad (7)$$

Donde:

φ : ángulo bajo el cual es vista la apertura desde la fuente

φ_e : divergencia 1/e

l_b : distancia a lo largo de la línea del haz desde la fuente a la apertura

x: distancia del borde del obstáculo al eje del haz

Nosotros hemos utilizado los resultados de DENSB para el ducto, resultados experimentales para el neutralizador, y la expresión (7) cuando la geometría exacta no es conocida o se carecen de resultados experimentales

Conviene aclarar que aunque la restricción del haz por algunos componentes del inyector es no deseada pero inevitable, como es el caso del neutralizador o del deflector magnético, tanto las *defining plates* como el *shutter* tienen como finalidad recortar intencionadamente el diámetro del haz, que de no ser así, acabaría incidiendo sobre estructuras menos convenientes o mas difícilmente recambiables, como por ejemplo la ventana de entrada o la propia bobina toroidal TF-1 del TJ-II. [2]

Efecto *Beaming*

El flujo de gas a la salida del neutralizador puede poseer una dirección preferencial debido al efecto *beaming* [4], en cuyo caso se produce un cambio en la forma de la distribución espacial del gas que influye sobre procesos tales como el paso a través de conductancias y la anchura del *target* de reionización.

En estas condiciones la distribución espacial del gas respecto a su eje central, puede ser simulada por $\cos^n \zeta$, con lo que la anchura del *target* para el flujo de gas con velocidad térmica viene dada por:

$$t_b = 7.5 \cdot 10^{17} \cdot Q \cdot \frac{M}{T^3} \int_{l_1}^{l_2} \frac{n+1}{A} \int_0^{\zeta_g} \cos^n \zeta \cdot \sin \zeta \cdot d\zeta \cdot dl \quad (8)$$

siendo:

$l_2 - l_1$: distancia a lo largo de la línea del haz

ζ_g : ángulo del perímetro del haz visto desde la salida del neutralizador

A: área del haz

T: temperatura del gas en el neutralizador

Desorción de gas

Todas aquellas partículas rápidas que han terminado abandonando el haz, bien sea por haber sufrido reionización, bien sea por haber sido interceptadas, golpean las paredes del inyector provocando la desorción de moléculas gaseosas inicialmente atrapadas en el material.

Como la longitud de pulso del haz nunca superará 500 ms en nuestro caso, las temperaturas alcanzadas por las superficies metálicas no superan los 300°C, de modo que la desorción de origen térmico puede ser despreciada en los cálculos.

Para el flujo de gas debido a desorción por impacto de iones procedentes de neutros reionizados, utilizaremos la expresión:

$$Q = 6.48 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot \gamma \cdot I_0 \cdot f_i \quad (9)$$

$$f_i = f_g + (1 - f_g) \cdot [1 - \exp(-(t_r + t_b) \cdot \sigma_{01})]$$

donde $I_0 f_i$ es la fracción reionizada del haz, γ es el coeficiente de desorción que puede variar entre 0-10 dependiendo sobre todo de la partícula incidente [8], pero que se suele tomar del orden de 0.5 para casos como el considerado, y T es la temperatura absoluta del gas desorbido (300 K).

El flujo de gas desorbido por impacto en la trampa iónica puede escribirse

$$Q_i = 6.48 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot \gamma \cdot I_i \quad (10)$$

donde I_i es la corriente de la partículas que llegan a la trampa iónica.

3. CODIGO OPTIMUS

3.1 Descripción general

El código OPTIMUS, desarrollado en el Instituto Max-Planck de Garching (Alemania) con la finalidad de optimizar el flujo de gas en el interior de un inyector de haces neutros, realiza un seguimiento completo de la línea del haz desde que es extraído de la fuente de iones, hasta que alcanza la cámara de vacío en la que intercepta al plasma.

Para ello, son dados como entrada al código (apéndice A.2.1) todos aquellos parámetros que definen la línea de inyección:

- Energía del haz, corriente iónica y composición de especies
- Flujo de gas en la fuente iónica y flujo de entrada de gas al neutralizador
- Dimensiones y forma geométrica de todos los componentes del inyector
- Porcentaje de pérdidas geométricas
- Velocidades de bombeo
- Caracterización de la pared respecto a la desorción de gas

Obteniéndose finalmente, tras un proceso iterativo (apéndice A.2.2) una descripción completa de:

- Potencia total inyectada en el toro
- Distribución de presiones a lo largo de toda la línea del haz
- Pérdidas en la neutralización
- Pérdidas de potencia debidas a obstaculizaciones parciales del haz por diversos componentes del inyector
- Pérdidas de potencia debidas a procesos de reionización
- Tasas de desorción en las paredes del inyector

Esta información resulta crucial no sólo para optimizar el sistema de calentamiento sino que también da idea de bajo qué regímenes está siendo operado el inyector. Así por ejemplo, puede predecirse y evitarse que pérdidas por reionización excesivas en el ducto de entrada provoquen efectos de *beam-blocking* ó que cargas térmicas superiores a las permitidas dañen componentes en el interior del inyector.

3.2. Método

Básicamente, OPTIMUS divide toda la línea de inyección en un número determinado de secciones sobre las que se resuelve un sistema de ecuaciones en el que se describe la variación temporal de la presión en función del balance de flujos positivos y negativos, es decir entrantes y salientes de cada sección.

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{V_i} \left[Q_i - p_i \cdot S_i + \sum_j C_{ij} \cdot (p_i - p_j) \right] \quad (11)$$

donde: t : tiempo

C_{ij} : conductancia entre los sectores i y j

p_i : presión en sector i

Q_i = flujo desorbido en sector i

S_i = velocidad de bombeo en sector i

La resolución de este sistema de ecuaciones ha de hacerse en situación estacionaria para lo cual o bien consideramos que el sistema ha alcanzado una situación estacionaria en la que la presión es constante con respecto al tiempo o bien realizamos un análisis temporal del sistema como una sucesión de estados estacionarios. En ambos casos el sistema de ecuaciones queda como sigue:

$$0 = \frac{1}{V_i} \left[Q_i - p_i \cdot S_i + \sum_j C_{ij} \cdot (p_i - p_j) \right] \quad (12)$$

Para resolver este sistema de ecuaciones en las presiones, han de conocerse las conductancias, velocidades de bombeo y flujos de gas en cada sección. Pero los flujos de gas incluyen tanto el flujo inyectado desde el exterior como el flujo desorbido, el cual depende a su vez de la presión en dicha sección. De modo que el sistema de ecuaciones se resuelve de modo iterativo (Apéndice A.1) con los pasos siguientes:

-Tras el cálculo de conductancias, OPTIMUS comienza determinando una primera distribución de presiones (de acuerdo a la ec.10) y pérdidas geométricas pero sin tener en cuenta la existencia de flujos desorbidos por las paredes del inyector.

-Dada esta distribución inicial, se evalúan las tasas de pérdidas por neutralización y reionización (que evidentemente dependen de la presión) y con ellas, más las geométricas, el flujo de desorción que provocan y la potencia total que bajo estas condiciones llega a ser inyectada.

-Como evidentemente este flujo desorbido hace que se incrementen los niveles de presión, el código vuelve a evaluar la distribución de presiones en el sistema, pero esta vez considerando los flujos desorbidos que han sido calculados.

- Finalmente, con esta nueva distribución el código vuelve a calcular las tasas de perdidas y el flujo desorbido iterativamente hasta alcanzar convergencia en el resultado de potencia total inyectada.

3.3. Modelo geométrico utilizado

En el código OPTIMUS se divide la línea de inyección esencialmente en una ó varias fuentes de iones con sus correspondientes neutralizadores independientes, dos cámaras de vacío separadas por un diafragma y una garganta de entrada al toro.

La figura.3.1. muestra el esquema concreto seguido en nuestro caso, en el cual se ha diferenciado en la línea de inyección los siguientes sectores:

<u>Sector</u>	<u>Zona</u>	<u>Componentes que incluye</u>	<u>Longitud</u>
sector 1	Fuente	Fuente de iones	-----
sector 2	Cajón principal	Neutralizador	140 cm
sector 3	Cajón principal	-----	10 cm
sector 4	Cajón principal	Deflector magnético, trampa iónica	78 cm
sector 5	Cajón calorímetro	Defining plates, calorímetro	75 cm
sector 6	Conexión a TJ-II	Placas, Shutter, Válvula	87 cm
sector 7	Conexión a TJ-II	Bellow, Ducto	41 cm

Además, el programa contempla la posibilidad de considerar los sectores con un flujo bombeado al exterior. Nosotros suponemos bombeados los sectores 3 y 5

4. RESULTADOS

Dado que en nuestro caso tanto el inyector como la fuente de iones están ya definidos, los estudios con OPTIMUS se han centrado en la zona del ducto de conexión al TJ-II, y el sistema de bombeo.

Por otro lado, OPTIMUS nos permite optimizar el flujo de gas en la fuente y el neutralizador, de modo que la neutralización sea completa con pérdidas por reionización mínimas.

Se han realizado barridos en coeficientes de desorción y en exponentes de efecto “beaming” (mal conocidos experimentalmente) de modo que se facilite la interpretación de los datos calorimétricos cuando los haya.

Por último, OPTIMUS nos permite conocer la potencia inyectada en función del potencial de extracción, lo que será extremadamente útil a la hora de realizar experimentos con energías de inyección variables.

En cada uno de los casos analizados se optimiza un único parámetro manteniendo los demás alrededor de la zona óptima y suponiendo condiciones estacionarias en el sistema.

En el apartado 4.6.se agrupan todos los resultados parciales mostrando los parámetros finalmente adoptados para el sistema.

4.1. Variación de la velocidad de bombeo en el cajón del calorímetro

La particular geometría del TJ-II nos obliga a interponer en el camino del haz, justo a la salida del cajón del calorímetro, un diafragma de 20 cm de diámetro cuya misión es proteger la ventana de entrada y la primera bobina. Estudios de transmisión [DENS] muestran que una importante fracción del haz es interceptada allí, por lo que es de esperar una abundante desorción de gas y un potencial problema de bloqueo del haz.

Los inyectores originales no tenían capacidad de bombeo en el cajón del calorímetro, y dado que se van a sustituir las criobombas del cajón principal por bombas de titanio, conviene estudiar la conveniencia de poner bombas de este tipo también en la región de salida del haz. El poco espacio libre disponible permitiría

instalar dos bombas de 0.75 m de altura, y 60,000 l.s-1, una a cada lado del calorímetro.

Hemos estudiado con OPTIMUS la potencia perdida por reionización en la región del diafragma en función de la velocidad de bombeo instalada. Los resultados se muestran en la Tabla I.

Tabla I

Velocidad de bombeo Total (l/s)	Velocidad de bombeo Calorímetro (l/s)	Perdidas Geométricas Totales (%)	Perdidas Reionización Totales (%)	Potencia Inyectada (KW)
200,000	0	22.7	24.2	725
260,000	60,000	25.7	12.2	1083
320,000	120,000	26.3	10.0	1150
400,000	200,000	27.2	9.5	1174

Como se desprende de la tabla, es absolutamente necesario disponer en el cajón del calorímetro de bombas con velocidad de bombeo superior a 100,000 l.s-1, sin ellas las pérdidas por reionización son del 24 % y la potencia inyectada de sólo 725 kW, frente a un 10 % de pérdidas y 1150 kW inyectados con 120,000 l.s-1.

Por otro lado, las figuras 4.1.1 y 4.1.2 muestran cómo la limitación de espacio para bombas de vacío en esa zona no supone una gran desventaja, ya que tanto la presión como la potencia inyectada tienen una tendencia a la saturación por encima de 120,000 l.s-1.

4.2. Variación del flujo de gas en la fuente de iones y el neutralizador

El flujo de gas que es necesario inyectar en la fuente de iones para que la corriente de arco llegue al nivel requerido (1400 A) por la corriente de haz (100A), viene determinado por la eficiencia de gas de la fuente, que en nuestro caso es del 35 % [7].

Esto significa que el cociente entre la cantidad equivalente de gas que sale de la fuente como corriente del haz, y el flujo de entrada de gas a la fuente, es de 0.35.

En condiciones nominales, pues, el flujo de gas en la fuente ha de estar al menos alrededor de 30 Torr.l.s-1. Debe aclararse que el código OPTIMUS requiere como dato de entrada el flujo de gas que entra en el sistema en vez del flujo de gas que entra en la fuente, es decir, en condiciones nominales al menos 20 Torr.l.s-1 ya que aproximadamente son unos 10 torr l/s la cantidad equivalente de gas convertida en haz de iones rápidos.

En nuestro sistema existen dos entradas de gas: la fuente de iones y el neutralizador, y podemos estudiar con OPTIMUS la mejor combinación de flujos en ambas entradas, que será aquella que consiga simultáneamente que la presión en la fuente de iones sea la requerida, la eficiencia de neutralización llegue a la saturación, y las pérdidas por reionización sean mínimas.

Las figuras 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 muestran respectivamente la potencia entrante en el toro, la eficiencia de neutralización para la especie mono-atómica del haz y las pérdidas totales de reionización en función del flujo de entrada en el neutralizador para tres valores diferentes de flujo de entrada en la fuente.

Puede observarse que al inyectar 30 Torr.l.s-1 en la fuente introduciendo 5 Torr.l.s-1 más en el neutralizador, se obtiene un valor similar de potencia inyectada en el toro y levemente inferior de eficacia de neutralización que en el caso de introducir gas únicamente en la fuente a razón de 40 Torr.l.s-1.

En ambos casos la potencia inyectada es máxima, sin embargo las pérdidas de potencia por reionización se reducen casi en un 2 % y la entrada total de gas en el sistema en 5Torr.l.s-1 (12.5%), disminuyendo además los niveles de presión en el sistema.

4.3. Efecto *beaming*

El flujo de gas a la salida del neutralizador puede tener una dirección preferente debido al efecto *beaming*. Esto da lugar a un aumento del *target* de reionización a la salida del neutralizador de acuerdo con la expresión (8), y, como se puede apreciar en la figura 4.3.2. a un incremento de las pérdidas totales de reionización que pasan del 10 % para $n=0$ al 15 % para valores de n por encima de 15.

La potencia total inyectada tiene en consecuencia un comportamiento decreciente en función del exponente de la distribución cosenoidal, como aparece en la figura 4.3.1. Finalmente, en la figura 4.3.3 se muestran las pérdidas por reinización en los diferentes sectores. Es claro que el efecto *beaming* afecta especialmente al sector 4.

4.4. Variación de flujo desorbido

El cálculo de la cantidad de flujo desorbido se realiza dando al código el número de partículas desorbidas por partícula incidente (coeficiente γ de las expresiones (9) y (10)). Se ha estudiado el efecto de la variación de este coeficiente entre 0.5 y 1.5.

Conviene señalar que por simplicidad no se han distinguido unas zonas de otras en el inyector, es decir, suponemos que en todos los sectores de la línea de inyección, incluida la trampa iónica, presentan las mismas condiciones y por tanto el mismo coeficiente de desorción.

El aumento del número de partículas desorbidas por partícula incidente supone, a grandes rasgos, un incremento en la presión del sistema que induce más reacciones de reionización entre el haz y el gas residual y por tanto mayores pérdidas por reionización que terminan por atenuar la potencia total inyectada en el toro. Estas tendencias son mostradas respectivamente en las figuras 4.4.1, 4.4.2. y 4.4.3.

Los resultados obtenidos para los dos casos extremos y el de referencia son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla II

	Perdidas Reionización (%)	Pérdidas Geométricas (%)	Potencia Inyectada (KW)
Coeficiente=0.5	7.6	26.8	1235
Coeficiente=1.0	10.0	26.3	1150
Coeficiente=1.5	13.3	25.6	1047

En resumen, los resultados obtenidos muestran que con el suficiente acondicionamiento de las paredes del inyector, de forma que los coeficientes de desorción no superen excesivamente la unidad, la operación del inyector se mantiene en condiciones aceptables.

4.5. Variación del potencial de aceleración

En los experimentos de inyección en el TJ-II se contempla variar la energía del haz en el rango 30-40 keV para optimizar la absorción en plasmas de diferentes densidades.

Para calcular con OPTIMUS la potencia del haz inyectado en función de la energía, ha de tenerse en cuenta que para cada potencial de aceleración V existe una corriente de haz óptima I que viene dada por

$$I = \chi \cdot V^{3/2}$$

I es el valor de la corriente que optimiza las propiedades ópticas del haz, es decir, que minimiza la divergencia, y χ es una constante que depende de las características geométricas del sistema de extracción-aceleración y de la masa del ion.

En la figura 4.5.1 se representa la potencia total inyectada en función de la energía. Esta potencia decrece para bajas energías, a pesar de la mejor eficiencia de neutralización, debido a que la potencia extraída de la fuente es menor.

La figura 4.5.2 muestra los distintos porcentajes de pérdidas en función de la energía. Las pérdidas de neutralización y reionización aumentan con la energía del haz. Las pérdidas geométricas disminuyen, pero es debido a una menor potencia de haz disponible debido a las pérdidas anteriores.

A 40 Kev disponemos de 4000 KW a la salida de la fuente, de los cuales el 4.5% (183 kW) se pierden en las rejillas de la fuente, el 30.3% (1212 KW) no llegan a ser neutralizados, un 26.3% (1050 KW) quedan interceptados a lo largo del inyector y un 10% (400 KW) sufren reionización.

Por tanto, con un potencial de 40 Kev disponemos de una potencia total inyectada de 1150 KW.

4.6. Caso optimizado

El siguiente esquema muestra los resultados mas destacados del sistema de inyección una vez optimizado, apareciendo como primer punto del esquema un pequeño listado con los parámetros mas relevantes del inyector.

a) Datos de entrada

Numero de fuentes: 1

Diámetro fuente :30 cm

Energía de haz: 40 kV

Mezcla energética: 80% de H⁺, 10% de H²⁺ y 10% de H³⁺

Intensidad de corriente: 100 A

Flujo de entrada al sistema: 34 Torr.l/s

Temperatura del sistema: 300K

Estado del sistema: estacionario

Efecto *beaming* : ausente

Velocidad de bombeo: 200.000 l/s- cajón principal, 120.000 l/s- cajón del calorímetro

Coefficientes de desorción: todos =1

b) Distribución de pérdidas de potencia y potencia transmitida a lo largo del inyector

- *Potencia de la fuente: 4,000 kW*

Pérdidas geométricas en las rejillas de la fuente: 183 kW

- *Potencia extraída: 3,820 kW*

Pérdidas neutralización: 1210 kW

Pérdidas geométricas en el neutralizador: 300 kW

- *Potencia a la salida del neutralizador: 2,310 kW*

Pérdidas geométricas en el interior de los cajones del inyector: 155 kW

Pérdidas por reionización el interior de los cajones del inyector: 270 kW

- *Potencia a la salida del cajón del calorímetro: 1,885 kW*

Pérdidas geométricas en la zona de conexión (shutter+ ducto): 600 kW

Pérdidas de reionización en la zona de conexión: 135 kW

- *Potencia total inyectada en la cámara del TJ-II: 1,150 kW*

5. CONCLUSIONES

La correcta optimización de un sistema de calentamiento por inyección de haces neutros exige un seguimiento completo de la línea de inyección desde que los iones son extraídos hasta que alcanzan la cámara de la máquina de fusión.

Para TJ-II solo ha sido necesario ajustar los rangos de operación de los flujos de gas y las velocidades de bombeo puesto que el sistema ya estaba optimizado en su generalidad y la adaptación de los inyectores a nuestra máquina no ha requerido cambios importantes de diseño.

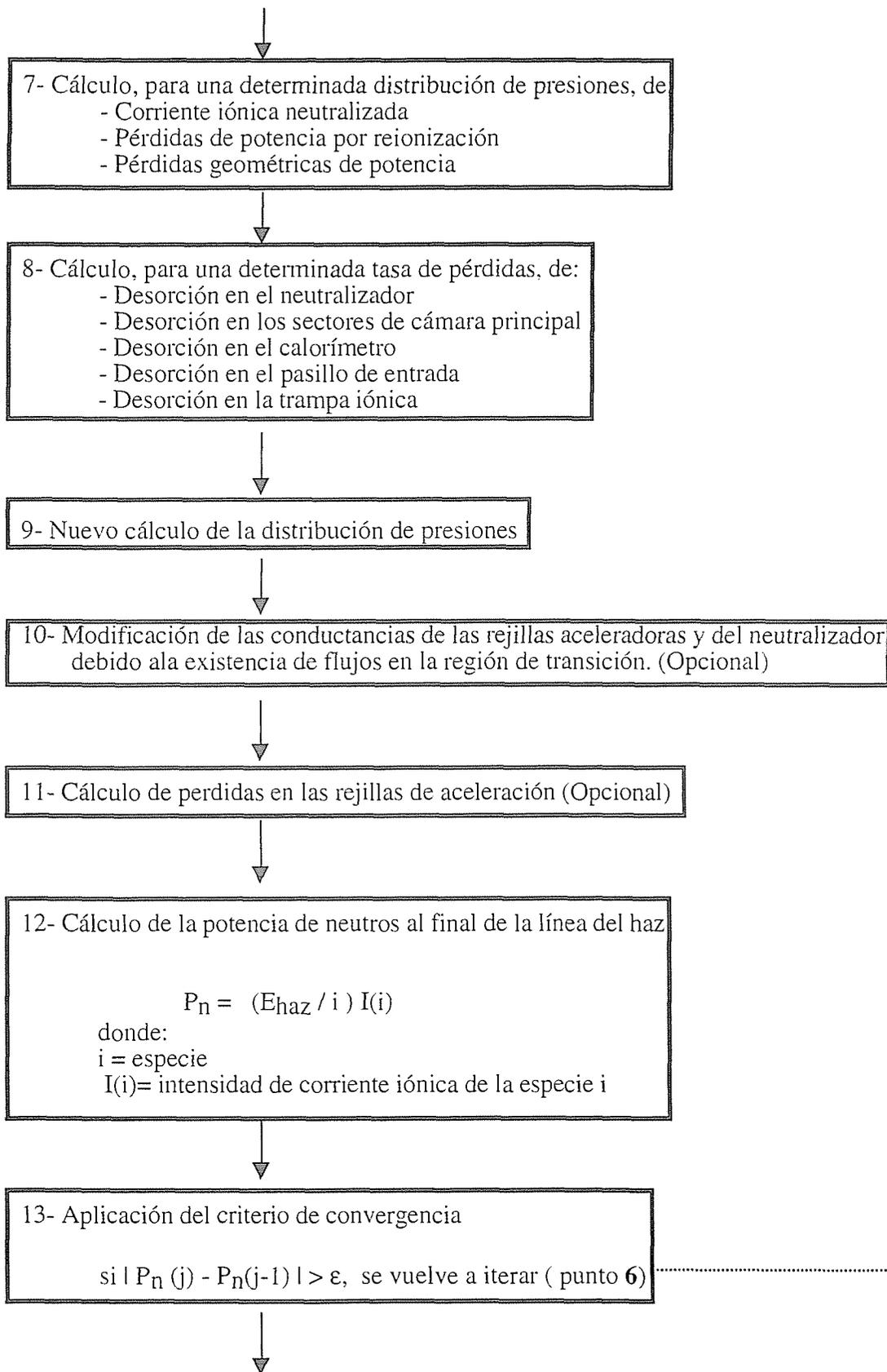
Los cálculos necesarios han sido realizados con el código OPTIMUS, obteniéndose los siguientes resultados:

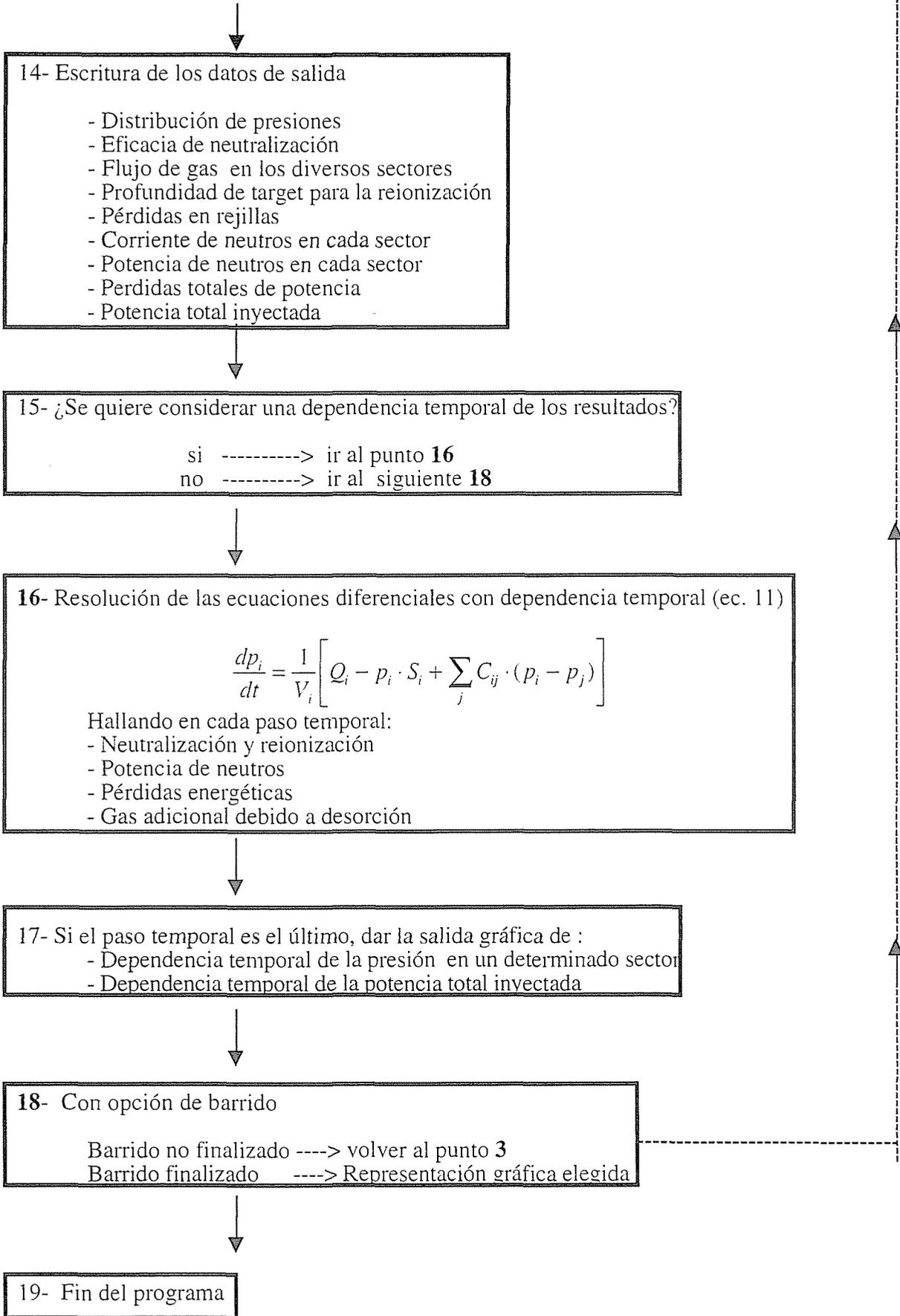
Se ha demostrado la necesidad de un sistema de bombeo independiente para el cajón del calorímetro, estimándose en 120.000 l/s la velocidad óptima.

Se ha comprobado que la eficacia del sistema no se ve gravemente deteriorada al considerar un hipotético efecto beaming.

Así mismo, se ha comprobado también que con un acondicionamiento apropiado de las paredes del inyector, de forma que los coeficientes de desorción no superen excesivamente la unidad, la operación del inyector se mantiene en condiciones óptimas.

El sistema ya optimizado proporciona 4000 kW de potencia a 40 keV, de los cuales un 30.2% no llega a ser neutralizado, un 26.4% queda interceptado por el camino y un 10.1% vuelve a ser ionizado inyectándose finalmente en la cámara de vacío del TJ-II 1150 kW. A 30 keV la potencia inyectada es de unos 600 kW.





Apéndice 2. Estructura de ficheros utilizados

A2.1. Datos de entrada

Se introducen mediante un *namelist* de nombre "newdat" contenido en el fichero "fort.11". Los datos por defecto se encuentran en un *Block Data* (ver apéndice A.2.4)

Los parámetros que contiene son:

Datos generales:

NR= Número de segmentos incluyendo la cámara del TJ-II
NI= Número de segmentos que necesitan cálculo de conductancias
NS= Numero de iteraciones
NT= Número de intervalos temporales en el caso de considerar condiciones no estacionarias
IVIE= Números de puntos por curva
IV2E= numero de curvas (a diversas temperaturas)

Fuente:

NG= Numero de rejillas
NGS= Forma geométrica de las rejillas (1=circular, 2= cuadrada)
NGT= Cambio de conductancias en las rejillas (1=no, 2=si)
NGL= Pérdidas de potencia en rejillas (1=no, 2=si)
NF= Forma geométrica de la fuente (1= cuadrada, 2= circular)
NQ= Número de fuentes
XQ, YQ= dimensiones fuente
EBEAM= Potencial de extracción
CURNT= Corriente extraída
F1= Proporción de especie 1
F2= Proporción de especie 2
F3= Proporción de especie 3
Gmas = Masa molecular del gas
MA= Masa atómica para secciones eficaces
QE= flujo de extracción
Temp= temperatura
TRANS=Transparencia de la fuente.
DL= Diámetro de las aperturas de los electrodos
GL= grosor de los electrodos
DIS= Distancia entre rejillas
U(i)= potencial al que está cada rejilla

Datos neutralizador:

NNI= Número de sectores que lo compone
NNS= Forma geométrica del sector (1= cúbica, 2= cilíndrica)
XAN, YAN= Dimensiones sección de entrada
XEN, YEN= Dimensiones sección de salida
ZNL= Longitud
AM= Función peso para el cálculo de la neutralización
Temp= Temperatura
QE= flujo de entrada al neutralizador

Datos diafragmas

NDI= Número de diafragmas
NDS= Forma geométrica
XAB, YAB= Dimensiones sección de entrada
XEB, YEB= Dimensiones sección de salida
ZBL= Longitud

Datos zona de conexión:

NPI= Número de sectores
NPS= Forma geométrica
XAP, YAP= Dimensiones sección de entrada
XEP, YEP= Dimensiones sección de salida
ZPL= Longitud

Datos para el efecto Beaming:

MOD= (1= incluido, 2= ausente)
NB= Exponente para ecuación de efecto *beaming*

Otros parámetros:

V= volumen de cada sector
SL= longitud de cada sector
S= velocidad de bombeo
DN= Coeficiente de desorción en cada sector
DB= Coeficiente de desorción para trampa iónica
FG= Coeficiente de pérdidas geométricas para cada sector

A.2..2. Fichero de Salida

Este fichero se presenta un primer listado con los parámetros de entrada considerados y posteriormente un listado de resultados que incluye las siguientes variables:

TJ= Número de iteraciones necesarias para alcanzar convergencia

FN(i)= Eficacia de neutralización para cada especie

Tabla de distribución de presiones y flujos. Compuesta por:

Chamb=Número de sector

BN= Presión

DQ= Flujo de gas desorbido

QC= Flujo de gas a través de conductancias

QP= Flujo de gas bombeado

VDD= anchura target de reionización

VDB= anchura target efecto beaming

Tabla de distribución de potencia

I= Número de sector

ENJ= potencia a la salida de cada sector

Tablas de distribución de corriente de neutros para cada especie

SI= Corriente de neutros a la salida de cada sector

SIR=Corriente de neutros perdida por reionización en cada sector

SIG= Corriente de neutros perdida por la geometría de cada sector

Tabla de Distribución de pérdidas de potencia

I= Número de sector

ELR= Pérdidas de potencia por reionización en cada sector

ELG= Pérdidas geométricas de potencia en cada sector

EN= Potencia total inyectada

EFF= Eficacia total

PER= Porcentaje de potencia inyectada para cada especie

Todas las variables mencionadas vienen dadas para un conjunto concreto de parámetros de entrada, de forma, que en el caso de realizarse un barrido en alguno de éstos, el contenido del fichero se repite consecutivamente para cada punto del barrido.

A.2.3 Namelist y Block Data del código OPTIMUS

a) Ejemplo del *namelist* (archivo fort.11)

correspondiente a un caso de &.4.4

```
Snewdat
  mod=2,
  dn(2)=1.5,
  dn(3)=1.5,
  dn(4)=1.5,
  dn(5)=1.5,
  dn(6)=1.5,
  dn(7)=1.5,
  db(4)=1.5,
Send
```

b) *Block Data* (valores por defecto)

```
C NUMBER OF INCLUDED ROOMS AND OPTIONS
C
DATA NR,NI/ 8,7/,NS/1/,NZ/20/,NT/2/,IV1E/30/,IV2E/3/
C
C DATA FOR THE IONSOURCE AND GRIDSTRUCTURE
C
  DATA NG/3/,NGS/1/,NGT/1/,NGL/1/,NF/2/
  DATA NQ/1/,XQ/30.0/,V(1)/17.0/,EBEAM/40.00/,CURNT/100.0/
  DATA F1/0.80/,F2/0.15/,GMASS/1.0/,MA/1/,QE(1)/34.0/,TEMP(1)/300./
  DATA TRANS/0.440/
  DATA DL/0.44,0.44,0.44/
  DATA GL/0.30,0.30,0.30/
  DATA DIS/0.0,0.70,0.20/
  DATA U/0.00,41.5,40.0/
C
C DATA FOR THE NEUTRALIZER
C
  DATA NNI/1/,NNS/2/
  DATA XAN(1)/28.0/,XEN(1)/28.0/
  DATA ZNL(1)/140.0/
  DATA AM(2)/1.0/,TEMP(2)/300./
C
C DATA FOR THE DIAPHRAGMS
C
```

```

DATA NDI/2/,NDS/1,1/
DATA XAB(1)/30.0/,YAB(1)/64.0/,XEB(1)/30.0/,YEB(1)/64.0/
DATA XAB(2)/28.0/,YAB(2)/28.0/,XEB(2)/28.0/,YEB(2)/28.0/
DATA ZDL(1)/72.0/,ZDL(2)/8.0/
C
C DATA FOR THE PORTHOLE
C
DATA NPI/2/,NPS/2,1/
DATA XAP(1)/30.0/
DATA XAP(2)/17.0/,YAP(2)/24.0/,XEP(2)/17.0/,YEP(2)/24.0/
DATA ZPL(1)/87.0/,ZPL(2)/41.0/
C
C DATA FOR THE BEAMING
C
DATA MOD/2/,NB/1/
C
C LENGTHS OF THE SEGMENTS ALONG THE BEAM NOT YET CALCULATED
C
DATA SL(3)/10.00/,SL(4)/78.00/,SL(5)/75.0/
C
C PUMPING SPEEDS
C
DATA S(3)/2.00E+05/,S(5)/1.20E+05/,S(8)/1.0E+08/
C
C DESORPTION
C
DATA DN(2)/1.0/,DN(3)/1.0/,DN(4)/1.0/,DN(5)/1.0/,DN(6)/1.0/
DATA DN(7)/1.0/
DATA DB(4)/1.0/
C
C GEOMETRICAL LOSSES
C
DATA FG(2)/0.073/,FG(3)/0.01/,FG(4)/0.021/,FG(5)/0.037/
DATA FG(6)/0.226/,FG(7)/0.09/
C
C
END

```

Apéndice 3.. Utilización del código OPTIMUS

El código se encuentra instalado en la CRAY-J916 del CIEMAT en el directorio de uso público /fusion/publica/nbi.dir. En lo que sigue supondremos que la variable \$pb señala ese directorio.

La ejecución del código se efectúa mediante la sentencia

```
$pb/optimusal.out
```

Como ya hemos mencionado anteriormente, se accede a los parámetros de entrada mediante el *namelist* "newdat" contenido en el fichero "fort.11"

Con estos datos el programa calcula la potencia total inyectada, distribución de presiones etc., que son escritas en el fichero optimus.dat, utilizando tan solo unos 32.2 s de CPU el caso de una CRAY-J916 con 16 procesadores.

Las salidas gráficas son dadas solo en el caso de considerar que estamos en condiciones no estacionarias o en el caso de barridos de algún parámetro de entrada. Lo primero viene dado como dato de entrada y lo segundo es elegido interactivamente al inicio de la ejecución con la opción cero respecto a la pregunta de que se desea representar (apéndice A.3.1)

En el caso de querer representar algunas de las variables para las que el código está preparado (potencia inyectada, presión, pérdidas por reionización o neutralización o pérdidas geométricas) en función de un parámetro de entrada, se pregunta respecto a que parámetro de entrada se desea realizar el barrido y se da a elegir entre diversas posibilidades preguntando posteriormente los límites correspondientes

Conviene notar que en el caso, en que cualquiera de las variables a representar sean dependientes del sector, el código pregunta inmediatamente el número del sector a considerar.

Apéndice 3.1. Ejemplo de ejecución del código OPTIMUS

J90> **optimusa1.out** -----> *sentencia de ejecución*

QUE QUIERES REPRESENTAR:

- 0- Nada
- 1- Potencia de neutros
- 2- Presión
- 3- Perdidas por reionización
- 4- Perdidas geométricas

1 -----> *se representa la potencia inyectada*

FRENTE A QUE VARIABLE:

- 1- Voltaje de extracción(20 -100)KV
- 2- Corriente extraída (20-100)A
- 3- Flujo de entrada (5-50) l/sec.
- 4 -Exponente efecto beaming (1)
- 5- Mezcla de especies (0-1)
- 6- Longitud del netralizador (20-100) cm
- 7- Longitud parte 3 del port-hole (25-100) cm
- 8- Velocidad de bombeo (E+04-E+08) l/sec.
- 9- Coeficiente de desorcion (0-1)
- 10- Coeficiente perdidas geométricas(0.01-0.2)
- 11- Constante de Stewart (0.001-0.01)

8 -----> *el barrido se realiza respecto a la velocidad de bombeo*

En que segmento

3 -----> *la variación se realiza en el sector 3 (cajón principal)*

Dar limites: Xmin, Xmax

100000,200000 -----> *limites entre los que realizamos el barrido*

Representación gráfica

QUIERES REPRESENTAR OTRA ORDENADA? s/n

n -----> *no se procede a otra representación . El programa finaliza*

REFERENCIAS

- [1]. M.Garcia, M.Liniers, J.Guasp. "Aplicación del código SLAC al estudio de sistemas de extracción de iones para Inyectores Neutros". Informe CIEMAT 820. Febrero 1987
- [2]. J. Guasp, C.Fuentes, M.Liniers. "Calculo de cargas térmicas en la cámara de vacío del TJ-II durante la inyección de Haces Neutros". Informe CIEMAT-797. Mayo 1996
- [3]. J.Guasp, M.Liniers. "Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II". Informe CIEMAT-761. Septiembre 1995.
- [4]. B.Dayton, Trans. 3 AVS Nat. Vac. Vamp.5, 1996.
- [5]. J.-H. Feist. "A computer program for parameter studies of Neutral Injection Beam Line". Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. D-8046 Garching, Germany.
- [6]. W.F.Brunner, T.H.Batzer. "Practical Vacuum Techniques". New York, Reinhold Pub.Corp. (1965).
- [7]. W.L. Gardner, et al, "Properties of an intense 50- kV neutral-beam injection system", Rev. Sci. Instrum. 53(4), 424 (1982)
- [8]. G.M. Cracken, P.E. Stott. Nuclear Fusion, Vol. 19, No 7, pag. 889 (1979).

LISTA DE FIGURAS

&.2.

Fig.2.1 Vista en planta de los inyectores y el TJ-II.

Fig.2.2 Vista en planta y lateral de uno de los inyectores de Haces Neutros.

Fig.2.3 Esquema de una fuente de iones DuoPiGatron.

Fig.2.4 Esquema de una bomba de titanio.

Fig.2.5 Esquema de la zona de conexión.

&.3.

Fig.3.1 Esquema del modelo geométrico utilizado en OPTIMUS.

&.4.1.

Fig.4.1.1 Dependencia con la velocidad de bombeo del cajón del calorímetro de la potencia inyectada en el toro.

Fig.4.1.2 Dependencia con la velocidad de bombeo del cajón del calorímetro de la presión en el sector 5 del esquema de inyección.

&.4.2.

Fig.4.2.1 Dependencia con la inyección de gas en el neutralizador, de la potencia inyectada en el toro para tres valores de flujo en la fuente de iones.

Fig.4.2.2 Dependencia con la inyección de gas en el neutralizador, de la eficacia de neutralización para la especie mono-atómica del haz para tres valores de flujo en la fuente de iones.

Fig.4.2.3 Dependencia con la inyección de gas en el neutralizador, de la potencia total perdida por reionización para tres valores de flujo en la fuente de iones.

&.4.3.

Fig.4.3.1. Efecto sobre la potencia total inyectada en el TJ-II al considerar que se produce efecto *beaming* e ir variando el exponente con el que se caracteriza la distribución del haz.

Fig.4.3.2 Efecto sobre el porcentaje de pérdidas por reionización al considerar que se produce efecto *beaming* e ir variando el exponente con el que se caracteriza la distribución del haz.

Fig.4.3.3 Pérdidas por reionización en cada sector del inyector al variar el exponente del efecto *beaming*.

&.4.4.

Fig.4.4.1 Efecto de los coeficientes de desorción sobre la potencia total inyectada

Fig.4.4.2 Efecto de los coeficientes de desorción sobre las pérdidas por reionización en el sector 3.

Fig.4.4.3 Efecto de los coeficientes de desorción sobre la presión en el sector 3

&.4.5.

Fig.4.5.1 Potencia total inyectada en función del potencial de extracción

Fig.4.5.2 Porcentaje de pérdidas por reionización, geométricas y neutralización en función del potencial de extracción

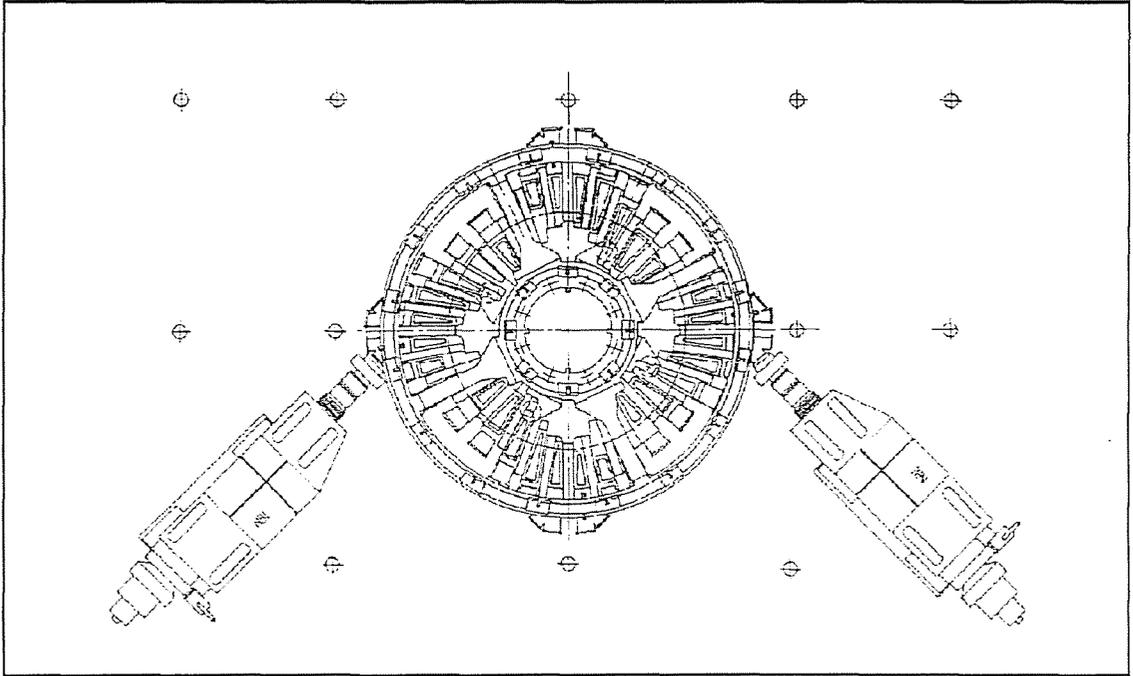


Fig.2.1

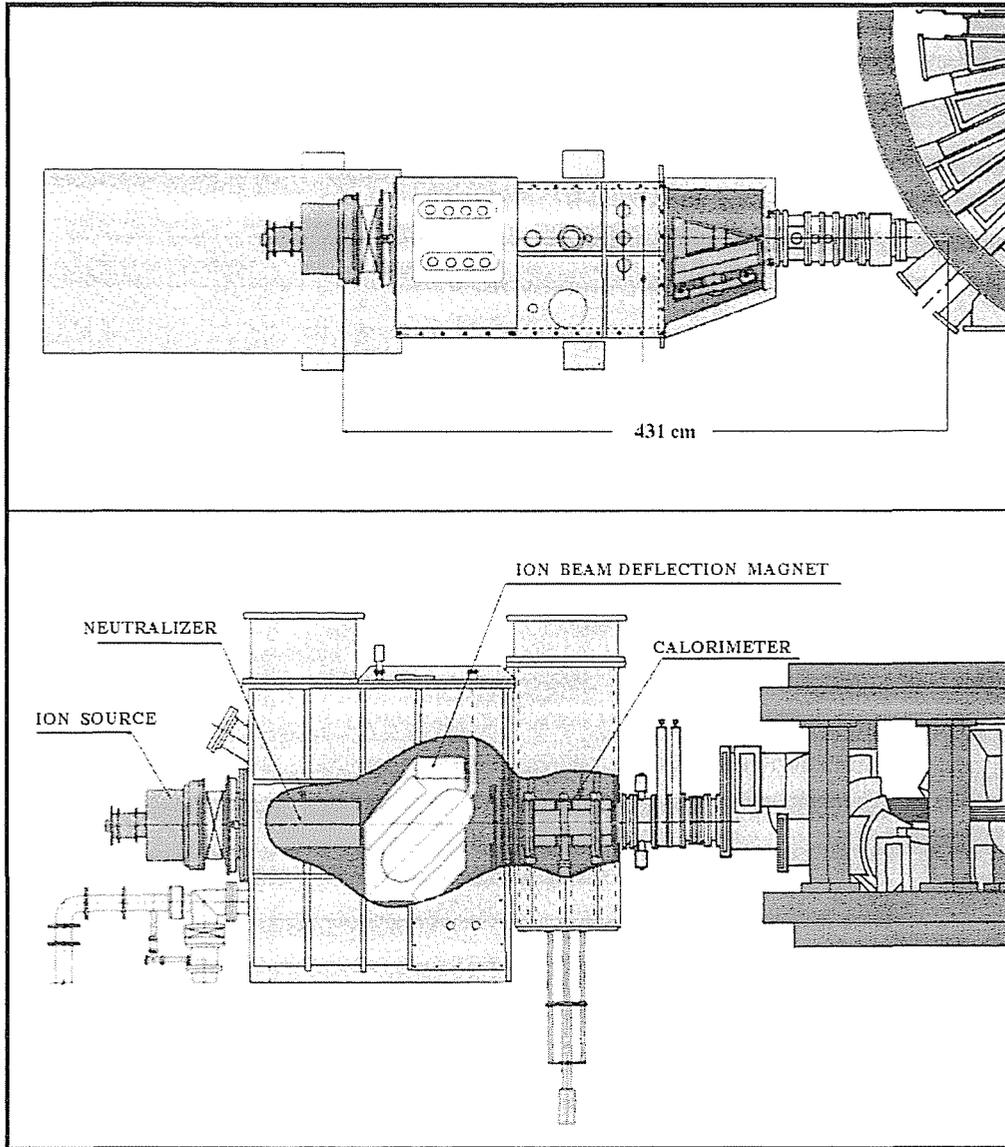


Fig.2.2.

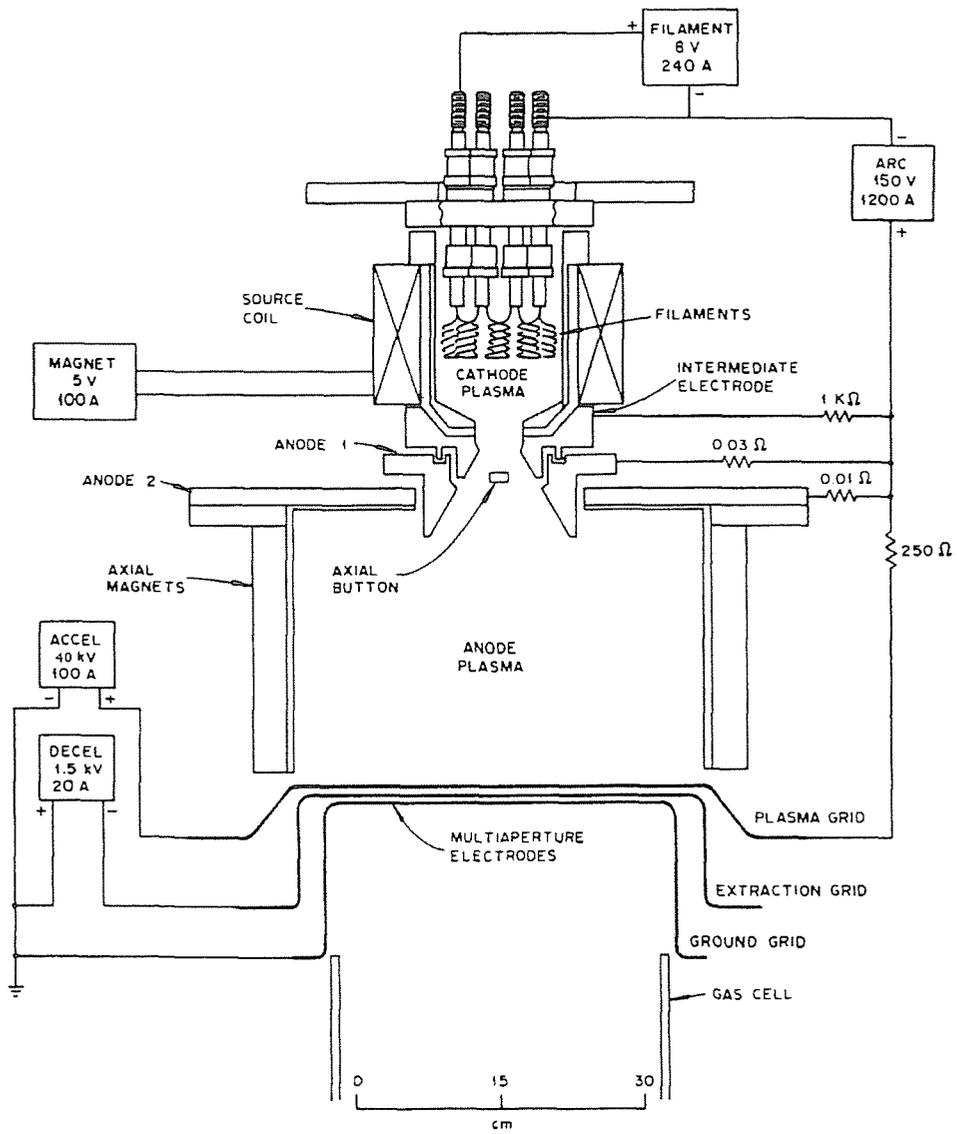


Fig.2.3.

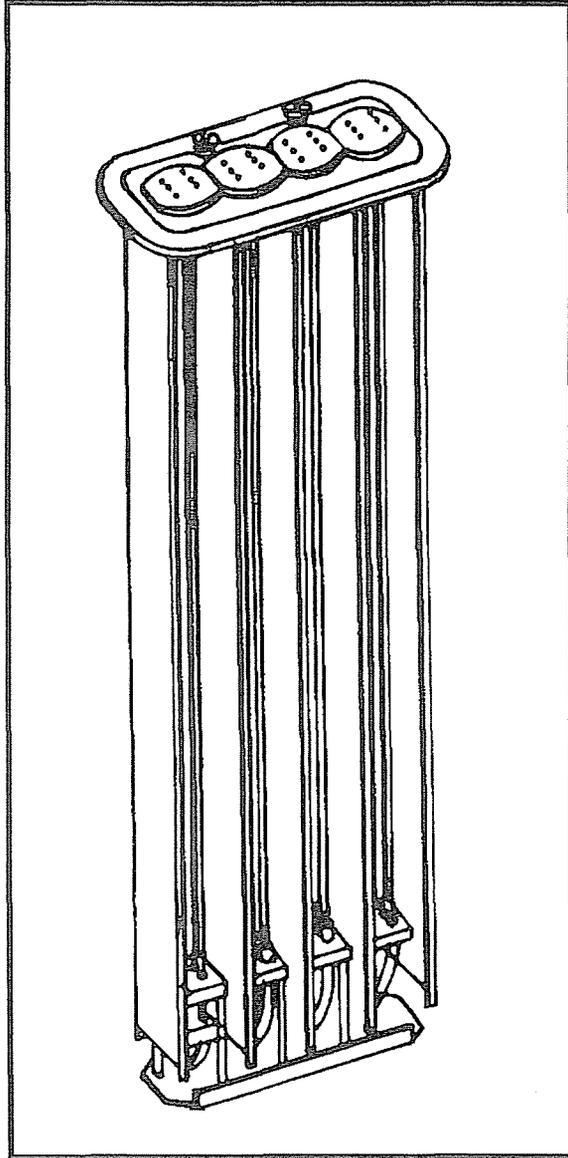


Fig.2.4.

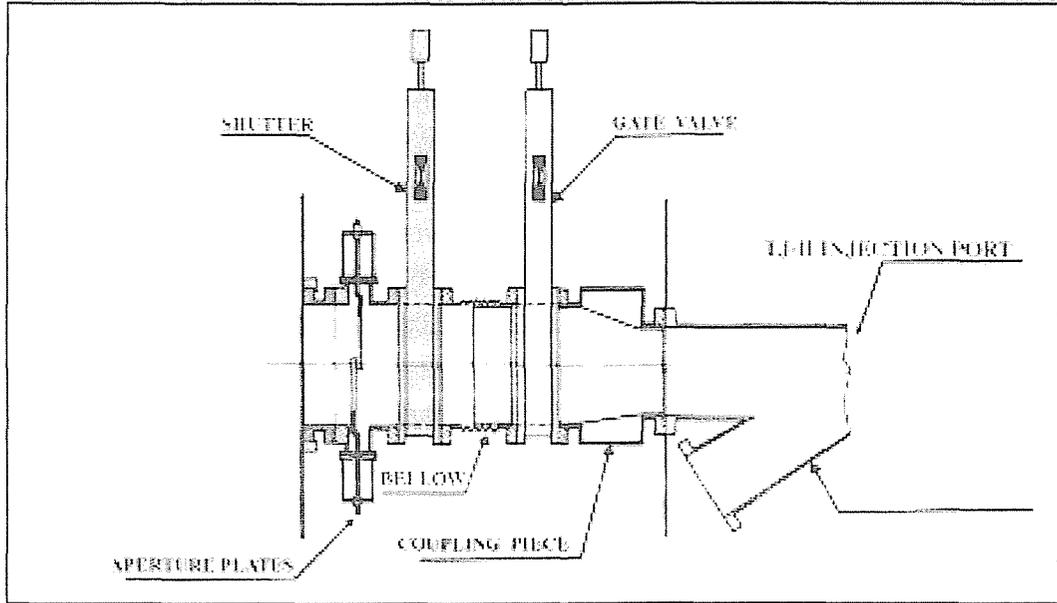


Fig.2.5.

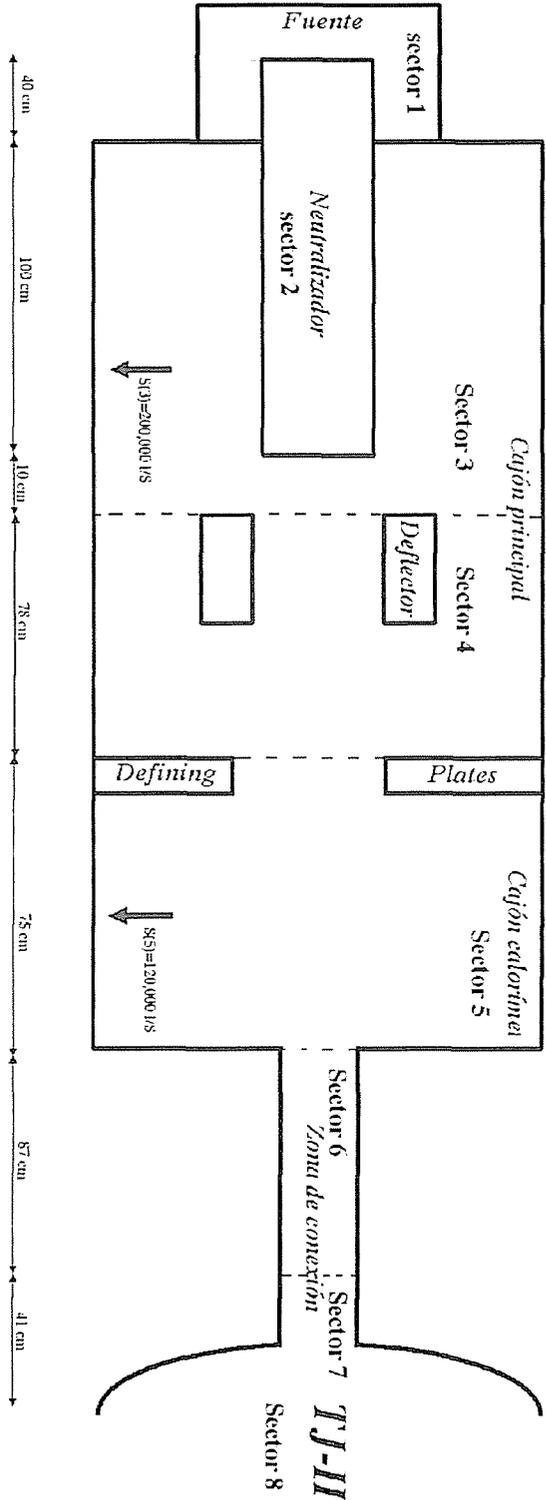


Fig.3.1

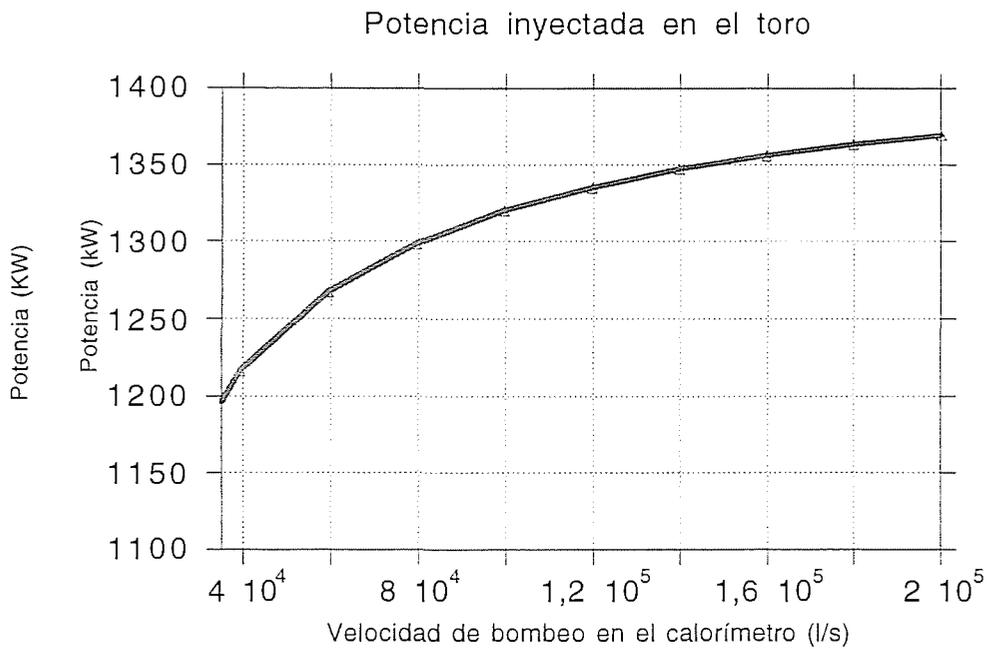


Fig.4.1.1

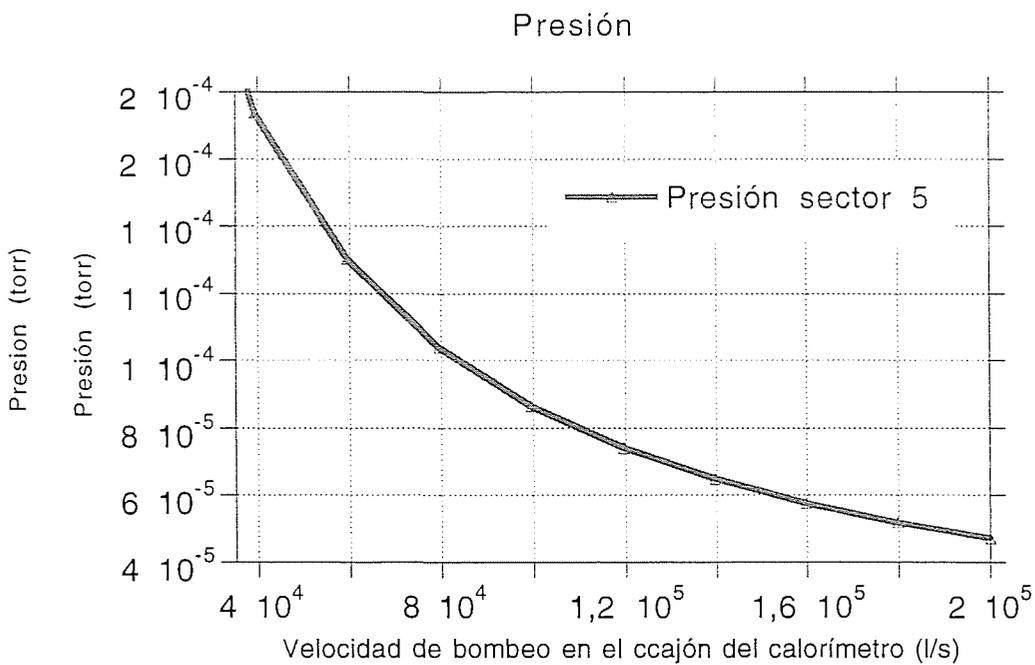


Fig.4.1.2

Potencia inyectada en el toro

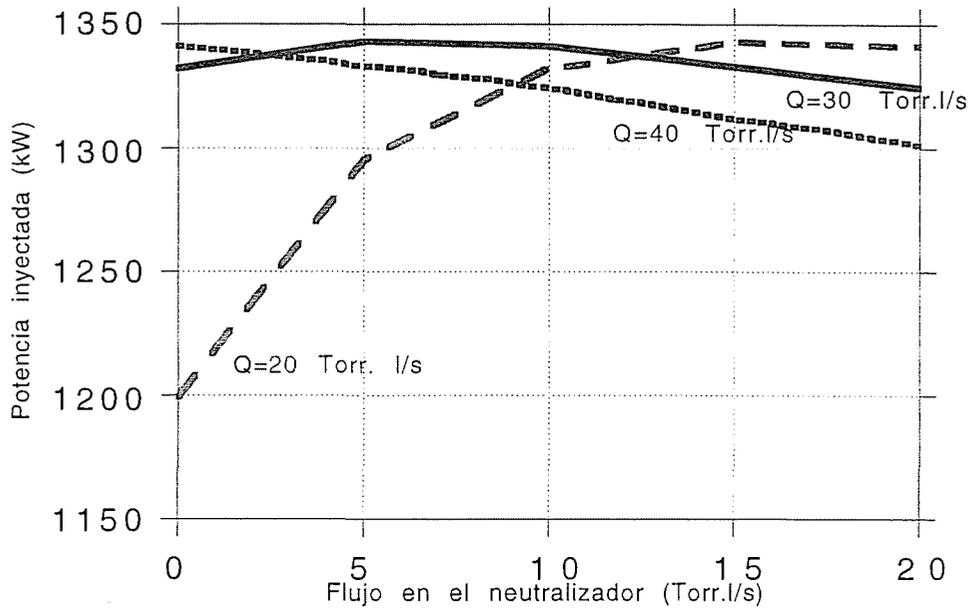


Fig.4.2.1

Eficacia de neutralización Componente mono-atómica del haz

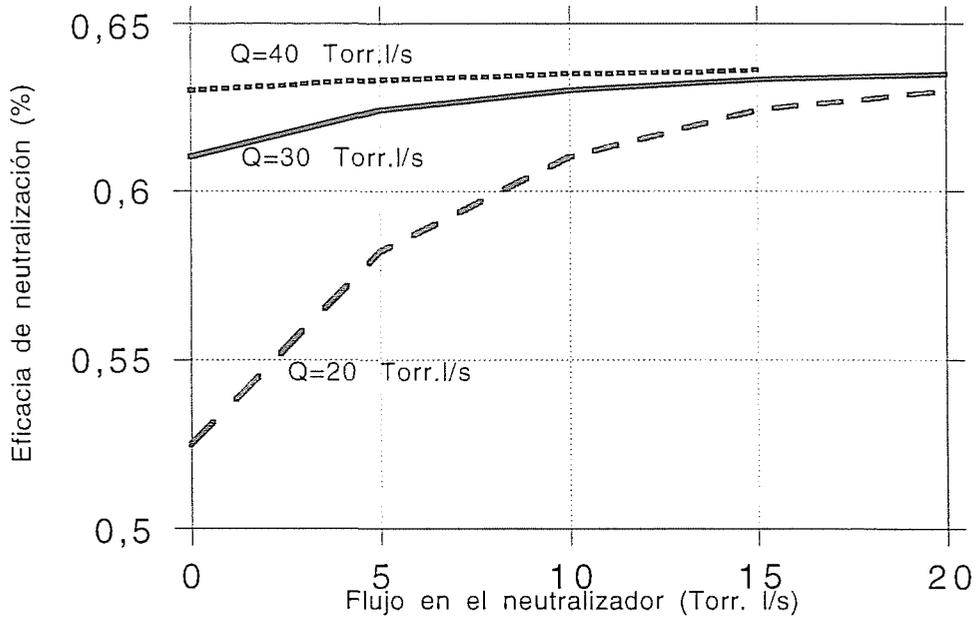


Fig.4.2.2

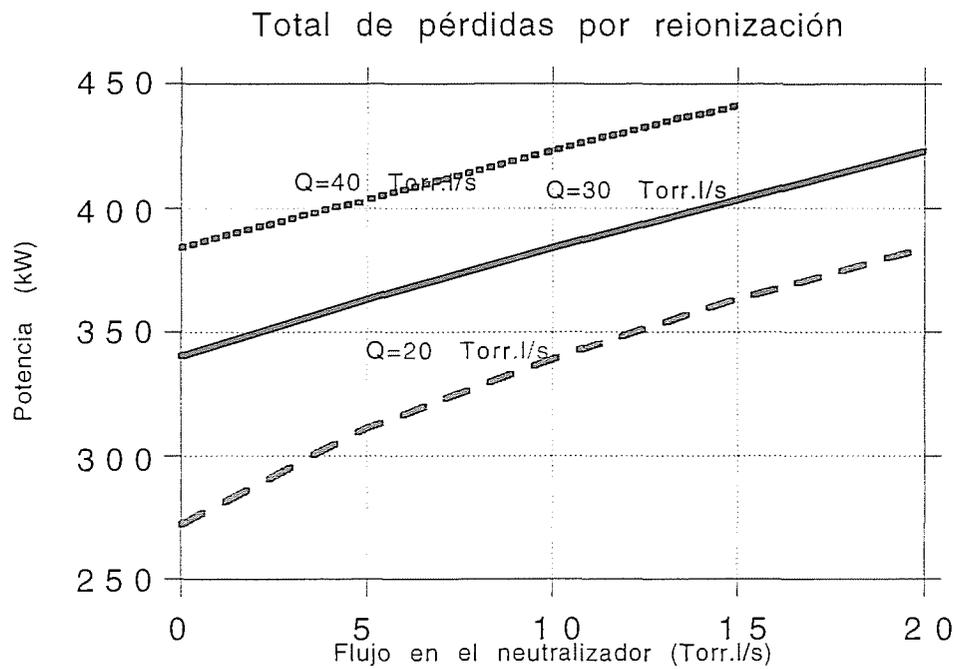


Fig.4.2.3

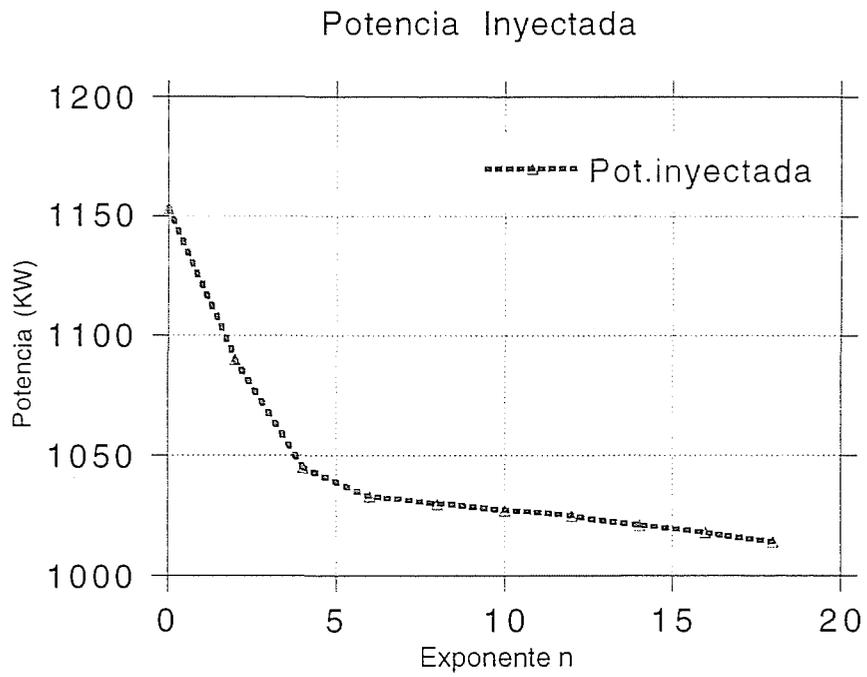


Fig.4.3.1

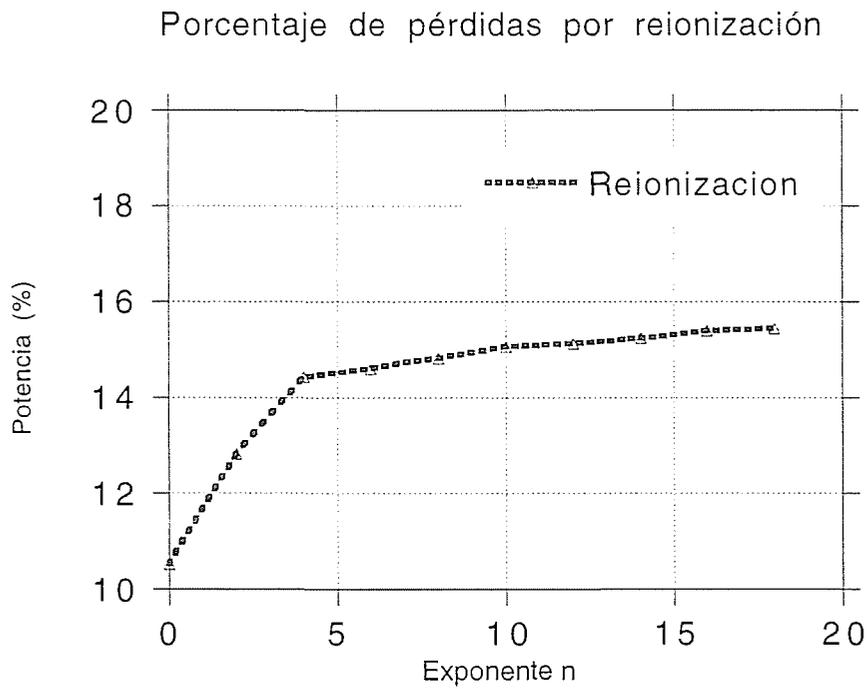


Fig.4.3.2

Pérdidas por reionización
en cada sector del Inyector

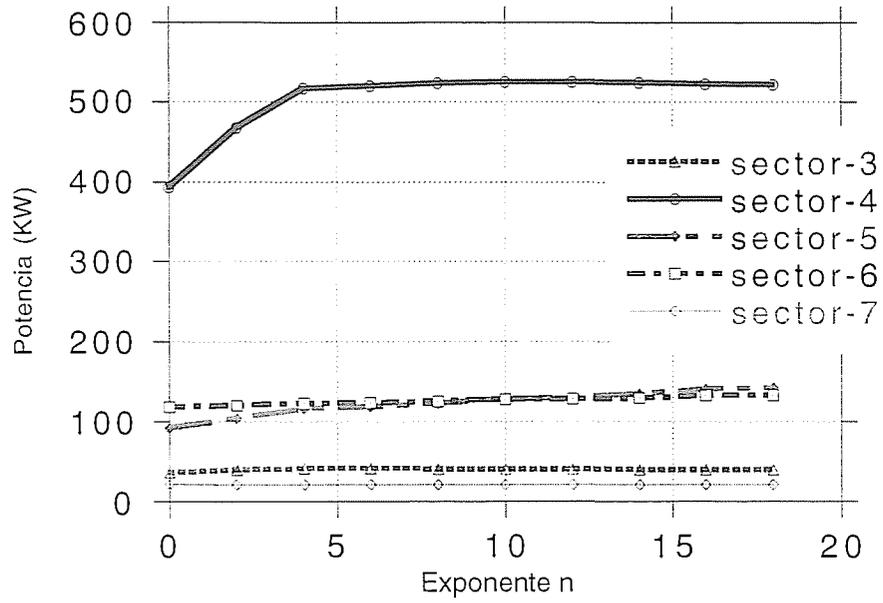


Fig.4.3.3

Potencia inyectada en el toro

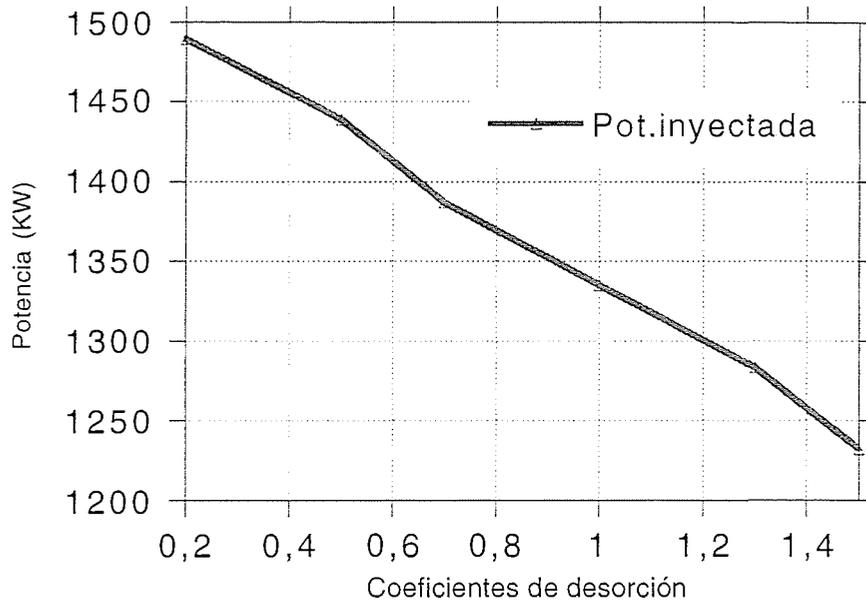


Fig.4.4.1

Pérdidas de potencia por reionización

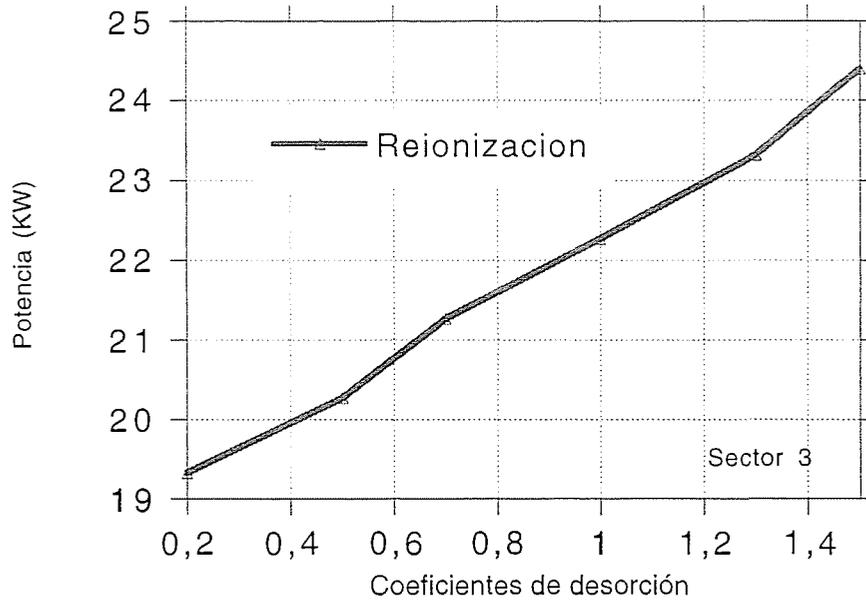


Fig.4.4.2

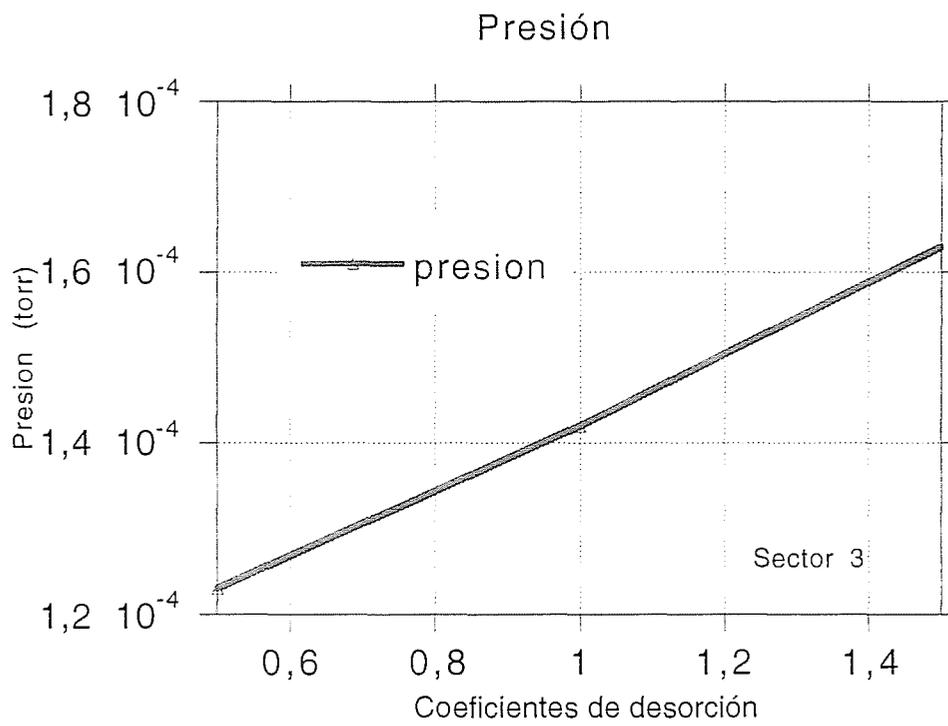


Fig.4.4.3

Potencia Inyectada

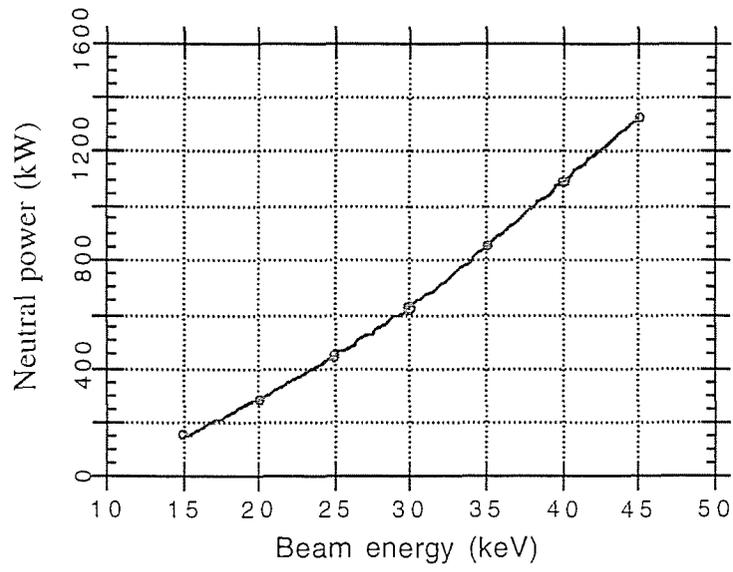


Fig.4.5.1

Porcentaje de pérdidas y de potencia inyectada

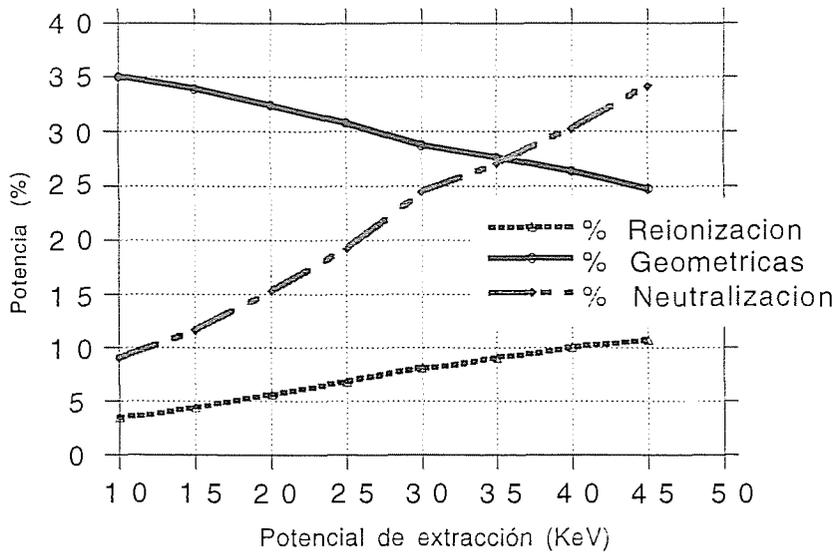


Fig.4.5.2

