Informes Técnicos Ciemat

820
Febrero 1997

Aplicación del código SLAC al estudio de sistemas de extracción de iones para inyectores Neutros

M. García
M. Liniers
J. Guasp

Asociación EURATOM/CIEMAT para Fusión - 39

Instituto de Investigación Básica

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

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

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

Depósito Legal: M-14226-1995
NIPO: 238-97-001-5
ISSN: 1135-9420

Editorial CIEMAT

CLASIFICACION D.O.E. Y DESCRIPTORES

700412, 700380
BEAM INJECTION, PLASMA HEATING, BEAM OPTICS,
ELECTROSTATIC LENSES, COMPUTER CODES

"Aplicación del código SLAC al estudio de sistemas de extracción de iones para inyectores de neutros"

García, M; Liniers, M.; Guasp, J.
73 pp. 39 figs. 12 refs.

Resumen

En este trabajo se han analizado mediante el código SLAC diferentes geometrías del sistema de extracción de haces intensos de iones, para su posible aplicación a los inyectores de neutros de TJ-II.

Para ello se han introducido en el código alguna modificaciones con el objeto de simular correctamente la zona de transición entre el plasma de la fuente de iones y la región de extracción, que tiene un gran impacto sobre la óptica del haz.

Estas modificaciones incluyen la introducción de una población de electrones Boltzmann en dicha zona de transición, y la implementación de la opción de simular la velocidad térmica de los iones en la fuente.

Se ha encontrado que los resultados con la nueva versión del código se acercan más a los valores experimentales obtenidos en dos sistemas conocidos.

Con esta nueva versión del código se han realizado dos estudios diferentes: en primer lugar una optimización del sistema de extracción de los inyectores de ATF para su utilización en TJ-II, encontrándose el valor óptimo del intervalo de aceleración ("gap") para el rango de energías entre 30 y 40 keV, y en segundo lugar un estudio sistemático de geometrías de extracción a 40 keV. Como resultado de este segundo estudio se han encontrado las combinaciones de parámetros que pueden ser utilizados en diferentes condiciones de trabajo (diferentes longitudes de pulso, por ejemplo) conduciendo a divergencias aceptables del haz.

"Application of the code SLAC to the study of Ion Extraction Systems in Neutral Injectors"

García, M; Liniers, M.; Guasp, J.
73 pp. 39 figs. 12 refs.

Abstract

In this study different extraction geometries for intense ion beams have been analysed with the code SLAC, in view of its possible application to the neutral injectors of TJ-II.

With this aim, we have introduced several modifications in the code in order to correctly simulate the transition between the ion source plasma and the extraction region, which has great impact on the beam optics.

These modifications include the introduction of a population of Boltzmann electrons in the transition region, and the implementation of an option to simulate the thermal velocity of the ions in the source.

We have found a better agreement between the results obtained with the new version of the code and the experimental data in two well known systems.

With this new version of the code two different studies have been carried out: in the first place an optimization of the ATF injectors extraction system for its use on TJ-II, leading to an optimum value of the gap in the energy range 30 - 40 keV, and in the second place a systematic study of extraction geometries at 40 keV. As a result of this second study we have found the combinations of parameters that can be used under different working conditions (e.g. different pulse lengths), leading to acceptable values of the beam divergence.

INDICE

1. Introducción

2. Código SLAC
   2.1 Funcionamiento del código
      2.1.1 Estructura de los ciclos
      2.1.2 Ecuación de Poisson
      2.1.3 Cálculo de Trayectorias
      2.1.4 Asignación de carga espacial
      2.1.5 Neutralización de carga espacial
   2.2 Efecto de los electrones en SLAC

3. Resultados
   3.1 Simulación del sheath con una población de electrones Boltzmann
   3.2 Influencia de la velocidad térmica de los iones
   3.3 Presencia de especies moleculares
   3.4 Influencia del gap acelerador
   3.5 Diseño óptimo del sistema de extracción
   3.6 Comparación con otros códigos

4. Conclusiones

A1. Estructura global del código
A2. Estructura de los ficheros
   A2.1 Fichero de geometría
   A2.2 Fichero de corrientes
   A2.3 Fichero de salida
   A2.4 Salida gráfica
A3. Variables del código
A4. Cómo utilizar el código

Referencias

Lista de Tablas

Lista de Figuras

1.INTRODUCCION

El código SLAC (Stanford Linear Accelerator Code), escrito en Stanford por W.B. Hermannsfeldt[1] fue creado para calcular trayectorias de partículas cargadas en sistemas focalizadores electrostáticos y magnetostáticos, incluyendo los efectos de la carga espacial y de los campos magnéticos autoinducidos. En un principio, las opciones de entrada incluían cátodos de varias geometrías, de donde partían los electrones de acuerdo con las condiciones de la ley de Child[2].

Más tarde se extendió la utilización del código al estudio de los sistemas de extracción de las fuentes de iones, en los que la superficie emisora de los iones no es fija, sino que adopta la forma de un "menisco" (ver Figura 1). La forma de este menisco tiene un gran impacto sobre la óptica del haz, por lo que su mecanismo de simulación en el código va a tener gran influencia en los resultados.

En la primera extensión del código, el plasma era simulado por una región equipotencial detrás del menisco, y la superficie del plasma por una equipotencial de valor prefijado, habiendo una transición abrupta del plasma a la región de extracción. Hemos encontrado que este tratamiento da lugar a una superficie de plasma poco realista, lo que nos ha llevado a introducir una modificación en el código por la que el plasma y la región de transición son simuladas incluyendo una población de electrones de Boltzmann. Como veremos, esto conduce a una superficie de plasma más realista.

Aunque el código se ocupa sólo de la fase de aceleración del haz, conviene hacer una descripción somera de la fase de generación, donde se establecen los parámetros que caracterizan la intensidad del haz. En la figura 1 se representa esquemáticamente una fuente de iones y un sistema de extracción y aceleración. La fuente de iones consiste en una cámara donde se establece una descarga de arco en el gas cuyos iones monoatómicos constituirán el haz. El cátodo es un filamento emisor de electrones que son acelerados hacia el ánodo, dando lugar a ionizaciones en cascada en sus colisiones con las moléculas del gas. De este modo se crea un plasma cuyos iones positivos son extraídos con ayuda de un electrodo (primer electrodo o electrodo de plasma) polarizado ligeramente negativo respecto al ánodo (20-100 V) .La aceleración de los iones se consigue mediante un campo eléctrico intenso creado por una serie de electrodos con forma de rejilla.

Como se ve en la Figura 1 el menisco es la superficie de separación entre el plasma de la fuente de iones, donde existe cuasi neutralidad de carga, y la zona de extracción, donde dominan los efectos de la carga espacial. La transición tiene lugar a lo largo de una distancia del orden de diez veces la longitud de Debye ("plasma sheath"), que separa la zona equipotencial del plasma, que se encuentra a un potencial varias veces kT_e por encima del ánodo, de la zona de extracción .

La densidad de corriente en la superficie de plasma está determinada por la densidad iónica (o electrónica) en el interior del plasma, y por la temperatura eletrónica T_e, de unos pocos eV. La entrada de gas en la fuente, y la corriente de arco son los mandos que nos permiten variar la densidad de corriente extraída, independientemente del potencial aplicado, aunque siempre por debajo del límite impuesto por la carga espacial, dado por la expresión de Child

$$J_{\max} = (4\varepsilon_0/9)\sqrt{2e/m}\, V_d^{3/2}/d^2 \qquad (1)$$

donde d es la separación entre los electrodos plano-paralelos.

Los sistemas de extracción consisten en general en electrodos con agujeros de simetría cilíndrica o rectangular, por lo que se alejan de las condiciones ideales de electrodos plano-paralelos de Child, de modo que la dependencia de la corriente máxima extraída con el potencial aplicado, aunque conserva la misma dependencia funcional con V, tiene una constante de valor inferior. Además, cuando se requieren haces intensos, como en el caso de los inyectores de neutros, se utilizan sistemas multiaperturas (rejillas), que se alejan aún más del comportamiento ideal. Tanto SLAC como otros códigos de simulación de haces, tratan el problema de una apertura, siendo la optimización válida en el sistema multiapertura correspondiente.

El haz extraído tiene una divergencia que depende de la óptica focalizadora del sistema de extracción, de la forma del menisco, y de la carga espacial del propio haz. Al mismo tiempo, la forma del menisco está determinada tanto por la geometría del sistema de extracción como por la densidad de corriente extraída, es decir, en última instancia por la densidad del plasma. El código calcula la superficie del plasma como una superficie equipotencial más del problema, dados la densidad de corriente inicial, y los potenciales de los electrodos. El resultado, para cada geometría y cada densidad de corriente iónica es un haz de una cierta divergencia y un cierto valor de corriente transmitida.

Dependiendo de la aplicación para la que diseñe el haz, se requerirá a veces una intensidad máxima sin condiciones estrictas sobre la divergencia (propulsores iónicos), o al contrario, un haz muy colimado aunque poco intenso (inyectores para diagnóstico de plasmas). En el caso de los inyectores de neutros se requieren haces intensos (haces Multimegawatios) y colimados ($\theta \cong 1^0$) ya que han de transportarse a distancias entre 5 y 10 metros hasta la ventana de la máquina de plasma. Se utilizan sistemas de extracción de tres y hasta cuatro electrodos, que limitan la transmisión del haz, en la propia zona de extracción, por lo que la optimización de la corriente transmitida y el ángulo de divergencia suelen ser simultáneos. Otro factor que influye en el diseño de sistemas de extracción para inyectores de neutros es la intensidad interceptada por los electrodos, en particular el de plasma, que puede sufrir tensiones térmicas que afecten negativamente a sus propiedades de focalización.

En el diseño de sistemas de extracción se parte de una determinada geometría de los electrodos (rejillas), que incluye el tamaño de las aperturas, la distancia entre electrodos y el perfil longitudinal de las aperturas. Para cada valor del potencial se hace un barrido en densidad de corrriente, estudiándose en cada caso la intensidad del haz que llega al tercer electrodo y su divergencia. La densidad de corriente óptima j_{opt} tiene con el potencial una dependencia del tipo $V^{3/2}$. Se llama Perveancia a la cte que relaciona ambas magnitudes, y que es una característica de la geometría.

$$j_{opt} = P\, V^{3/2} \qquad (2)$$

Cuando en un sistema concreto j y V se encuentran sobre la curva (2) se dice que el haz está ajustado en perveancia.

A la hora de abordar el diseño de un sistema de extracción-aceleración, se han de tener en cuenta las constricciones a que están sometidos los parámetros que definen la geometría; para cada V existe una distancia mínima entre electrodos, impuesta por la aparición de arcos, para la que se ha encontrado la expresión empírica [3]

$$d = 0.01414\, V^{3/2} \quad [\ \mathrm{mm/kV^{3/2}}\ ] \qquad (3)$$

Esto limita la máxima densidad de corriente, de acuerdo con la expresión (1).

Por otro lado, estudios experimentales [4] han demostrado que existe una relación óptima entre el radio de la apertura y la distancia entre electrodos $a/d = 0.5$. Esto limita el tamaño de las aperturas, y por consiguiente la transparencia de la rejilla.

En este trabajo se ha analizado la geometría del sistema de extracción de los inyectores de neutros de ATF (Advanced Toroidal Facility , stellarator de tipo torsatrón que operó en el laboratorio Nacional de Fusión de Oak Ridge, Tennessee, EEUU, a principios de los años 90) en el rango 30 - 40 keV para su posible aplicación al TJII. Se han comparado los resultados obtenidos mediante la versión original de SLAC y la versión modificada con la simulación del plasma, y es esta última versión la que se ha aplicado a la optimización de la geometría.

2.CODIGO SLAC

A continuación se expone el funcionamiento del código , y se resumen los procesos de cálculo que intervienen . En el apartado 2.2 se detalla la influencia que la nube electrónica tiene sobre las trayectorias.

2.1 FUNCIONAMIENTO DEL CODIGO

2.1.1 ESTRUCTURA DE LOS CICLOS

El problema a resolver está representado en la figura 2: un sistema de tres electrodos crea un campo electrostático en el que se inyecta una corriente de iones desde el plasma, situado a la izquierda del primer electrodo.

SLAC calcula las trayectorias de los iones en el campo electrostático resultante de los electrodos y su propia carga espacial. El código permite introducir campos magnéticos exteriores así como el campo magnético debido a la propia corriente inyectada. Los sistemas de extracción y aceleración de iones que consideraremos en adelante serán sin embargo puramente electrostáticos, e incluso los efectos del auto campo magnético pueden despreciarse en el caso de los iones debido a su gran masa.

Los datos del problema son la geometría y potencial de los electrodos, y la densidad de corriente de iones en la superficie del plasma. El código admite problemas tanto de simetría cilíndrica (agujeros circulares) como rectangular (rendijas). En lo que sigue nos centraremos en la geometría cilíndrica, de modo que el problema se reduce a dos dimensiones R (coordenada radial) y Z (coordenada axial).

SLAC resuelve la ecuacion de Poisson por diferencias finitas con las condiciones de contorno dadas por los electrodos, en una malla uniforme de espaciado h creada dentro del programa. Las condiciones de contorno son de dos tipos: contornos tipo Dirichlet con valores conocidos de potenciales (superficies de electrodos), y contornos tipo Neumann en los que el gradiente del potencial es conocido (espacio entre electrodos, eje del haz).

El programa procede por ciclos: en cada ciclo se resuelve la ecuación de Poisson con la carga espacial de los iones producida por las trayectorias calculadas en el ciclo precedente. Las trayectorias son computadas en la distribución de potenciales así obtenida sirviendo de base para el cálculo de una nueva distribución de carga espacial, que será utilizada para resolver la distribución de potenciales del ciclo siguiente. En el primer ciclo se resuelve la ecuación de Poisson sin carga espacial, ecuación de Laplace. Las trayectorias de los iones en los campos de vacío resultan muy focalizadas, dando lugar al primer mapa de carga espacial y al correspondiente mapa de potenciales muy distorsionados. El programa dispone de mecanismos de relajación del potencial y la carga espacial que ayudan a una convergencia más rápida en algunos casos.

Los cuatro procesos fundamentales del proceso de cálculo son :

1°) Resolución de la ecuación de Poisson

2°) Cálculo de las trayectorias

3°) Asignación de carga espacial

4°) Neutralización de carga espacial

2.1.2 ECUACION DE POISSON

En cada punto de la malla se calcula el potencial Vo mediante la "regla de los cinco puntos" [5] , ver figura 2 :

$$V_0 = \frac{1}{4}V_1 + \frac{1}{4}V_2 + \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8H}\right)V_3 + \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8H}\right)V_4 + \frac{h^2\rho_0}{4\varepsilon_o} \qquad (4)$$

donde :

H = coordenada radial del punto P_0 en unidades de malla

V_1, V_2, V_3, y V_4 representan los valores de potencial en los cuatro vecinos más próximos.

Esta expresión procede del desarrollo del potencial en serie de potencias hasta segundo orden, con las relaciones entre derivadas que se obtienen de la ecuacion de Poisson en coordenadas cilindricas

$$\frac{\delta^2 V}{\delta r^2} + \frac{1}{r}\frac{\delta V}{\delta r} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = \frac{-\rho}{\varepsilon_0} \qquad (5)$$

Para cada punto de la malla existe una expresión de tipo (4) que relaciona su potencial con los de sus cuatro puntos vecinos. La solución simultánea del problema requeriría resolver un sistema de N equaciones con N incógnitas, donde N, el número de puntos de la malla, es un número muy grande ($N \approx 10000$) Se recurre entonces a un método de iteraciones sucesivas, que partiendo de un mapa arbitrario de potenciales calcula los nuevos valores de potencial, que desplazan a los antiguos en la iteración siguiente. Existen varios métodos diferentes de llevar a cabo esta iteración, y se demuestra que al cabo de un número suficiente de iteraciones, convergen hacia la misma solución [5].

En SLAC, el mapa inicial de potenciales es generado por la subrutina COEF, que asigna a todos los puntos de una misma columna (Z= cte) el valor del potencial del contorno Dirichlet que corta dicha columna.

El proceso de iteración utilizado en SLAC consiste en resolver primero los potenciales de las columnas impares suponiendo las pares conocidas , para completar el proceso para las columnas pares en una segunda pasada. La matriz para los puntos de una columna es tridiagonal, y debe ser invertida para encontrar los valores de los potenciales en esa columna.

El programa realiza iteraciones hasta que se verifica el criterio de convergencia (cf.§ A2.3) o se han llevado a cabo 50 iteraciones. El criterio de convergencia se aplica al mayor de los cambios de la iteración , "ERR", que aparece en el fichero de salida.

2.1.3 CALCULO DE TRAYECTORIAS

Una vez calculado el mapa de potenciales se obtienen los campos eléctricos y a partir de ellos las trayectorias que seguirán las particulas. Las trayectorias se calculan en la subrutina TRAJCT , con la ayuda de PRTIAL en donde se calculan los campos eléctricos .Para la resolución de las ecuaciones relativistas de movimiento se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden. La variable independiente es el tiempo, pero los intervalos de tiempo se calculan a partir del parámetro STEP (en unidades malla) y la velocidad de la partícula.

Desde la subrutina TRAJCT , con la que calculamos las trayectorias de las partículas, se asigna la carga espacial a los puntos de la malla.

2.1.4 ASIGNACION DE CARGA ESPACIAL

Las trayectorias que se calculan corresponden a iones con unas ciertas coordenadas iniciales , y a los que asigna una intensidad de corriente , de modo que pueden ser tratados como "rayos" . En el caso de geometría cilíndrica los rayos contienen la corriente correspondiente al area comprendida entre dos arcos de circunferencia de radios correspondientes a rayos consecutivos, que subtienden un ángulo de un radián.

En cada paso de la trayectoria se asigna carga $\rho = \dfrac{Intensidad}{\varepsilon_o \mathrm{v}}$ a los puntos de la malla más próximos en fracciones inversamente proporcionales a la distancia. Si $v_z > v_r$ la carga se asigna a los puntos de la misma columna, si $v_r > v_z$ reciben la carga los puntos de la misma fila.

El mapa de carga espacial así obtenido puede visualizarse en el fichero de salida.

A veces aparecen regiones en que las trayaectorias estan muy separadas unas de otras, dando lugar a "malas" distribuciones de carga espacial.

Desde el fichero de geometría podemos activar la subrutina CHLISS, cuya función es realizar un alisamiento de la carga espacial en la región comprendida entre los límites IRLISS, LRLISS, IZLISS y LZLISS.

También se puede realizar un suavizamiento de la carga espacial entre los últimos ciclos realizados, con distintos pesos para cada ciclo.

Estos valores que controlan tanto el alisamiento como la relajación de carga espacial se encuentran el fichero de geometría.

2.1.5 NEUTRALIZACION DE CARGA ESPACIAL

En las proximidades del primer electrodo, o electrodo de plasma, tiene lugar la transición entre la región ocupada por el plasma y la región de extracción.

Esta transición era tratada por SLAC como un salto brusco entre la región a la izquierda de la equipotencial de valor Φ =VION, que simula la superficie de plasma , y en la que el potencial calculado se hace artificialmente igual a VION, y la región a la derecha , dominada por la carga espacial debida a la corriente de iones.

En la figura 3 se representa esquemáticamente lo que sucede en la zona de transición entre un plasma y un electrodo, polarizado o no. El plasma se mantiene esencialmente equipotencial y cuasi-neutro, pero en la región próxima al electrodo se concentra el gradiente de potencial a lo largo de una distancia varias veces la longitud de Debye ("plasma sheath")[6], en donde existe una distribución de carga espacial resultado de la superposición de la corriente iónica hacia el electrodo y una población Maxwelliana de electrones (e-) con una distribución $\propto e^{-\frac{\Phi-\Phi_p}{KT}}$ donde Φ_p es el potencial del plasma.

Un tratamiento realista de la zona de transición aconseja incluir una población Boltzman de e- que da lugar a una neutralización parcial de la carga espacial. Esta población de e- se atenua rápidamente, y en la zona de extracción con elevados valores del potencial, es prácticamente nula.

En los plasmas típicos de una fuente de iones, $KT_e \approx 5$ eV y $n_e \approx 10^{12}$ cm $^{-3}$, la longitud de Debye λ_D es aproximadamente 0.01mm, es decir, del orden o menor que el espaciado de la malla ($h \approx 0.1$mm), lo que podría inducir a creer que la simulación detallada de la región de transición es innecesaria.

Sin embargo, la población de e- suaviza la carga espacial sobreestimada de la primera iteración, cuando los iones ven solamente los campos focalizadores de vacío y las trayectorias resultan artificialmente concentradas en la zona de extracción. En el primer ciclo la codición VION conducía a una distorsión excesiva de la superficie de plasma, que hacía la convergencia en esta región mucho más lenta.

Para la simulación de la superficie de plasma se sigue utilizando la condición estricta de equipotencialidad: los potenciales inferiores al valor Φ_p se hacen automáticamente iguales a Φ_p.

2.2 EFECTO DE LOS ELECTRONES EN SLAC

La población de e- de Boltzmann en la región de transición plasma-zona de extracción, que contribuye a neutralizar parcialmente la carga espacial de los iones en esta región, viene dada por[7] :

$$n_e(\phi) = n_0 e^{-\frac{\phi-\phi_p}{KT_e}}$$

n_0= Densidad de e- en el centro del plasma

Φ_p: Potencial en el centro del plasma.

T_e= Temperatura electrónica

Esta densidad electrónica da lugar a una distribución de carga negativa, que en un punto K de la malla viene dada por :

$$RH_2(K) = \frac{JOTA * S(K)}{V_{INI} * \varepsilon_o} e^{-\frac{\Phi(K)-\Phi_p}{KT_e}}$$

K: Indice unidimensional del punto de la malla

$S(K)$: Area comprendida entre los arcos de circunferencia de radios R(K) y (R(K) - h) que subtienden un ángulo de un radián. R(K) es la coordenada radial correspondiente al punto K. El area viene expresada en m^2.

$\Phi(K)$: Potencial expresado en voltios.

$JOTA$: Densidad de corriente iónica en A/m^2.

V_{INI}: Velocidad con la que los iones llegan a la región del sheath , correspondiente a una energía varias veces kT_e [7]. Salvo casos explícitos, en los etudios que siguen se ha utilizado una energía inicial de 20 eV. Viene expresada en m/s.

ε_o: Constante dieléctrica del vacío.

Esta contribución a la carga espacial convierte la solución de Poisson en un problema no lineal. Existen varios modos de tratar esta no-linealidad, haciendo por ejemplo ciclos menores para los e- con la carga de los iones fija, incluyendo la carga de los e- en las iteraciones de la subrutina de Poisson o haciendo un ciclo externo a estas iteraciones[8]. Hemos comprobado que estos tratamientos complican enormemente el proceso de convergencia, aumentando en dos órdenes de magnitud el tiempo de cálculo.

Hemos optado por hacer un sólo ciclo simultáneo con la carga espacial de e- y de iones. De esta forma la convergencia del proceso es mucho más rápida, con el consiguiente ahorro de tiempo de cálculo.

El diagrama de flujo del tratamiento que hemos adoptado se especifica en la figura 4 .

Un estudio detallado de la influencia de los e- en las densidades de corriente que nos dan la mínima divergencia, asi como esa divergencia mínima, se encuentra en el apartado 3.1.

3.RESULTADOS

En la figura 5 aparecen representados los tres electrodos de los inyectores de ATF, diseñados para un haz de 40keV de energía y 100 A de corriente extraída [9].

El primer electrodo, o electrodo de plasma , está polarizado 20V negativo con respecto al ánodo de la fuente de iones. Esta diferencia de potencial es suficiente para extraer eficientemente los iones de la fuente, y no demasiado alta, lo que podría dar lugar a un sputtering indeseado del electrodo.

El segundo electrodo, o electrodo decel está a -42kV respecto al primero, y el tercer electrodo, o electrodo acel a -40kV respecto al primero. Esto da lugar a un campo decelerador de iones entre el segundo y el tercer electrodos. Este campo decelerador tiene la función de crear un pozo de potencial para e-, protegiendo así a la fuente de iones de los e- creados en la zona de extracción por colisión con átomos de gas neutro, e- que sufrirían enormes aceleraciones hacia atrás, produciendo daños considerables en la fuente.

En SLAC los potenciales de los electrodos están cambiados de signo, ya que fue inicialmente utilizado para e-, de modo que debemos trabajar con iones negativos para obtener resultados totalmente equivalentes.

En la figura 5 aparecen también las curvas equipotenciales correspondientes a los campos de vacío, sin carga espacial, solución a la ecuación de Laplace que SLAC resuelve en el primer ciclo.

En la figura 6 se representan las trayectorias de los iones en estos campos de vacío: se observa la convergencia excesiva de las trayectorias en los campos focalizadores de los electrodos.

Para encontrar el valor óptimo de la densidad de corriente j_{opt} correspondiente a un valor del potencial acelerador V , se hace un barrido en j estudiándose el valor rms del ángulo de divergencia de los rayos, Θ_{rms}, que viene dado por : $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} I_i * \alpha^2{}_i}{\sum_{i=1}^{n} I_i}}$

donde :

α_i= ángulo de la trayectoria del rayo i con el eje z en el plano final del sistema.

I_i = la intensidad que transporta el rayo i.

n =número total de rayos que llegan al plano final.

Las figuras 7, 8 y 9 ilustran uno de esos barridos. En 7, la densidad de corriente j=100mA/cm^2 da lugar a una carga espacial débil, los campos focalizadores de los electrodos son dominantes, y el haz resultante está excesivamente focalizado y tiene una gran divergencia. En 9, la densidad de corriente j=450mA/cm^2 da lugar a una carga espacial excesiva, de modo que el haz resultante tiene también una divergencia elevada.

En 8, la densidad de corriente j=330mA/cm^2 da lugar a un haz colimado, en el que las fuerzas radiales debidas a la carga espacial compensan de modo óptimo a las fuerzas focalizadoras de los electrodos.

En la figura 10 se representa el ángulo de divergencia Θ_{rms} y la intensidad transmitida hasta el tercer electrodo frente a la densidad de corriente, para V=40keV ilustrando el concepto de jopt.

Antes de concentrarnos en el estudio de las propiedades del sistema de extracción de los inyectores de ATF, y en su posible optimización, vamos a presentar la comparación de resultados obtenidos, para una geometría concreta , con y sin neutralización de carga espacial por e-, con y sin distribución térmica de velocidades iónicas , con y sin mezcla de especies moleculares.

De esta comparación surgirá el escenario más adecuado para los estudios de optimización subsiguientes.

La geometría de los electrodos utilizada en los estudios 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, es la representada en la figura 5.

3.1 SIMULACION DEL "SHEATH" CON UNA POBLACION DE ELECTRONES BOLTZMANN

En esta sección se comparan los resultados de SLAC obtenidos con y sin simulación de la región de transición (sheath), incluyendo en la comparación los resultados experimentales [9] obtenidos con la geometría de ATF (figura 5).

Se han hecho barridos de densidad de corriente para potenciales entre 20 y 60 kV , y los valores de j_{opt}, Θ_{min} y transmisión se han comparado con los de la referencia [9].

En las figuras 11a, 11b están representadas la Θ_{min} y la j_{opt} y en función del potencial entre 30 y 60 kV.

Se observa que al considerar la nube electrónica en la región de extracción del haz, el valor de la j_{opt} aumenta. Los valores obtenidos cuando consideramos electrones se aproximan más a los experimentales. Así mismo los valores encontrados de la divergencia óptima mejoran cuando tenemos en cuenta el efecto de los electrones.

En los casos estudiados se ha considerado la rejilla de plasma polarizada positiva 50V (el código trabaja con cargas y potenciales inversos) respecto del potencial del plasma. Si se aumenta el valor del potencial de la rejilla de plasma la divergencia disminuye pero tambien la intensidad transmitida, pues aumenta la corriente interceptada por el primer electrodo, efecto que debe evitarse en la medida de lo posible. Estas conclusiones coinciden con los resultados experimentales de los que se infiere que trabajando con el primer electrodo polarizado a más de 50V comienzan los problemas de sputtering.

Finalmente mostramos en la figura 12 la Perveancia del sistema, viendo una vez más que el caso en el que se han considerado los electrones se acerca más al valor experimental de $10\,\mu perv$.

Debido a que la simulación del haz considerando el efecto de los electrones en la región de extracción nos conduce a resultados más próximos al experimento, a partir de ahora todos los estudios realizados incluirán dicho efecto.

3.2 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD TERMICA DE LOS IONES

Los resultados expuestos hasta ahora no incluyen el efecto de la temperatura iónica de la fuente sobre la divergencia del haz.

La velocidad media que las partículas adquieren debido a su temperatura viene dada por :

$$V_{th} = \sqrt{\frac{2kT_i}{m_i}}$$

donde:

T_i = temperatura iónica

m_i = masa de los iones.

Esta velocidad térmica tiene una distribución isótropa, lo que da lugar a una contribución a la divergencia del haz. El código simula este efecto a través de la subrutina THERM, la cual queda activada cuando la variable TC, que representa la temperatura iónica en grados Kelvin, es distinta de cero. Cuando esta subrutina entra en funcionamiento , el fichero de corrientes se modifica y cada rayo representa ahora una función de distribución de velocidades de tres ó cinco componentes , en función del valor de la variable KRAY.

En la figura 13a se representa el efecto de incluir la temperatura iónica de la fuente sobre la divergencia para la geometría de los inyectores de ATF cuando se trabaja a 40kV.Se observa que un aumento de temperatura iónica produce un aumento notable en la divergencia mínima. Por otra parte se observa que para valores de T_i =1eV tenemos un desplazamiento en el valor de la j_{opt}[10].

La influencia de la velocidad térmica sobre la divergencia del haz depende mucho de la geometría de los electrodos. En el caso que estamos considerando (geometría ATF) esta influencia es muy notable, pero existen geometrías, como la representada en la figura 25 (geometría de TEXTOR) apenas sensibles al efecto térmico. En la figura 13b se muestran barridos en corriente para tres temperaturas iónicas en el caso de la geometría de TEXTOR (Tokamak actualmente en operación en el laboratorio Max Plank para Fusión de Jülich , Alemania).

Debido a que el valor que alcanza la temperatura iónica de la fuente no se puede conocer con exactitud a priori, no conoceremos el valor absoluto de la divergencia mínima, pero el valor de Θ_{min} obtenido con SLAC servirá de referencia para comparar unas geometrías con otras.

3.3 PRESENCIA DE ESPECIES MOLECULARES

En todo haz de neutros de energía nominal E, aparece una cierta proporción de átomos con energías E/2 y E/3 . Estos átomos con energías fraccionales provienen de las especies moleculares H_2^+ y H_3^+ presentes en el plasma de la fuente de iones, que son extraídos y acelerados antes de disociarse en sus componentes monoatómicos, de energías mitad y un tercio. La fracción de especies varía con el tipo de fuente de iones, pero los valores típicos están en torno a 80 : 10 : 10 (E : E/2 : E/3).

En la zona de extracción las especies moleculares H_2^+ y H_3^+ se comportan como partículas con la misma carga y masa doble o triple de la de H^+. Su contribución hace disminuir la perveancia efectiva del haz, ya que esta varía como $\frac{1}{\sqrt{m}}$.

En la figura 14 a y b se representa el efecto de la mezcla de especies en la óptica del haz: la divergencia se mantiene en los niveles correspondientes a una sola especie, aunque a costa de disminuir la corriente extraída.

3.4 INFLUENCIA DEL GAP ACELERADOR

Como se ha visto en 3.1 los sistemas reales de extracción y aceleración de iones tienen un comportamiento del tipo Child-Langmuir $j_{opt} \propto V^{3/2}$ donde la cte de proporcionalidad, llamada perveancia, es característica de la geometría. En particular la perveancia varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre electrodos, como se mencionó en la introducción con relación a sistemas lineales, es decir, cuanto menor sea el gap acelerador mayor puede ser la corriente extraída.

Para el sistema de ATF (figura 5) se ha variado el gap entre 6 y 9 mm manteniendo constantes los restantes parámetros: los resultados se resumen en las figuras 15a y 15b. Al disminuir el gap aumenta j_{opt}, sin embargo las propiedades ópticas del haz se deterioran al aumentar el cociente a/d, es decir, al alejarnos de la idealización de electrodos planos y paralelos.

En la tabla I se resumen para 40kV los valores de j_{opt} y Θ_{opt} correspondientes a tres valores del gap. Entre paréntesis aparecen los valores cuando se considera una mezcla de especies, 80: 10: 10 . De esta tabla se puede concluir que para esta geometría, en la región de energías 30-40 kV, 7mm es la distancia que conduce al mejor compromiso entre corriente extraída y divergencia.

Tabla I

Influencia del Gap acelerador

GAP (mm)	J_{opt} (mA/cm^2)	Θ_{opt} (grados)
6	380 (300)	0.86 (0.84)
7	330 (280)	0.8 (0.71)
9	250 (220)	0.63 (0.64)

3.5 DISEÑO OPTIMO DEL SISTEMA DE EXTRACCION

En el proceso de optimización de la geometría de extracción intervienen varios parámetros : espesor de los electrodos, diámetro de los agujeros, separación entre electrodos y perfil de los agujeros. Todos ellos afectan a las características del haz (divergencia, corriente transmitida) y muchas veces es posible encontrar distintas combinaciones que conducen a valores próximos a los de diseño para un beamlet [11], apareciendo sin embargo diferencias al considerar la rejilla completa .

Normalmente, la forma y dimensiones de la superficie de extracción están determinadas de antemano, al estarlo la fuente de iones. Además la mínima distancia entre agujeros en una rejilla viene fijada por el proceso de mecanización y por las necesidades de refrigeración del electrodo (inclusión o no de canales de agua en la rejilla) . De modo que al variar el diámetro de los agujeros, la transparencia varía como $T = \dfrac{\pi \dfrac{(2a)^2}{4}}{((2a)+b)^2}$ (6)

donde :

$2a$ = diámetro de los agujeros.

b = distancia entre agujeros.

con lo que la intensidad total variará en consecuencia. Es decir, se van a intentar optimizar la divergencia del haz y la corriente total transmitida , cuidando siempre que la intensidad interceptada por el primer electrodo no exceda de unos pocos por ciento.

En este trabajo, la superficie de extracción del haz completo es la representada en la figura 16; al aumentar el diámetro de los agujeros, conservando constante la distancia "b" entre ellos, el número de agujeros disminuirá y la transparencia aumentará de acuerdo con (6).

De entre los parámetros que definen la geometría hemos encontrado que el espesor del primer electrodo es uno de los que tienen mayor impacto, mientras que el efecto del diámetro sobre la óptica puede compensarse en alguna medida con la separación entre electrodos.

En este trabajo hemos procedido del modo siguiente para una energía de 40kV :

partimos de un perfil de agujero como el de la figura 17 a y para un espesor dado del primer electrodo, se estudian diferentes diámetros de apertura, encontrando el valor óptimo de separación entre electrodos para cada uno de ellos. El óptimo es aquel valor que permite transmitir la corriente máxima con una divergencia menor de 0.8°.

En el estudio llevado a cabo se ha utilizado el código SLAC con las siguientes condiciones: $T_i = 0$, simulación del sheath con e- Boltzmann y sin mezcla de especies moleculares. Estas condiciones se han elegido para conseguir una separación de efectos y una claridad mayor en los resultados, y regirán en adelante salvo indicación explícita.

Se han estudiado los espesores de primer electrodo 2, 3, y 4 mm. En las tablas II, III, y IV se resumen los estudios realizados, en los que no se ha considerado mezcla de especies. La intensidad total transmitida es igual a la intensidad total extraída menos la interceptada.

TABLA II

Divergencia e intensidad transmitida con grosor de primer electrodo : 2mm

Diámetro (1er electrodo, mm)	Gap (mm)	Intensidad interceptada por beamlet (mA)	Intensidad Total transmitida (A)	Divergencia (grados)
3.8	5	3.2	178.1	0.77
3.8	6	2.6	148.4	0.68
3.8	7	2.2	125.3	0.63
3.8	8	1.7	95.7	0.58
4.4	6	4.1	148.5	0.8
4.4	7	3.4	124.3	0.72
4.4	8	3.0	107.	0.68
5.4	6	3.3	148.4	0.88
5.4	7	2.9	129.4.	0.86
5.4	8	2.4	110.4	0.79
6.4	6	7.2	140.2	1.
6.4	7	6.2	120.7	0.88
6.4	8	7.7	98.	0.66

TABLA III

Divergencia e intensidad transmitida con grosor primer electrodo : 3mm

Diámetro (1er electrodo , mm)	Gap (mm)	Intensidad interceptada por beamlet (mA)	Intensidad total transmitida (A)	Divergencia (grados)
4.4	6	4.2	129.8	0.86
4.4	7	3.7	112.7	0.81
4.4	8	3.1	95.6	0.6
5.4	6	5.5	120.9	1.
5.4	7	4.7	102.5	0.8
5.4	8	4.	87.9	0.75
6.4	6	6.	116.8	1.08
6.4	7	5.	97.3	0.96
6.4	8	4.4	85.6	0.86

TABLA IV

Divergencia e intensidad transmitida con grosor primer electrodo : 4mm

Diámetro (1er electrodo, mm)	Gap (mm)	Intensidad interceptada por beamlet (mA)	Intensidad total transmitida(A)	Divergencia (grados)
5.4	6	2.6	117.	1.28
5.4	7	2.2	98.	1.16
5.4	8	1.9	87.5	1.01
5.4	9	1.7	76.1	0.96
6.4	7	2.3	92.5	1.31
6.4	8	2.1	84.5	1.2
6.4	9	1.8	72.4	1.16
8.	7	2.4	81.3	1.56
8.	8	2.1	72.7	1.4
8.	9	1.9	64.1	1.34

La figura 18 resume los resultados para un espesor L_1=2mm y un diámetro $2a_1$=4.4mm. Al aumentar la separación entre electrodos mejora la óptica del haz y disminuye la intensidad total transmitida. En este caso, un gap de 6mm es suficiente para asegurar una divergencia de 0.8° permitiendo el paso de 140A.

Este comportamiento cualitativo con la variación del gap es extrapolable a otros diámetros y espesores, como se observa en las tablas, aunque la divergencia del haz y la intensidad varían en rangos distintos. Así por ejemplo, para un espesor dado, diámetros mayores suponen mayor divergencia y menor intensidad transmitida como se observa en la figura 19, en la que se representa para cada diámetro el valor correspondiente al gap que conduce a $\Theta \leq 0.8°$.

Por otro lado, la comparación de las tablas II, III y IV nos llevaría a concluir que un aumento del espesor del primer electrodo resulta en una degradación de las propiedades ópticas del haz, así como de la intensidad transmitida.

Cabría entonces deducir que resulta siempre óptimo perforar un gran número de agujeros de pequeño diámetro, en un electrodo tan delgado como sea posible. Sin embargo, cuando las necesidades de refrigeración obligan a aumentar el espesor del electrodo, resulta, como veremos a continuación, ventajoso para la óptica del haz la mecanización de perfiles adecuados en agujeros de diámetro suficientemente grande como para permitir dicha mecanización.

Para el estudio de los distintos perfiles nos referiremos a la figura 17 donde aparecen representados los diferentes parámetros.

En la tabla V se resumen los perfiles estudiados para un espesor de 3mm : la rejilla 1 es la ya conocida y estudiada en capítulos anteriores. La rejilla 2 tiene la indentación desplazada hacia el centro , y la rejilla 3 tiene una indentación más pronunciada.

TABLA V

REJILLA Nº	L_1 (mm)	l_1 (mm)	α (grados)	l_3 (mm)	l_2 (mm)	grosor 2º electrodo (mm)	grosor 3º electrodo (mm)
1	3	2.1	36.8	0.3	-	3	3
2	3	1.1	36.8	0.3	1	3	3
3	3	0.6	40.9	0.75	1	3	3
4	3	0.6	40.9	0.75	1	6	3
5	3	0.6	40.9	0.75	1	8	3

El comportamiento de estas rejillas se representa en la figura 20: las rejillas 1 y 2 tienen un comportamiento muy parecido, mientras que la número 3 conduce a una disminución importante de la divergencia (0.4 °) y de la corriente extraída.

En la figura 21 se representa el efecto que tiene el espesor del segundo electrodo : un aumento del espesor deteriora la óptica y la transmisión del haz.

Los perfiles correspondientes a un espesor de 4 mm aparecen resumidos en la tabla VI : las rejillas 6, 7 y 8 corresponden como antes a una indentación desplazada y posteriormente aumentada. Los resultados de la figura 22 parecen indicar una mejora notable de la divergencia sin pérdida excesiva de la corriente transmitida.

La figura 23 muestra la influencia del espesor del segundo electrodo. Se aprecia la presencia de un valor mínimo para la Θ_{min} cuando el espesor del 2º electrodo es 10mm.

En la figura 24 se estudia la influencia de un perfil cónico del segundo electrodo, que no afecta a las propiedades ópticas del haz. Se presentan también resultados de la rejilla 14, correspondiente a los inyectores de TEXTOR; se observa una mejora en la divergencia del haz del orden de 0,04°. Esta mejora se atribuye a un perfil del primer electrodo más afilado, ya que barridos en espesor de tercer electrodo demuestran que este parámetro no afecta a la divergencia del haz de modo apreciable.

En resumen, cuando las condiciones térmicas exijan ir a espesores grandes del primer electrodo, el efecto deteriorante en la óptica puede ser compensado con una mecanización adecuada del perfil.

Un grosor igual o inferior a 2 mm no permite mecanización del perfil.

TABLA VI

REJILLA N°	L_1 (mm)	l_1 (mm)	α (grados)	l_3 (mm)	l_2 (mm)	Grosor 2° electrodo (mm)	Grosor 3er electrodo (mm)
6	4	2.9	49	0.3	-	3	3
7	4	1.6	49	0.6	1.1	3	3
8	4	0.7	45	1.6	1.1	3	3
9	4	0.7	45	1.6	1.1	6	3
10	4	0.7	45	1.6	1.1	8	3
11	4	0.7	45	1.6	1.1	10	3
12	4	0.7	45	1.6	1.1	13	3
13	4	0.7	45	1.6	1.1	8 (cónico)	3
14,TEXTOR	4.2	1	45	1.6	1.4	8 (cónico)	4

3.6 COMPARACION CON OTROS CODIGOS

A continuación presentamos una comparación entre nuestra nueva versión de SLAC y el código AXCEL [12], ampliamente utilizado para la simulación de sistemas de extracción y aceleración de iones.

Para realizar este estudio se ha utilizado la geometría de los inyectores de TEXTOR.

En la figura 25 se representa esta geometría con sus trayectorias calculadas con la nueva versión de SLAC.

En la figura 26 se muestran los resultados cuando la Energía utilizada son 50kV, la temperatura iónica 1eV y el promedio de especies H^+, H_2^+, H_3^+ es respectivamente 70%, 20%, 10%.

En el eje de abcisas se ha representado la intensidad total que llega al plano del tercer electrodo, y en el de ordenadas la divergencia Θ_{rms} en dicho plano para cada beamlet. El valor de la densidad de corriente óptima , es decir aquella que nos da una divergencia mínima, dado por ambos códigos es el mismo así como el valor de dicha divergencia mínima. El valor experimental de la densidad de corriente óptima también coincide con los teóricos.

El valor de Θ_{min} experimental difiere en 0,4° con el teórico como era de esperar, pues pasar de un sistema monoapertura a otro multiapertura aumenta la divergencia en valores de ese orden debido tanto a las inhomogeneidades del plasma como a efectos electrostáticos colectivos.

En la figura 27 se han realizado los mismos cálculos para una energía de 40kV. Los valores de las densidades de corriente óptimas son los mismos para los valores calculados teóricamente, independientemente de la temperatura iónica del plasma utilizada en SLAC.

El valor de Θ_{min} teórico dado por SLAC cuando se consideran temperaturas iónicas de 1eV difiere de la dada por AXCEL a la misma temperatura iónica en 0,2° .

La comparación entre el valor de la divergencia mínima experimental y la dada por SLAC cuando la T_i= 1eV vuelve a ser 0,4° por las mismas razones antes expuestas.

Cuando se comparan las diferentes curvas dadas por SLAC para diferentes T_i con los valores experimentales se observa que una T_i =1 eV es el valor más adecuado para representar la realidad.

4. CONCLUSIONES

La introdución de una población de electrones Boltzmann en la región ocupada por el plasma, suaviza el problema del exceso de carga espacial en los primeros ciclos, obteniéndose una convergencia más rápida y una superficie de plasma más realista.

Se ha utilizado esta nueva versión del código para el estudio de la geometría del sistema de extracción de los inyectores de neutros de ATF , que serán utilizados en el stellarator TJ-II del CIEMAT . Los resultados de este estudio permiten concluir :

- Esta geometría es especialmente sensible a la velocidad térmica de los iones, cuya contribución a la divergencia del haz puede ser tan alta como 0,4°, mucho mayor que en el caso de los inyectores de TEXTOR.

- La presencia de las especies moleculares H_2^+ y H_3^+ disminuye la densidad de corriente óptima manteniendo constante la divergencia del haz.

- Un gap acelerador de 7mm resulta óptimo para la extracción de iones en el rango de energías de 30-40 keV.

Se ha realizado un estudio completo del comportamiento de geometrías en un amplio rango de variación de los parámetros característicos . Se ha encontrado que el grosor del primer electrodo es el parámetro de mayor impacto en las propiedades del haz, y que el efecto deteriorante del grosor es parcialmente compensado por un diseño adecuado del perfil de los agujeros. Siempre que la disipación de energía en el primer electrodo no ponga en peligro la calidad del haz por deformaciones mecánicas o producción de impurezas, el óptimo ha de buscarse en electrodos delgados donde se perfora un gran número de agujeros de pequeño diámetro . Por el contrario, para haces intensos que requieran una refrigeración eficiente del primer electrodo, la solución está en electrodos gruesos con agujeros de mayor diámetro que permitan la mecanización adecuada del perfil.

A.1. ESTRUCTURA GLOBAL DEL CODIGO

En la figura 28 aparece el diagrama de flujo del código. A continuación se hace una breve descripción de las principales subrutinas.

ANALYZ : calcula la emitancia

BLOCPT : simula la neutralización de carga espacial creando una región equipotencial con V=VION cuando el potencial es menor que VION.

BOUND : lee los datos de las condiciones frontera del fichero de geometría. Desde aquí se llama a BSET.

BSET : comprueba si hay errores en los puntos del contorno introducidos en el fichero de geometría.

COEF : realiza los ajustes necesarios con los puntos del fichero de geometría para crear la frontera completa. También asigna el mapa de potenciales para la resolución de la ecuación de Poisson correspondiente al primer ciclo. Desde esta subrutina se leen, en caso de que existan, los datos de contorno para fronteras curvas o con una pendiente mayor de 45° .

CHESCOR : cuando se extraen iones negativos se modifica la carga espacial con esta subrutina simulando el efecto que la nube electrónica crea en el mapa de carga espacial. Para ello se utilizan unos coeficientes , que afectarán a la carga espacial previamente calculada, que deben introducirse desde un tercer fichero .

CHILDA : esta subrutina sólo es llamada cuando en el fichero de geometría el parametro START ≠CARDS , es decir cuando no se introduce el fichero de corrientes. Calcula la longitud de la superficie de emisión, el número de rayos que se deben usar, el radio efectivo de curvatura y las condiciones iniciales, todo ello siguiendo un modelo termoiónico.

CHILDB : esta subrutina se usa cuando START = SPHERE, es decir , cuando el cátodo emisor es esférico ó cilíndrico.

CHNEUT : simula la neutralización de carga espacial en los puntos en los que el potencial sea menor que el potencial del electrodo de plasma, asignando a dichos puntos una carga nula y creando una región equipotencial.

CHSELE : cuando extraemos iones negativos, se utiliza esta subrutina para simular la extracción de electrones.

CHSLIS : realiza el alisamiento de carga espacial.

CHSLST : imprime el valor de la carga espacial en el fichero de salida para todos los puntos malla del problema. La escritura la realiza por columnas en bloques de trece valores de Z representando las filas los valores de R comprendidos entre 0 y R_{max} .

DSPROC : calcula las lineas equipotenciales.

EQUIP : calcula el potencial para una Z dada, y la Z a la que se encuentra un potencial dado. Desde aqui se llama a LISTL y DSPROC.

FRAME : escribe en el fichero de gráficos los datos necesarios para dibujar la frontera del problema.

LECBMAG : lee los datos de campo magnético transversal cuando se extraen iones negativos .

LECCHSM : lee los coeficientes de corrección de carga espacial utilizados en CHESCOR.

LISTL : escribe en el fichero de salida las posiciones Z y los potenciales en dichas posiciones.

PERVNC : lee el fichero de corrientes . Desde aquí se llama a THERM.

PLOTS : existen dos formas distintas de calcular las lineas equipotenciales en el código:

1) fijando el valor de Z en que se comienza a buscar la equipotencial .

2) fijando el potencial V que se quiere buscar.

Esta subrutina establece para qué zetas ó para qué potenciales se calcularán las lineas equipotenciales .Desde aquí se llama a EQUIP.

POISSN : resuelve la ecuación de Poisson .

POTLST : imprime el valor del potencial para cada punto de la malla, escribiendo los valores por columnas siguiendo el mismo criterio que CHSLST para la carga espacial.

PROFILE : calcula la divergencia al final del sistema así como la intensiad total que llega.

PRTIAL : calcula el campo eléctrico, es llamada desde la subrutina TRAJCT .

RZP : calcula los coeficientes de ajuste de una curva cuando usamos coordenadas cilíndricas .

SLAC : es la subrutina principal, controla el proceso de convergencia en ciclos, desde aquí se realizan las llamadas al resto de las subrutinas, y SLAC es llamada desde el programa Start.f .

TRAJCT : calcula las trayectorias de las partículas y asigna a los puntos malla, la carga espacial debida a dichas trayectorias.

THERM : incluye el efecto de las velocidades térmicas. Para que esta subrutina sea activada la variable TC, que representa la temperatura iónica en eV , debe de ser distinta de cero.

TYPLST : imprime el valor de la variable TYPE en el fichero de salida para todos los puntos de la malla del problema . La escritura la realiza empleando el mismo criterio que el que CHSLST usa para la carga espacial y POTLST para el potencial.

A2. ESTRUCTURA DE LOS FICHEROS

A continuación se presenta la estructura de los ficheros que intervienen en el código.

A.2.1 FICHERO DE GEOMETRIA

Contiene los parámetros que definen la malla bidimensional, los puntos que definen el contorno (electrodos), los valores de los potenciales en los electrodos, y los parámetros que rigen la neutralización y el cálculo de la carga espacial.

Consta de tres partes :

1º PARTE: leída desde la subrutina SLAC. Consta de los siguientes valores:

A) Título :

Dos líneas de caracteres que especifican el problema a tratar.

B) Parámetros básicos que definen la región :

RLIM : tamaño máximo de la región en la dirección radial, expresada en unidades malla.

ZLIM : tamaño máximo de la región en la dirección axial, expresada en unidades malla.

POTN : Número máximo de potenciales del problema (ver más detalles en "lectura de potenciales") . Determina también la simetría del problema, POTN >0 implica una simetría cilíndrica, POTN<0 una simetría rectangular.

MI : Esta variable da opciones gráficas, sin embargo en nuestro caso la variable está condicionada por el programa gráfico (slacgraf.f) a que dibuje siempre el último ciclo con equipotenciales.

UNIT : metros/malla

NS : número de ciclos

MAGSEG : controla dos de los cuatro métodos de introducir datos de campo magnético. MAGSEG=0 anula dos de las cuatro formas de lectura de campos magnéticos.

INTPA : otro método de lectura de campos magnéticos.

INTPA =TRUE activa el método de lectura, INTPA =FALSE lo desactiva.

C) Potenciales del problema :

En el caso de haces de iones moviéndose entre electrodos (START=CARDS) la asignación del array de potenciales es arbitraria. En otros casos como cátodo fijo o pistola de electrones, se recomienda hacer ciertas asignaciones de la variable POT(N) que aparecen especificadas dentro del código. Forman un array de dimensión POTN . Vienen expresados en voltios.

Si se utiliza como método de neutralización CHSNEU =TRUE, POT(1) deberá ser la superficie de la rejilla de plasma.

D) Variables que controlan el proceso de neutralización de carga espacial :

CHSNEU : Esta es una variable de tipo lógico y en función de su valor se neutralizará la carga espacial de una forma u otra.

CHSNEU=T la neutralización se hace a través de la subrutina CHNEUT. Esta subrutina hace que los puntos de la malla con potencial menor que el potencial de la rejilla de plasma tengan un potencial igual a cero y una carga espacial nula.

CHSNEU =F la neutralización se hace a través de la subrutina BLOCPT. Esta subrutina crea una región equipotencial, haciendo que todos los puntos de la malla con potencial menor que VION posean ahora un potencial de valor igual a VION. VION representa el potencial al que se encuentra el plasma.

IRNEUT : Coordenada R a partir de la cual se realizará la neutralización

LRNEUT : coordenada R hasta donde se realizará la neutralización.

IZNEUT : Coordenada Z a partir de la cual se realizará la neutralización

LZNEUT : coordenada Z hasta donde se realiza la neutralización.

CHSLSS : variable tipo lógico

CHSLSS = T se realizará alisamiento de carga espacial (véase alisamiento de carga espacial en el apartado 2.1.4, "asignación de carga espacial")

CHSLSS =F no se realizará alisamiento de carga espacial.

NLISSR : iteraciones en R, por cada ciclo, para el proceso de alisamiento de carga.

NLISSZ : iteraciones en Z, por cada ciclo, para el proceso de alisamiento de carga.

IRLISS : límite inferior en R dentro del cual se realizará el alisamiento de carga.

LRLISS : límite superior en R donde tendremos alisamiento.

IZLISS : límite inferior en Z donde se realiza el alisamiento de carga.

LZLISS : límite superior en Z donde habrá alisamiento de carga.

2º PARTE : Esta segunda parte es leida desde la subrutina BOUND la cual es llamada desde la subrutina SLAC. En esta parte del fichero se encuentran los datos necesarios para dibujar el contorno del problema, los cuales deberán ser introducidos siguiendo un convenio establecido.

El código genera una malla en dos dimensiones, caracterizados por dos variables R y Z. Los contornos se definen eligiendo determinados puntos característicos sobre el perfil de los electrodos, y dando sus coordenadas en función de los puntos de la malla más próximos. El programa interpola entre dichos puntos, por lo que hay que elegirlos cuidadosamente.

El contorno a definir tiene tramos que pueden ser de dos tipos :

NEUMANN : se conoce la derivada normal del potencial (eje, gaps entre electrodos)

DIRICHLET : se conoce el potencial (electrodos)

La introdución de datos es como sigue :

n : representa el elemento del array POT(n) definido anteriormente, y caracteriza a un tramo del contorno.

R : entero que representa la coordenada R del punto malla

Z : entero que representa la coordenada Z del punto malla.

DELTA R : real, representa la distancia en dirección R desde el punto malla elegido al contorno que se quiere calcular.

DELTA Z : real, representa la distancia en dirección Z desde el punto malla elegido al contorno que se quiere calcular.

A la hora de crear estos puntos existen una serie de criterios a tener en cuenta :

- Los puntos Neumann están situados en lineas de puntos malla, es decir tendrán un valor Delta R=0 ó Delta Z=0. Así mismo el valor n=0.

- Si la distancia, en R o en Z , de un punto del contorno al siguiente es mayor de 1 se produce un ajuste entre esos dos puntos y el que les sigue en el fichero. Este ajuste no es válido para pendientes mayores o iguales que 45°.

- Cuando la distancia de un punto malla al contorno es mayor que la unidad en dirección R se considera Delta R = 2 lo mismo ocurre en la dirección Z.

- si se quiere definir un contorno curvo se indica con el valor n=999, esto indica al código que tiene que leer cuatro coeficientes para un ajuste especial.

- si se quiere finalizar la lectura de datos del contorno se indica con un valor mayor n (distinto de 999) en el campo de potenciales.

3º PARTE : Esta tercera parte es leida desde la subrutina PERVNC la cual es llamada desde la subrutina SLAC. Está formada por un conjunto de parámetros que influyen en el cálculo de trayectorias y de equipotenciales.

MAXRAY : determina el número máximo de trayectorias que pueden ser calculadas .

SPC : permite incluir una fuerza radial hacia fuera en el cálculo de las trayectorias en el primer ciclo, evitando que la superfocalización que producen los campos de vacío, dé lugar a una distribución inicial de carga espacial demasiado alejada de la realidad.

$0 \leq SPC \leq 1$

AV : la carga espacial se promedia los AV últimos ciclos.

AVR : peso para el promedio de los AV últimos ciclos.

START : esta variable determina el método para el comienzo de las trayectorias de las partículas. Nosotros trabajaremos siempre con START=CARDS.Los métodos son :

START=GENERAL las trayectorias parten de un cátodo en el que se asume que se cumple la ley de Child.

START=SPHERE para cátodo esférico

START=CARDS en donde especificamos las condiciones iniciales de cada rayo.

START=GENCARD es una combinación de CARDS y GENERAL.

SAVE : SAVE=1 indica al programa que espere un segundo problema inmediatamente despues del primer problema, y que este segundo problema usará las mismas condiciones de contorno. SAVE=2 permite a un problema usar como condiciones iniciales las condiciones finales de un primer problema.

ICHAMP : indica si se leen los datos magnéticos o no. ICHAMP=0 no lee datos de campo magnético, ICHAMP $\neq 0$ lee datos de campo magnético.

BEND : parámetro para definir el campo magnético.

MAGMLT : parámetro de campo magnético.

VION : Valor del potencial para simular el plasma de la fuente de iones. Ver sección 2.1.5 "neutralización de carga espacial".

MORE : dependiendo de su valor se leen más datos de entrada o no.MORE =1 implica la lectura de más datos de entrada (que sólo se utilizarán en el caso START=CARDS). MORE$\neq$1 ó 2 , no se leen más datos, MORE=2, se lee el valor del radio del primer electrodo y el número total de beamlets.

A.2.2 FICHERO DE CORRIENTES

La elección del parámetro START=CARDS activa el fichero de corrientes descrito a continuación :

Debido a la simetría cilíndrica del problema las trayectorias de los iones estarán contenidas en el plano RZ . El haz de partículas se representa por tanto en 2D a través de un número NRAY de rayos. Cada rayo tiene una energía inicial , E, una posición inicial, R_i, Z_i y una dirección, y transportan una corriente inicial, I_i, que viene determinada por la densidad de corriente, j, y por el área comprendida entre los arcos de circunferencia R_i y R_{i-1} que subtienden un ángulo de un radián.

Debido a la simetría cilíndrica del problema es suficiente con incluir en el fichero los rayos con R>0, para valores de R<0 el código genera los rayos simétricos.

Los datos se introducen por columnas, representando cada una de ellas una variable. Las variables a introducir son :

N° DE RAYO : el n° de rayo caracteriza a los rayos en función de su energía inicial, densidad de corriente o dirección. Este número se utiliza también por el usuario para indicar al programa que la lectura de datos ha terminado,esto ocurre cuando N° de Rayo>MAXRAY. Los Rayos,por otra parte, van siendo numerados por el programa al tiempo que se leen sus condiciones iniciales.

R : Posición inicial radial en unidades malla.

Z : Posición inicial axial en unidades malla.

ENERGIA : Energía cinética inicial de la partícula en eV . En nuestro estudio, el haz de partículas es generado a partir de un plasma. Todo plasma al entrar en contacto con un electrodo tiende a hacerse positivo. La energía inicial de los rayos corresponde a la diferencia de potencial plasma-sheath.

ANGULO : Angulo inicial que el rayo hace con el eje z expresado en radianes.

CORRIENTE :La corriente en microamperios que transporta cada rayo es: $I_i = JOTA * \Delta R(R_i - \frac{\Delta R}{2})$

ΔR= Espaciado entre rayos, expresado en unidades malla.

ANGULO TRANSVERSAL : Angulo normal al plano R-Z expresado en radianes.

PHI : Posición azimutal en radianes.

A2.3 FICHERO DE SALIDA

Consta de tres partes :

1º PARTE : En esta primera parte se reproducen los datos de los ficheros de entrada para su comprobación.

Desde la subrutina SLAC se escriben los datos geométricos de la malla, los potenciales y el número máximo de ciclos. También se presentan los datos de contorno y el modo en el que estos son leidos. Si existe algún error en el fichero de geometría será especificado. Cuando aparece el mensaje "SPECTRAL RADIUS =0.995" el fichero de geometría ha sido leido y no existe ningún error.

A continuación comienza la información sobre los ciclos : Ecuación de Poisson, Trayectorias, Carga espacial.
Al final de cada ciclo se dan las variables "N" y "ERR", donde "N "es el número de iteraciones realizadas por la subrutina Poissn para la solución de la ecuación de Poisson en todos los puntos de la malla. Se realizan iteraciones hasta alcanzar el criterio de convergencia, o hasta que N=50.

El criterio de convergencia es : TERM2 < EPS*ERROR
donde TERM2 representa la máxima diferencia de potencial en los puntos de la malla entre una iteración y la anterior, expresada en voltios y pesada con factores geométricos y con el máximo potencial de la malla. EPS es un parámetro que se fija en la subrutina SLAC. Actualmente EPS=10^{-8} . ERROR es un factor multiplicativo al error permitido en el criterio de convergencia de las iteraciones de resolución de la ecuación de Poissn dentro de un mismo ciclo.

"ERR" es un valor estimativo del error que se comete al finalizar las N iteraciones y viene dado por la máxima diferencia de potencial en voltios pesada con el factor geométrico usado en TERM2.

El primer ciclo, correspondiente a la ecuación de Laplace se corre dos veces, apareciendo seguidos en el output los valores correspondientes de N y ERR.

Antes de los valores del segundo ciclo, desde la subrutina PERVNC se escriben algunos parámetros, parte de ellos han sido explicados en el apartado A.2.1, el resto se explican a continuación:

EQLN : Número de correcciones iterativas que se hacen según se van encontrando los puntos de la linea equipotencial. Estas correcciones evitan una curvatura muy acusada de las equipotenciales. Su valor por defecto EQLN=1 es generalmente adecuado.

EQST :pasos por unidad malla al dibujar las lineas equipotenciales.

EQUIPR: Valor de R en unidades malla a partir de donde se buscan las equipotenciales a ser dibujadas.

IZ1,IZ2,IZS : Valores de Z en unidades mala. Se dibujarán lineas equipotenciales desde IZ1 a IZ2 en intervalos de IZS.

KRAY : Esta variable es considerada solo en los casos en los que TC$\neq$0 (es decir cuando se incluye el efecto de las velocidades térmicas). Su valor puede ser 1, 3 ó 5 y representa el número de rayos en que es divide cada rayo, dado por el fichero de corrientes, para representar la gaussiana de velocidades.

PHILIM :Límite de posición azimutal. En los casos en los que exista simetría cilíndrica PHILIM=0.

ZO, SKAL : Si se tiene un problema de grandes dimensiones en longitud, se puede dividir en dos considerando un primer problema cuyas condiciones finales sean las iniciales el segundo. El origen del gráfico del primer caso será desplazado ZO unidades malla en el nuevo sistema de coordenadas. SKAL es la relacion vieja malla/ nueva malla .

STEP : Es la longitud de cada paso en el cálculo de trayectorias. Se mide en unidades malla y debe de ser menor de la unidad para asegurar una correcta distribución de la carga espacial.

TC : Es la temperatura iónica del plasma en grados Kelvin. Si la variable TC=0 el efcto de las velocidades térmicas queda desactivado.

UNITIN : Pulgadas/unidad malla

ZEND : Las trayectorias son calculadas hasta medio intervalo de malla hacia la derecha del último contorno del problema. En algunos casos en los que una alta resolución es imprescindible esto puede dar lugar a problemas. ZEND obliga a las trayectorias a terminar en un valor de Z determinado, siempre que dicho valor no sea mayor que las dimensiones del contorno.

Las siguientes variables sólo serán consideradas en aquellos casos en los que el efecto del campo magnético sea incluido: BEND, MAGORD, MAGMLT, NELL, NMAG, RMAG, ZMAG.

Las variables que a continuación se especifican sólo serán efectivas cuando el método elegido para iniciar las trayectorias sea distinto de START=CARDS :

BETA2, CL, DENS, HOLD, ORAD, PE, PERVO, RAD, RC, ST, SURFAC, ZC

Seguidamente, y también desde la subrutina PERVNC se escribe el fichero de corrientes.

2º PARTE : Contiene la información relativa a los ciclos desde el segundo en adelante.

3º PARTE : En esta tercera parte del fichero tenemos valores referentes a los rayos al final de su trayectoria así como los valores de las equipotenciales que han sido calculados. En nuestro caso tenemos el parámetro MI=3, es decir se calculan las equipotenciales de los ciclos penúltimo y último.

Las lineas equipotenciales pueden ser calculadas a través de dos métodos :

-Método 1 : fijando la posición en el eje Z inicial, IZ1, y la final, IZ2 , en intervalos IZS. La posición R viene fijada por EQUIPR . En dichas coordenadas el potencial es calculado y la equipotencial comienza a ser trazada.

-Método 2 : se fija el valor del potencial y la posición R donde comienza a ser buscado , definida igualmente por EQUIPR, y el valor de Z será calculado. El potencial vendrá fijado a través del array de potenciales que aparece en el fichero de geometría. Actualmente existe el siguiente criterio, serán calculadas las lineas equipotenciales correspondientes a los siguientes potenciales :

$$\{ \; V_N = N * 0.2 * POT(3)$$
$$N \in (1,5)$$
$$POT(3) \neq 0 \; \}$$

$$\{ \; V_N = \left(0.05 + (N-1) * 0.1 \;\right) * POT(2)$$
$$N \in (1,10)$$
$$POT(2) \neq 0 \; \}$$

Además si se necesita dibujar una linea equipotencial en concreto se utilizará : POT(8), POT(9), POT(10).

Estos criterios son establecidos desde la subrutina PLOTS.

Una vez se ha llamado a la subrutina Poissn en el penúltimo ciclo, serán escritos los valores de las equipotenciales y sus posiciones en Z (para R=EQUIPR). Posteriormente se calculan las trayectorias de este penúltimo ciclo y obtenemos los valores siguientes :

RAY : Valor que caracteriza al rayo desde el inicio de su trayectoria (para densidades de corriente distintas, energías iniciales distintas).

R : Posición radial en unidades malla al final de su trayectoria.

Z : Posición axial en unidades malla al final de su trayectoria .

E : Energía en eV al final de la trayectoria.

ALPHA : Angulo en radianes que forma el rayo con el eje Z en el plano R-Z al final de su trayectoria.

I(K) : Intensidad que transporta el rayo K, donde K es la numeración que el programa hace de los rayos en el orden en que estos van siendo leidos.

ALP : $ARCOTG \dfrac{V_{transversal}}{\sqrt{V_R{}^2 + V_Z{}^2}}$ al final de la trayectoria.

Finalmente llegamos al último ciclo para el cual se especifican los siguientes valores :

RAY, R, Z :explicados anteriormente.

RDOT : Caracteriza a la velocidad del rayo en la dirección R al final de la trayectoria. No tiene unidades y viene definida por : $RDOT = \frac{V_R}{c}$, donde V_R es la componente radial de V dada por:

$$V = c\sqrt{\frac{E_c(E_c + 2mc^2)}{(E_c + mc^2)^2}}$$

E_c =Energía cinética de la partícula en eV

mc^2 =masa de la partícula en eV

ZDOT : Lo mismo que la variable anterior pero en la dirección axial.

TDOT : Lo mismo que la anterior pero en la dirección transversal.

A continuación tenemos los valores de las lineas equipotenciales que serán dibujadas y sus posiciones en Z, correspondientes al último ciclo.

Seguidamente tenemos los resultados de variables que nos ayudan a caracterizar al haz obtenido :

- Número de rayos que llegan al final del sistema

-Corriente en miliamperios al final del sistema

-Densidad de corriente con la que hemos trabajado

-Divergencia Θ_{rms} en grados

-Emitancia en unidades π mrd mm

Estos nuevos conceptos serán más ampliamente explicados en el apartado A2.4 en el que se trata la salida gráfica del código.

En relación con este último ciclo obtenemos también los siguientes valores, referidos siempre al final de las trayectorias de los rayos :

RAY, R, Z, E, ALPHA, I(K), ALP

los cuales han sido comentados para el penúltimo ciclo.

A2.4 SALIDA GRAFICA

La salida gráfica del código consiste en seis gráficas que explicaremos a continuación:

A) TRAYECTORIAS

En esta primera gráfica se representan las trayectorias del último ciclo y las lineas equipotenciales que han dado lugar a dichas trayectorias (por ejemplo Figs. 6 - 9) .

B) DENSIDAD DE CORRIENTE INICIAL

Se representa la densidad de corriente que ha sido leida del fichero de corrientes para cada rayo.

C) EMITANCIA Y PERFIL DEL HAZ

Para analizar la calidad del haz resultante, el código calcula y posteriormente representa gráficamente, la emitancia y el perfil del haz. Sobre estas gráficas aparecen los valores numéricos de la divergencia Θ_{rms} y de la intensidad transmitida al tercer electrodo. Estas gráficas de salida están representadas en la figura 29.

C.1 EMITANCIA

Debido a que existen diferentes definiciones del parámetro "emitancia", es necesario conocer cual es el utilizado por SLAC , y que método de cálculo utiliza.

La gráfica de emitancia consiste en un conjunto de puntos en el espacio de fases (dr/dz, r) representando cada uno de ellos a un rayo al final de su trayectoria.

El tipo de distribución de puntos que resulta es elipsoidal, y el valor que da SLAC como emitancia representa el area de la elipse envolvente que contiene a todos los puntos, siendo todos los puntos solamente aquellos que llegan al final del sistema. Es decir, tenemos un valor de la emitancia en un plano Z determinado. Así mismo una "emitancia total" en donde intervienen todos los rayos del fichero de corrientes es calculada.

El cálculo de la emitancia se efectúa en la subrutina ANALYZ y consiste en un método aproximado :

$$\text{Emitancia} = \frac{3}{2}\pi * 10^5 * unit * \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{ray} I_j \left[(\sum_{i=1}^{ray} I_i * R_i) * \alpha_j - (\sum_{i=1}^{ray} I_i * \alpha_i) * R_j \right]^2}{(\sum_{i=1}^{ray} I_i)^3}}$$

Esta emitancia viene expresada en $\pi * mm * mrd$ y se aproxima al area de la elipse para un gran número de puntos uniformemente distribuidos en el interior de dicha elipse.

C.2 PERFIL DEL HAZ

La gráfica del perfil del haz es calculada en la subrutina "despl" del programa slacgraf.f.

Cuando slacgraf.f es ejecutado, pregunta al usuario la distancia a la que se quiere calcular dicho perfil, DIST.

D) PROMEDIO DE LAS POSICIONES RADIAL Y AXIAL

Finalmente se representan dos gráficas que ayudan a ver la convergencia del proceso con los ciclos. Una de ellas muestra el promedio de las posiciones radiales de todos los rayos que intervienen en el fichero de corrientes frente al número de ciclos realizados.

La segunda gráfica muestra el promedio de las posiciones axiales frente al numero de ciclos hechos.

A.3. VARIABLES DEL CODIGO

Las variables mas representativas que aparecen en el código clasificadas por subrutinas son :

BOUND

BOND1(K) : elemento del array POT(N) del punto malla K unidimensional del contorno.

BOND2(K) : coordenada R del punto malla K, en unidades malla.

BOND3(K) : coordenada Z del punto malla K, en unidades malla.

DBOND1(K) : distancia en dirección R desde el punto malla elegido al contorno que se quiere calcular.

DBOND2(K) : distancia en dirección Z desde el punto malla elegido al contorno que se quiere calcular.

Si la variable BOND1(K)=999 la variable lógica MAD se hace igual a TRUE, con lo que la subrutina COEF leerá contornos curvos.

RH(LLL) : carga espacial del punto malla LLL.

El espacio dentro del contorno problema está formado por un número determinado de puntos malla. Dichos puntos se enumeran comenzando por la primera columna y la primera fila desde el eje hacia arriba hasta el final. A continuación seguimos por la segunda columna y así sucesivamente. Tenemos así una distribución unidimensional del espacio malla.

La carga espacial y el potencial se calculan en dicha distribución unidimensional del problema. Estas variables así como otras que se calculan en este espacio unidimensional de puntos malla, se definen como arrays cuya dimensión vendrá limitada por el valor ARM.

Otras variables (DBOND1, DBOND2,BOND1...) se definen unicamente en puntos utilizados para definir el contorno del problema. Existe así otra numeración unidimensional de puntos malla que rodea todo el contorno del problema. BNO es el número total de puntos utilizados para dibujar el contorno.

ARB : máximo numero de puntos malla para definir el contorno del problema.

ARZ : máximo número de columnas del problema .

ARR : máximo número de filas del problema.

ARRA : máximo número de rayos .

ARM : máximo número de puntos malla que se pueden encontrar dentro del contorno.

NTOP : número total de puntos malla usados.

IRM (I) : máximo valor que la R, en unidades malla, alcanza en la columna I .

IRS(I) : número total de puntos malla usados , contados en una dimensión, hasta llegar a la columna I, sin contar los que se encuentran en dicha columna I.

TYPE(K) : K nos da el punto malla, en una dimensión, del problema comenzando por la primera columna subiendo en la dirección R hasta el final, entonces se pasa a la siguiente columna. La variable TYPE(K) nos da dos tipos de valores :

1) si K $\in$ contorno, nos da el orden que dicho punto K ocupa en una numeración en la que sólo consideramos puntos pertenecientes al contorno.

2) si K$\notin$ contorno, nos da el valor de la posición R, en unidades malla, de dicho punto K.

FRAME

I3N : valor de referencia para la lectura de los datos gráficos para dibujar el contorno del problema en la gráfica que en donde se muestran los electrodos y las trayectorias de las partículas.

LIST

I7N : valor de referencia para el programa slacgraf.f acerca del orden que debe seguir en la lectura de datos gráficos. La unidad 8 es la que contiene dichos datos. En esta subrutina están los datos necesarios para dibujar las equipotenciales.

PERVNC

XO(1,K) : posición radial inicial del rayo K en unidades malla .

XO(2,K) : posición axial inicial del rayo K en unidades malla .

VV(K) : energía cinética inicial del rayo K

LL(K) : ángulo normal al plano RZ que forma el rayo K inicialmente .

AL(K) : ángulo con el eje Z en el plano RZ del rayo K .

XO(4,K) : velocidad radial del rayo K .

XO(5, K) : velocidad axial del rayo K.

AMPS : sumatorio de las intensidades de todos los rayos que forman el fichero de corrientes, expresada en microamperios.

LAM : mc^2 , expresada en ev.

PLOTS

FZ : posición axial,en unidades malla, en la que será calculado el potencial que nos servirá para dibujar la linea equipotencial.

F : valor , en voltios, del potencial cuya curva será dibujada.

PROFILE

Z9(L) : posición Z final , de los rayos que llegan al final del sistema; se expresa en unidades malla.

MU(L) : intensidad de los rayos que llegan al final del sistema,se expresa en microamperios.

A9(L) : ángulo que forman los rayos con el eje Z en el plano RZ de los rayos que llegan al final del sistema, se expresa en radianes.

R9(L) : posición radial , en unidades de malla, de los rayos que llegan al final del sistema.

N : número total de rayos que llegan al final del sistema.

TETRMS : divergencia rms de todos los rayos expresada en grados y medida en el plano final del sistema.

SLAC

IRMM : máximo valor de R, expresado en unidades malla, de todo el problema.

MPOT : máximo valor del potencial, expresado en voltios, de todo el problema.

NL : número de ciclos que quedan por hacer del total NS .

NS : números de ciclos tal comienzo del problema.

NITER : número de ciclos realizados.

U(K) : potencial, expresado en voltios , del punto malla K.

TRAJCT

RZX (IJ): coordenadas del eje X que se mandan al fichero gráfico para trazar la trayectoria del rayo K IJ$\in$(1,L) , donde L es el número total de puntos a dibujar.

RZY(IJ) : coordenadas del eje Y de los puntos que se utilizan para dibujar el rayo K.

$$\text{KZ2}: \ddot{Z} = \sigma(1-v^2)^{\frac{1}{2}}\left[-E_z(1-\dot{Z}^2)+\dot{Z}\dot{R}E_r+\dot{Z}\dot{A}E_\varphi - c\dot{R}B_\varphi + c\dot{A}B_r\right]$$

$$\text{KR2}: \ddot{R} = \sigma(1-v^2)^{\frac{1}{2}}\left[-E_r(1-\dot{R}^2)+\dot{Z}\dot{R}E_z+\dot{R}\dot{A}E_\varphi + c\dot{Z}B_\varphi + c\dot{A}B_z\right]+\frac{\dot{A}^2}{R}$$

$$\text{KT2}: \ddot{A} = \sigma(1-v^2)^{\frac{1}{2}}\left[-E_\varphi(1-\dot{A}^2)+\dot{Z}\dot{A}E_z+\dot{R}\dot{A}E_r - c\dot{Z}B_r - c\dot{R}B_z\right]-\frac{\dot{R}\dot{A}}{R}$$

$$\sigma = \frac{e*5.11*10^5}{mc^2}$$

A.4. COMO UTILIZAR EL CODIGO

SLAC , escrito en FORTRAN 77 , está implementado en el CIEMAT, en el ordenador CRAY J 90 con 16 procesadores.

Una "ejecución" típica requiere una memoria de 0.511 MegaPalabras y un tiempo de CPU de 1.18 minutos. La libreria gráfica utilizada es CA Disspla.

El funcionamiento del código requiere la presencia de tres programas fortran:

start.f : desde donde se lanzan al usuario preguntas acerca de las opciones de cálculo.

slacmain.f : contiene todas las subrutinas, y realiza los cálculos principales del código.

slacgraf.f : se encarga de la representación de gráficos.

Las versiones ejecutables de los programas anteriores, se crean mediante :

gslacgraf: compila el programa slacgraf.f y crea su ejecutable.

gslac: compila los programas start.f y slacmain.f, crea el ejecutable.

Slac puede utilizarse de tres formas distintas: totalmente interactivo, semi-interactivo , y en Batch .

A) TOTALMENTE INTERACTIVO

1° / se da la orden :

slac.out

El programa comienza a ejecutarse, y aparecerán en pantalla las siguientes preguntas:

¿nombre del fichero de geometría ?

¿densidad de corriente ?

¿número de rayos por malla ?

¿Energía inicial de los iones ?

¿Quiere incluir el efecto de la T_i ?

¿quiere relajación del potencial ?

¿Quiere relajación de carga espacial ?

Y una vez realizados todos los ciclos, el programa preguntará:

¿quiere volver a empezar?

2°/ El fichero de gráficos creado es graph.data. Para lanzar el fichero gráfico se debe correr slacgraf, para ello se debe dar la orden :

sh slacgraf

En el proceso el programa pregunta por el número de rayos que se quieren dibujar (siempre un número menor o igual que el dado por el fichero de corrientes) y a qué distancia se calcula el perfil del haz.

B) SEMI-INTERACTIVO

Debemos utilizar el fichero de comandos "slac" para ejecutarlo. La orden que se debe dar es :

sh slac nombre fichero de geometría nombre fichero de corrientes nombre fichero salida

En dicho fichero de comandos, "slac", están dadas las respuestas a las preguntas que el código hace (a excepción de las que introducimos como argumentos) y para modificarlas se debe editar "slac". Si no damos argumentos, los ficheros por defecto que se usan son : "montse21.data", "axc330.dat" y "salida". Al lanzar "slac", el programa de gráficos es también ejecutado.

C) EN BATCH

Para ejecutar el código en batch se utiliza el fichero de comandos "bslac". Se deben introducir en dicho programa los nombres de los ficheros de geometría, de corrientes y de salida que quieran ser usados. La orden que se debe usar es :

qsub bslac

El programa gráfico puede ejecutarse posteriormente mediante la sentencia :

sh slacgraf

REFERENCIAS

[1] W. B. Hermannsfeldt, SLAC-226, UC-28 (Noviembre 1979)

[2] A. T. Forrester, "Large Ion Beams, Fundamentals of Generation and Propagation ", John Wiley &Sons, 1988, p. 7

[3] W. D. Kilpatrick, Rev. Sci. Instrum. **28** , 824 (1957)

[4] J. R. Coupland, T. S. Green, D. P. Hammond, and A. c. Rivière, " A Study of the Ion Beam Intensity and Divergence Obtained from a Single Aperture Three Electrode Extraction System " , Rev. Sci. Instrum. **44,** 1258 (1973).

[5] A. Septier, "Focusing of Charge Particles" Volume I, Academic Press 1967, p. 46

[6] Ian G. Brown , "The Physics and Technology of Ion Sources " John Wiley & Sons 1989, p.12

[7] Ian G. Brown , "The Physics and Technology of Ion Sources " John Wiley & Sons 1989, p. 118

[8] K. Hayashi, T. Sugawara, "Concurrent correction of ion and electron space charge in ion beam simulation code " , proceedings of the 12th Symposium on Fusion Technology 1982 , p.1343

[9] M. M. Menon et al., "Development of the Ion Source for PDX Neutral Beam Injection", 8th Symposium in Engineering Problems of Fusion Research, 656, (1979)

[10] L. R. Grisham et al.," Effect of Emission Aperture Shape upon Ion Optics", Rev. Sci. Instrum. , **48**., 1037 (1977)

[11] Joint Development Committee Meeting. JDC 2/95 Ciemat, Madrid, Nov, 1995, Eur-Ciemat 31 (1996), p. 63

[12] Detlef Ivens, Peter Spadtke, "AXCEL - INP USER MANUAL " 1994

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Influencia del Gap acelerador para la geometría inicial de ATF a 40keV con y sin mezcla de especies, sin temperatura iónica, con nube electrónica.

Tabla II. Dependencia de la divergencia y de la intensidad transmitida hasta el plano del tercer electrodo con el diámetro de apertura del primer electrodo y con el gap de aceleración. Grosor del primer electrodo =2mm . Energía = 40kV. Sin mezcla de especies.T_i =0 .

Tabla III Dependencia de la divergencia y de la intensidad transmitida hasta el plano del tercer electrodo con el diámetro de apertura del primer electrodo y con el gap de aceleración. Grosor del primer electrodo =3mm . Energía= 40kV . Sin mezcla de especies.T_i =0.

Tabla IV Dependencia de la divergencia y de la intensidad transmitida hasta el plano del tercer electrodo con el diámetro de apertura del primer electrodo y con el gap de aceleración. Grosor del primer electrodo =4mm . Energía= 40kV . Sin mezcla de especies.T_i=0.

Tabla V Parámetros geométricos para las rejillas 1, 2, 3, 4, 5

TablaVI Parámetros geométricos para las rejillas 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Fuente de iones y sistema de extracción del haz.

Fig. 2. Sistema de extracción del haz .Las superficies Neumann se muestran con lineas discontínuas, las Dirichlet con tramo continuo.

Fig.3. Distribución de potenciales en la región de transición plasma-primer electrodo

Fig.4. Diagrama de flujo simplificado del código.

Fig.5. Geometría de los inyectores de ATF con las lineas equipotenciales del primer ciclo (resolución de la ecuación de Laplace) .

Fig.6. Trayectorias de iones en las condiciones dadas por la figura anterior.

Fig.7. Trayectorias de iones cuando se ha alcanzado la convergencia (28 ciclos) con j= 100 mA/cm^2 .

Fig.8. Idem. Caso j=330 mA/cm^2 .

Fig.9. Idem. Caso j=450 mA/cm^2 .

Fig.10. Intensidad Total (de todos los beamlet) transmitida hasta el plano final del sistema y divergencia para un barrido en j . Potencial de aceleración V=40kV, Gap=7mm sin especies, sin T_i ,con e- .Para éste y todos los cálculos posteriores, salvo que se especifique lo contrario , se consideran : E_i =20eV, como energía inicial de los iones, V_1 = 100V, como potencial del primer electrodo, V_p=50V, como potencial de la superficie de plasma y VION=50V .

Fig. 11. Comparación de resultados obtenidos con y sin simulación de la región del "sheath". Barrido en potenciales de aceleración para un gap =7mm, T_i=0, sin mezcla de especies.

11a. : divergencia óptima.

11b. : densidad de corriente óptima.

Fig.12. Perveancia del sistema de extracción de ATF con las mismas condiciones de la figura 11.

Fig.13. Influencia de la velocidad térmica de los iones.

13a : Geometría ATF, 80% 10% 10% ,V_p=80V, V_1=160V, E_i=80eV, incluyendo e-.

13b : Geometría TEXTOR ,70% 20% 10% , V_p=80V,V_1=160V , E_i=50eV, incluyendo los e-.

Fig.14. Influencia de la mezcla de especies moleculares H^+, H_2^+, H_3^+, para la geometría de ATF, con un gap= 7mm, T_i=0, con simulación del sheath.

14a : Divergencia óptima en función del potencial de aceleración.

14b : Densidad de corriente óptima en función del potencial de aceleración.

Fig.15. Influencia del gap en las propiedades del haz para la geometría de ATF. T_i=0, sin mezcla de especies, con simulación del sheath.

15a : Divergencia óptima en función del potencial de aceleración.

15b : Densidad de corriente óptima en función del potencial de aceleración.

Fig.16. Superficie de extracción utilizada en los estudios de optimización de la geometría; los agujeros perforados en el electrodo circular de radio R = 15 cm tienen diámetro variable, pero la separación entre ellos b = 1 mm se ha mantenido constante.

Fig.17. Parámetros que definen la geometría de la rejilla de plasma.

Fig.18. Dependencia de las propiedades ópticas del haz con el gap, para un espesor fijo de 1er electrodo L_1= 2 mm y un valor fijo del diámetro $2a$=4,4mm. V= 40kV.

Fig.19. Dependencia de la intensidad total transmitida con el diámetro de los agujeros, para dos espesores del 1er electrodo : L_1= 2mm y 3mm. V= 40kV

Fig.20. Comparación de distintos perfiles de agujero para un espesor de 1er electrodo L_1= 3mm. V=40kV, d=7mm, $2a$=4,4mm.

Fig.21. Comparación de geometrías con distintos espesores de 2° electrodo. L_1=3mm. d= 7mm, $2a$=4,4mm.

Fig.22. Comparación de distintos perfiles de agujero para un espesor de 1er electrodo L_1= 4mm . V=40kV, d=8mm.

Fig.23. Influencia de la geometría del 2° electrodo para L_1= 4mm, V=40kV, d=8mm, $2a$= 8mm.

Fig.24. Efecto de un 2° electrodo cónico para L_1=4mm, V=40kV, d=8mm, $2a$= 8mm.

Fig.25. Geometría del sistema de extracción de los inyectores de TEXTOR. Trayectorias calculadas para V=40kV, j= 150mA/cm^2.

Fig.26. Comparación de resultados experimentales y los teóricos dados por SLAC y AXCEL, para la geometría de los inyectores de TEXTOR .V=50kV.

Fig.27. Comparación de resultados experimentales y los teóricos dados por SLAC y AXCEL, para la geometría de los inyectores de TEXTOR.V=40kV.

Fig.28. Diagrama completo de flujo del código.

Fig.29. Salida gráfica que representa la Emitancia y el perfil del haz en el plano final del sistema para la geometría representada en la figura 25 con V= 40kV , j=150mA/cm^2.

29a : Emitancia

29b : Perfil del haz

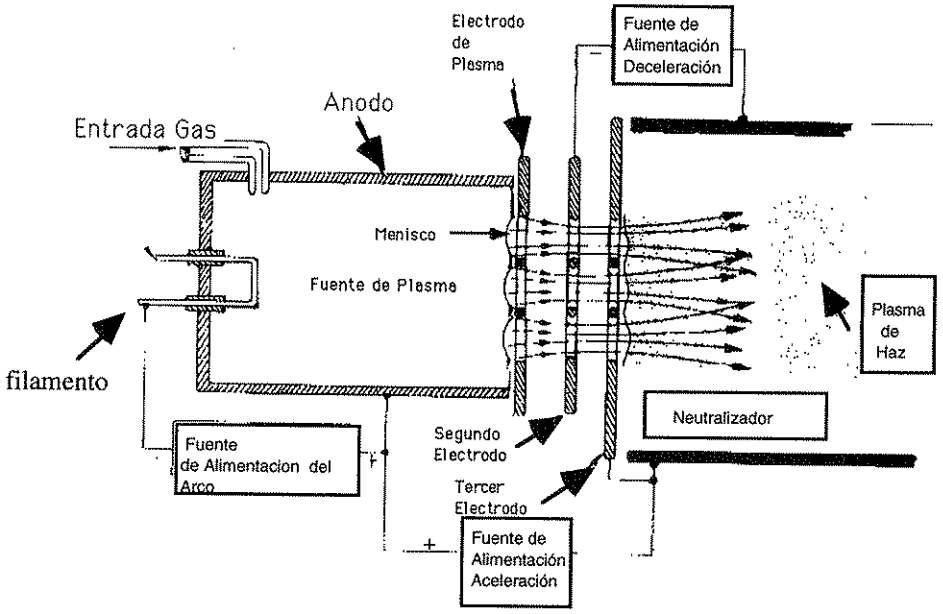

Electrodo
de
Plasma
Fuente de
Alimentación
Deceleración
Anodo
Entrada Gas
Menisco
Fuente de Plasma
Plasma
de
Haz
filamento
Neutralizador
Fuente
de Alimentacion del
Arco
Segundo
Electrodo
Tercer
Electrodo
Fuente de
Alimentación
Aceleración

Fig. 1

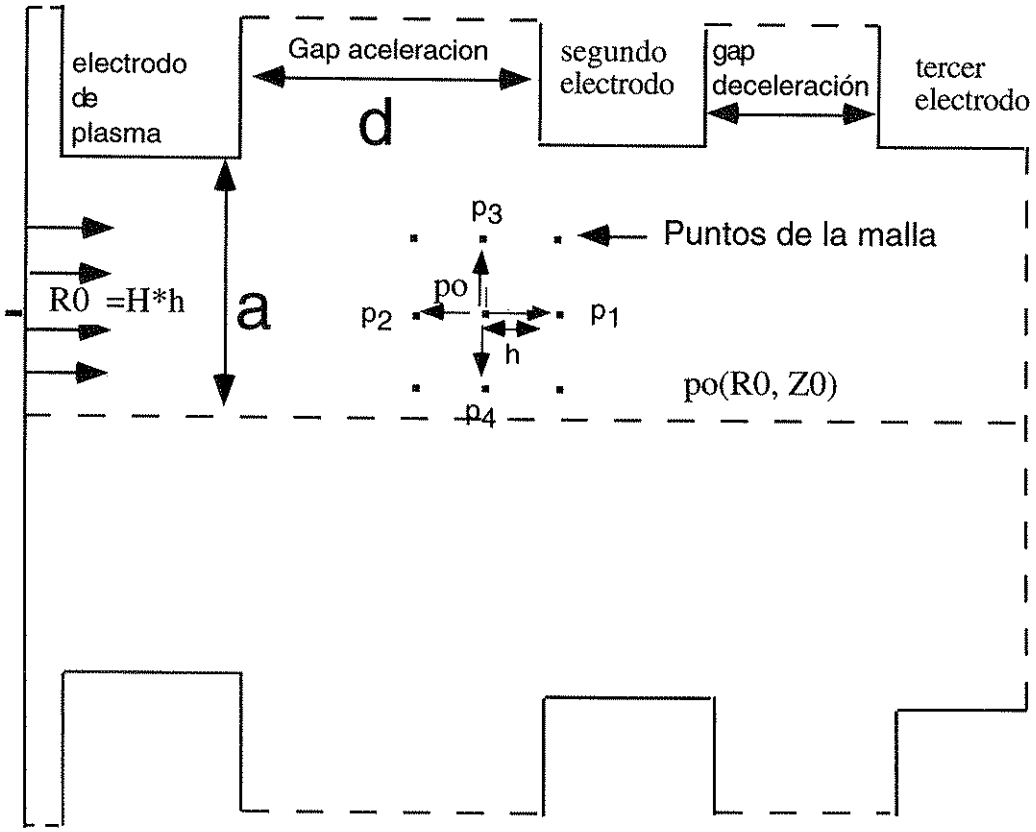

electrodo
de
plasma
Gap aceleracion
d
segundo
electrodo
gap
deceleración
tercer
electrodo
p3
Puntos de la malla
R0 =H*h
a
po
p2
p1
h
po(R0, Z0)
p4

Fig. 2

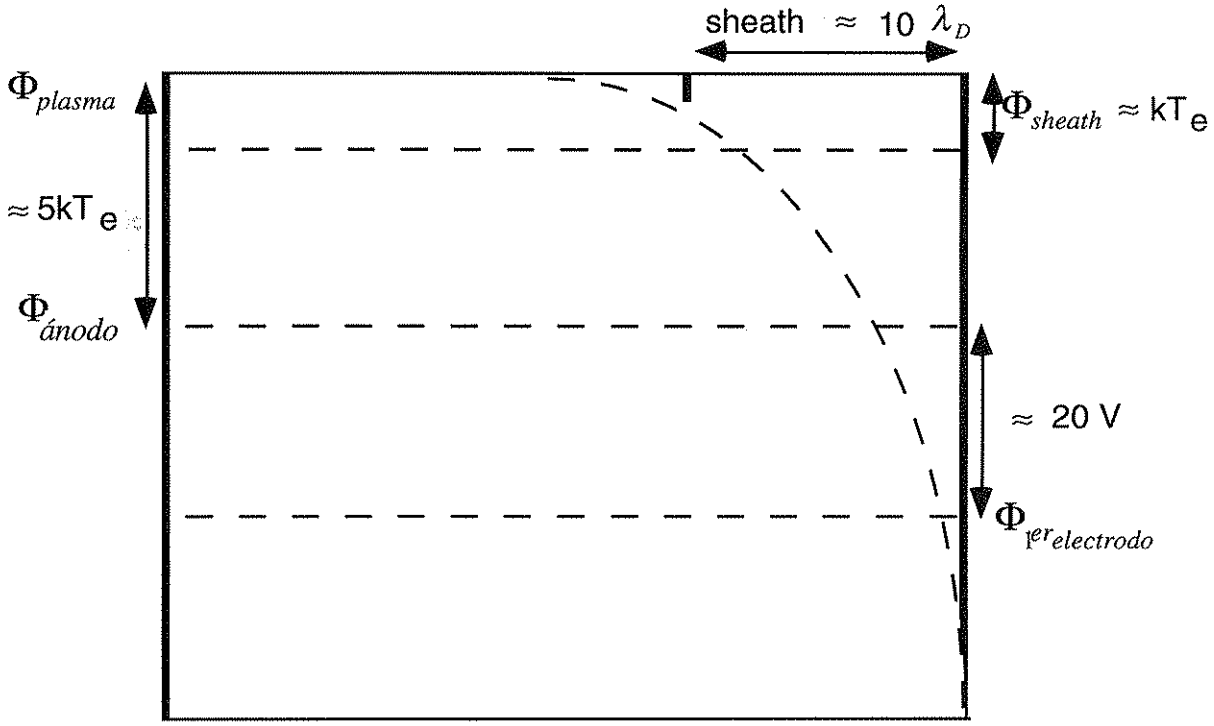

sheath ≈ 10 λ_D
Φ_{plasma}
≈ 5kT e
$\Phi_{ánodo}$
Φ_{sheath} ≈ kT e
≈ 20 V
$\Phi_{er\,electrodo}$

Fig. 3

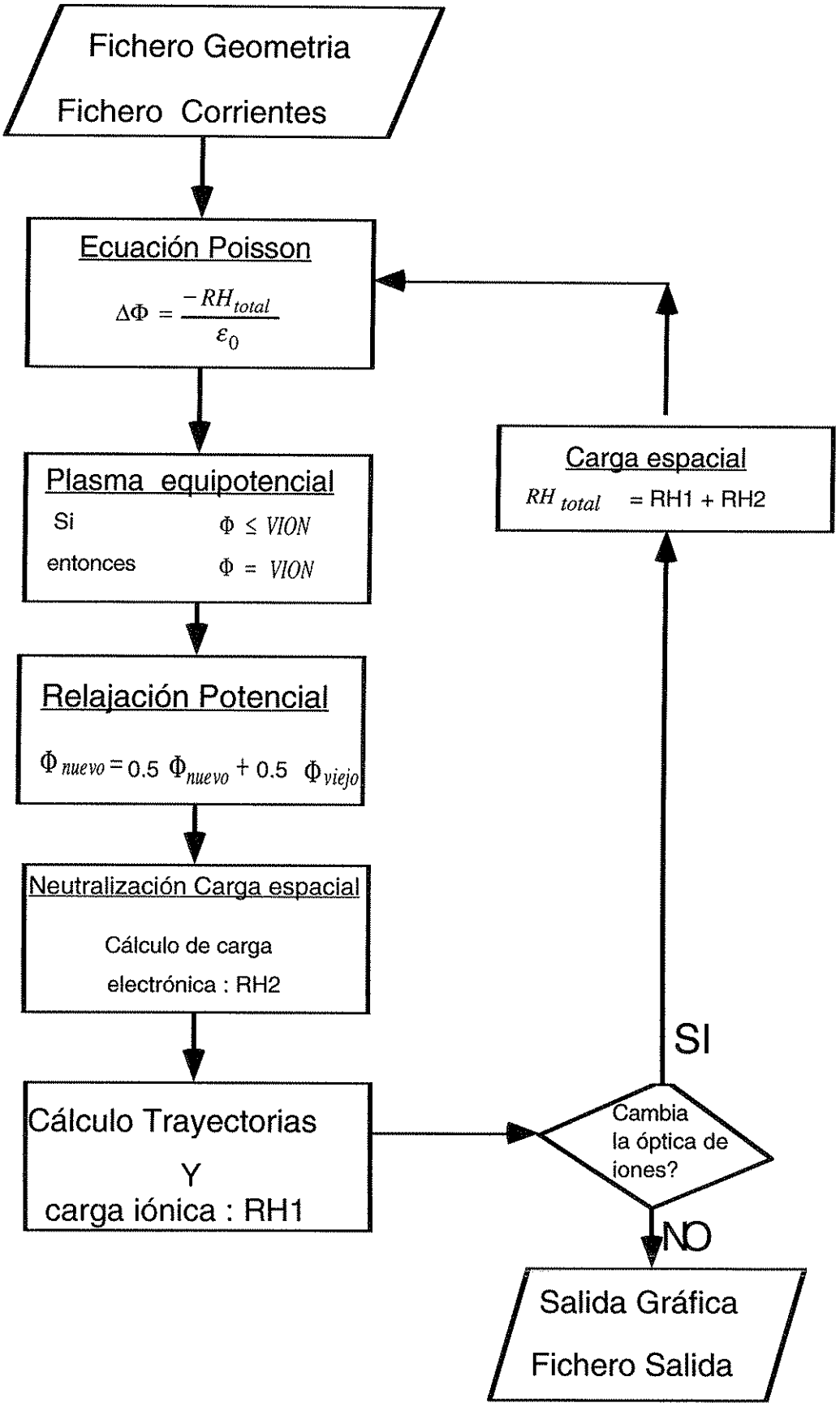

Fichero Geometria
Fichero Corrientes
Ecuación Poisson
$\Delta\Phi = \frac{-RH_{total}}{\varepsilon_0}$
Plasma equipotencial
Si $\Phi \leq VION$
entonces $\Phi = VION$
Relajación Potencial
$\Phi_{nuevo} = 0.5\ \Phi_{nuevo} + 0.5\ \Phi_{viejo}$
Neutralización Carga espacial
Cálculo de carga
electrónica : RH2
Cálculo Trayectorias
Y
carga iónica : RH1
Cambia
la óptica de
iones?
SI
NO
Carga espacial
RH_{total} = RH1 + RH2
Salida Gráfica
Fichero Salida

Fig. 4

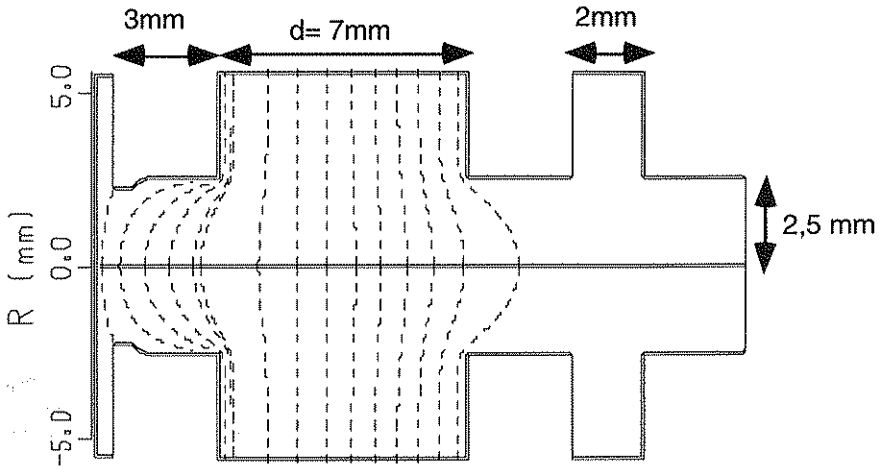


Fig. 5

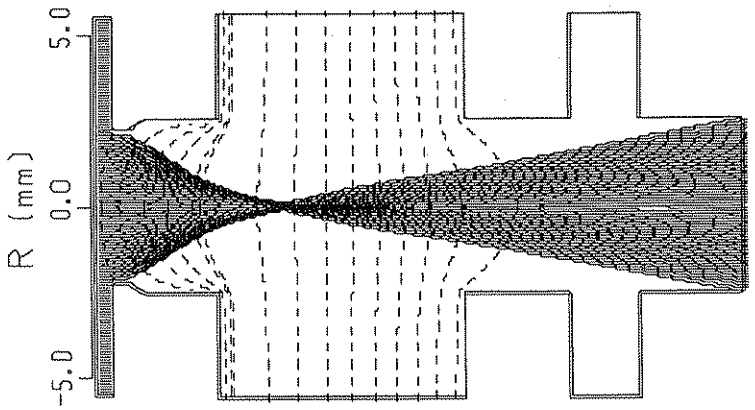


Fig. 6

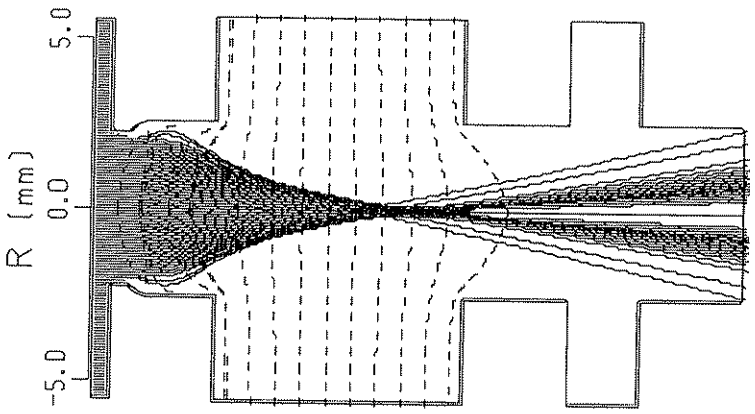


Fig. 7

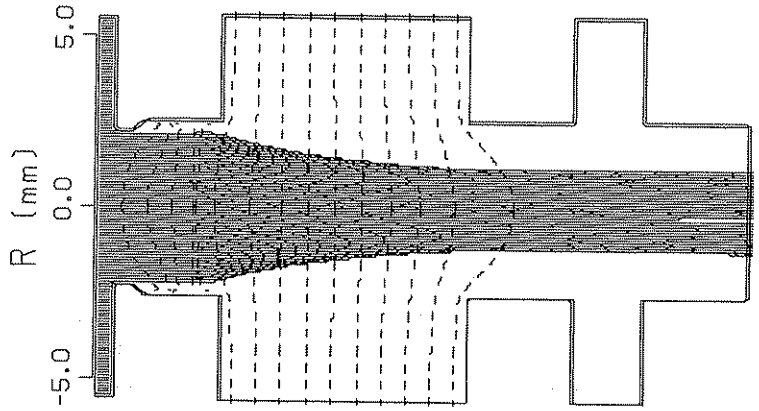


Fig. 8

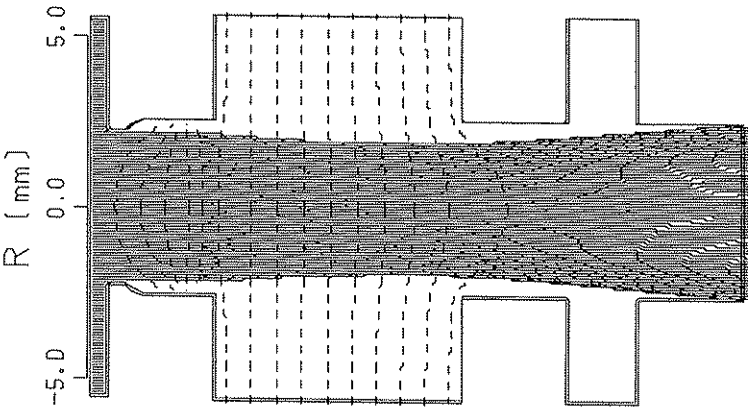


Fig.9

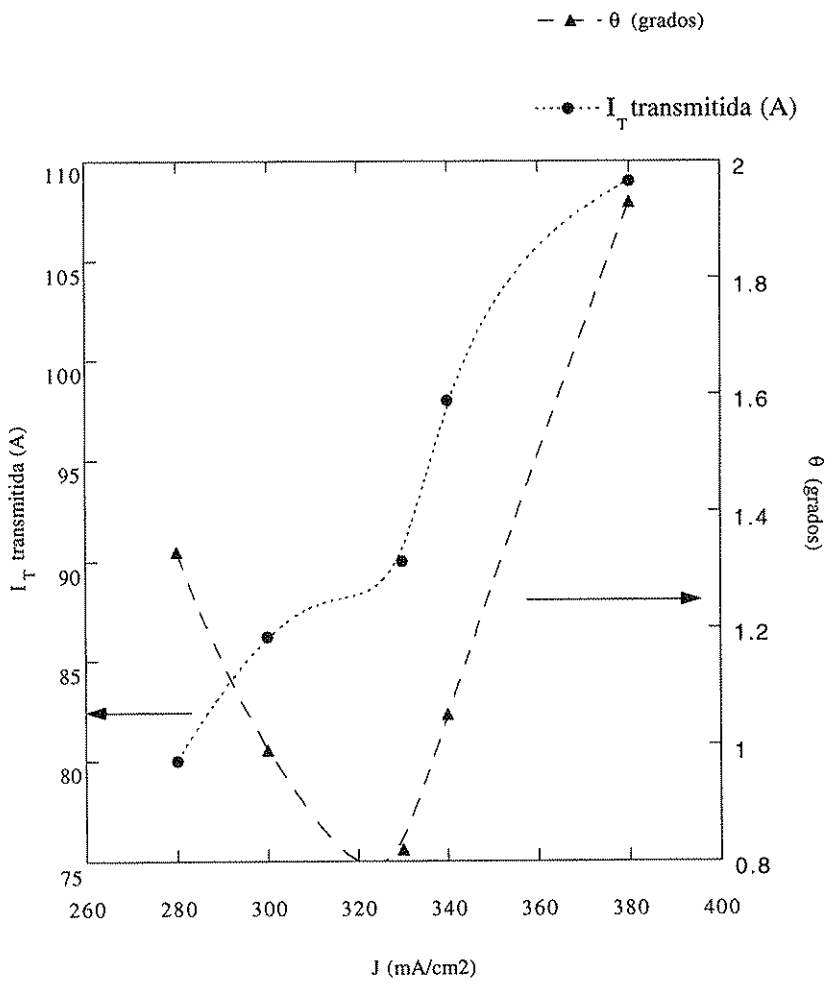

θ (grados)
I_T transmitida (A)
110
105
100
95
90
85
80
75
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
260
280
300
320
340
360
380
400
J (mA/cm2)
I_T transmitida (A)
θ (grados)

Fig. 10

Efecto de los electrones en la divergencia

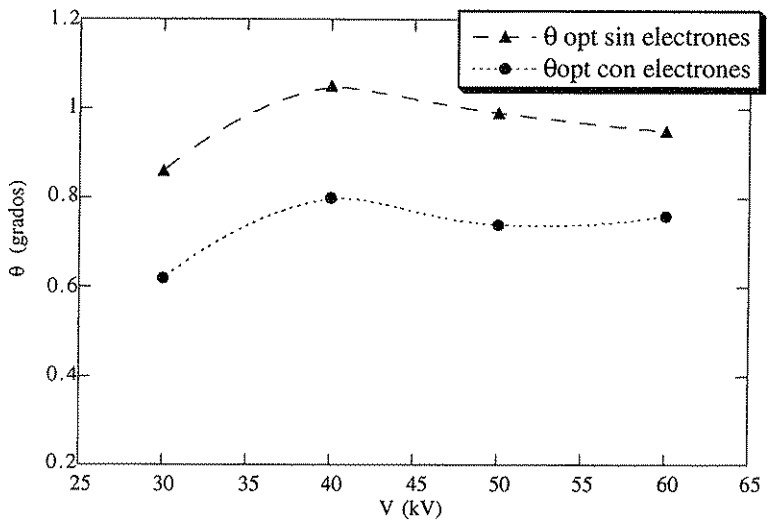


Fig. 11a

Influencia de los electrones en la densidad de corriente óptima

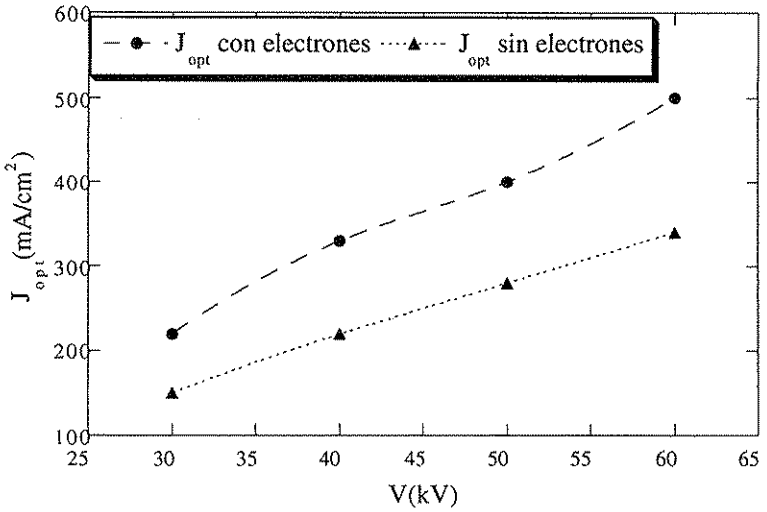


Fig. 11b

Perveancia

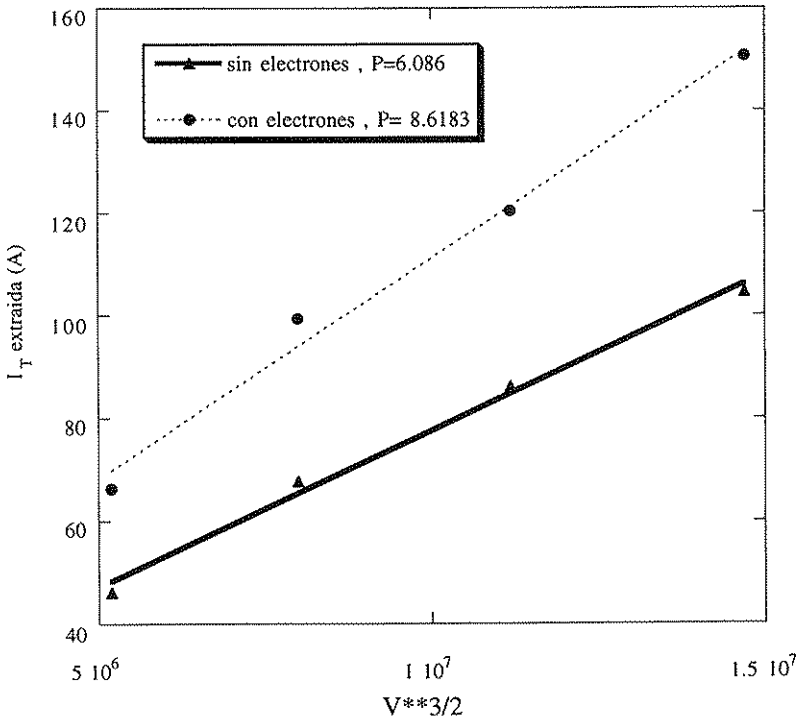


Fig. 12

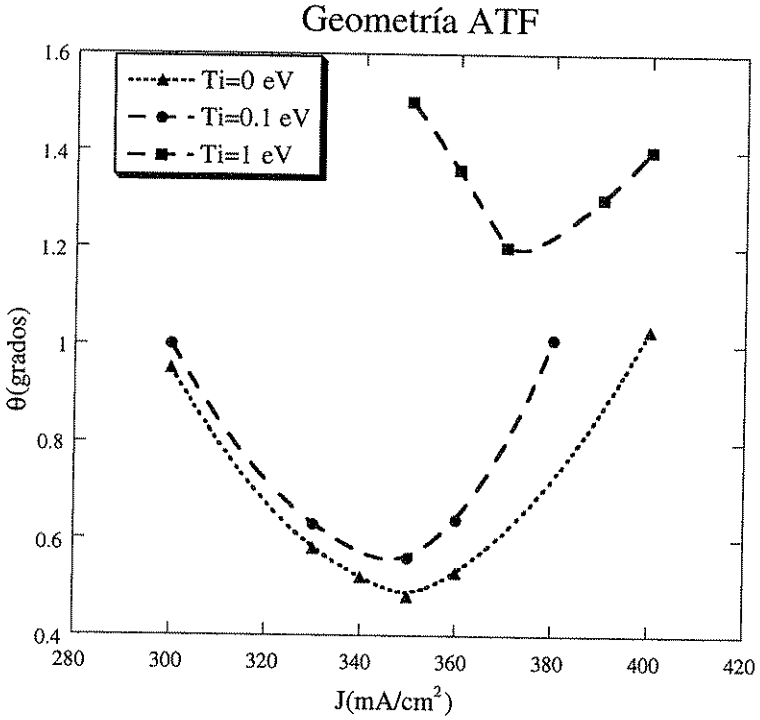


Fig.13a

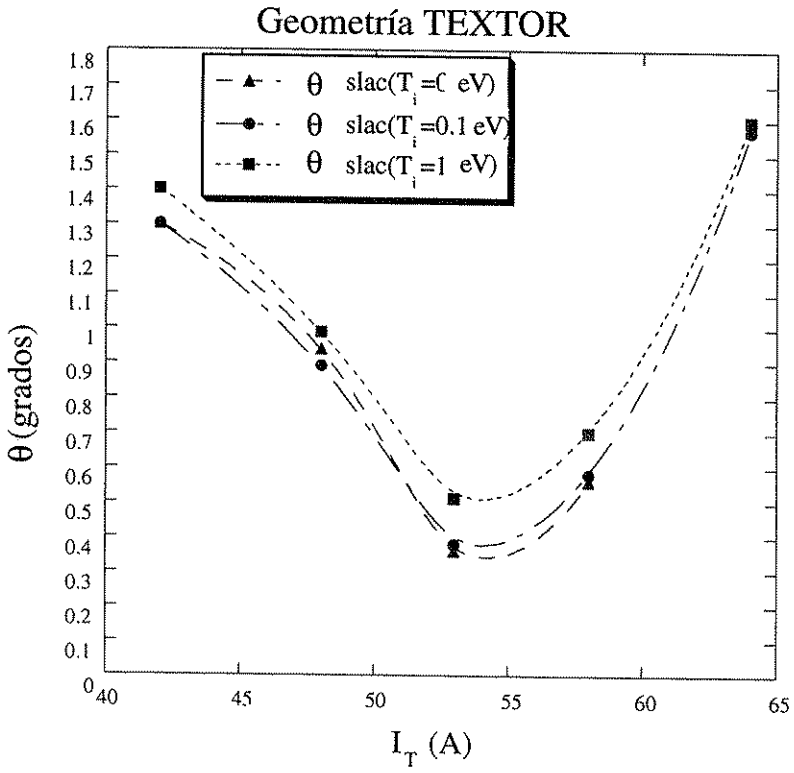


Fig.13b

Influencia de las especies en la divergencia

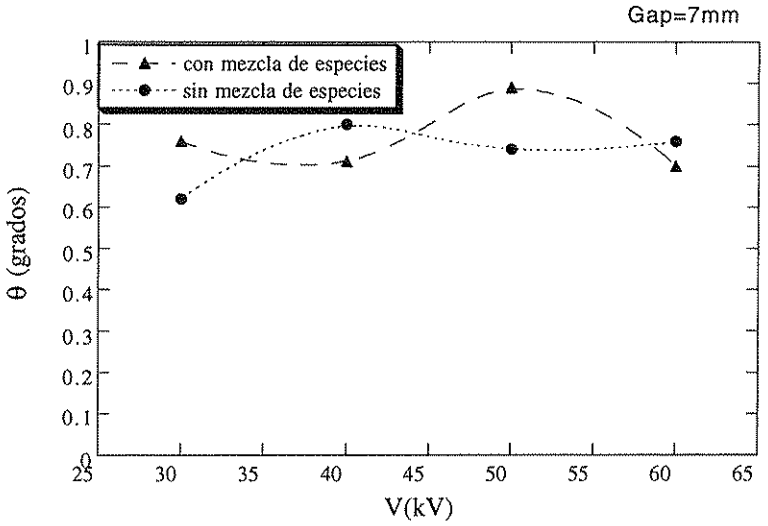


Fig 14 a

Influencia de las especies en la densidad de corriente óptima

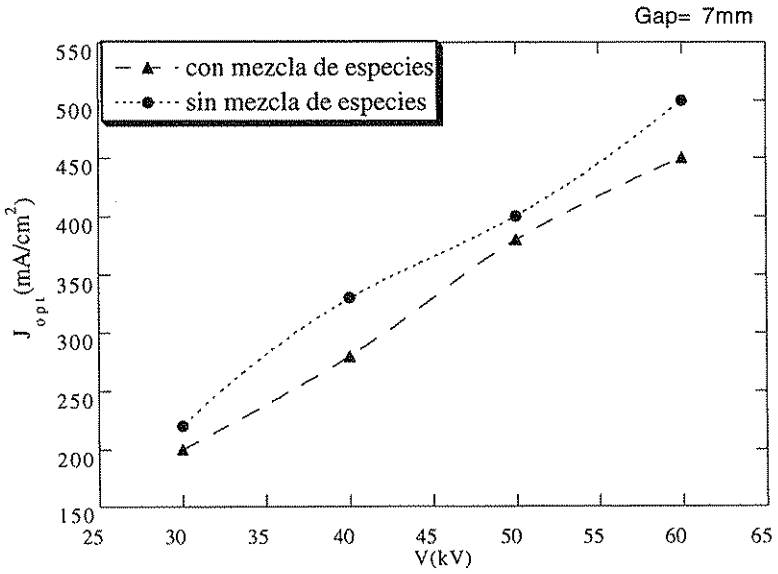


Fig. 14b

Influencia del gap en la divergencia

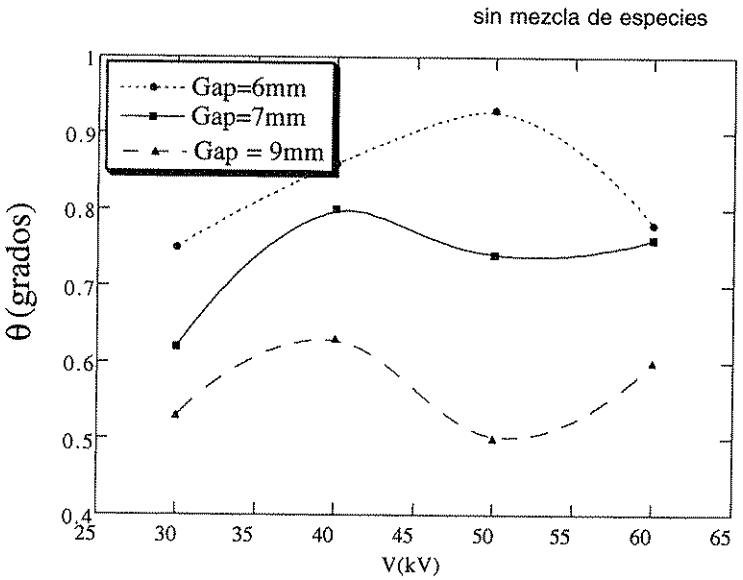


Fig. 15 a

Influencia del Gap en la densidad corriente óptima

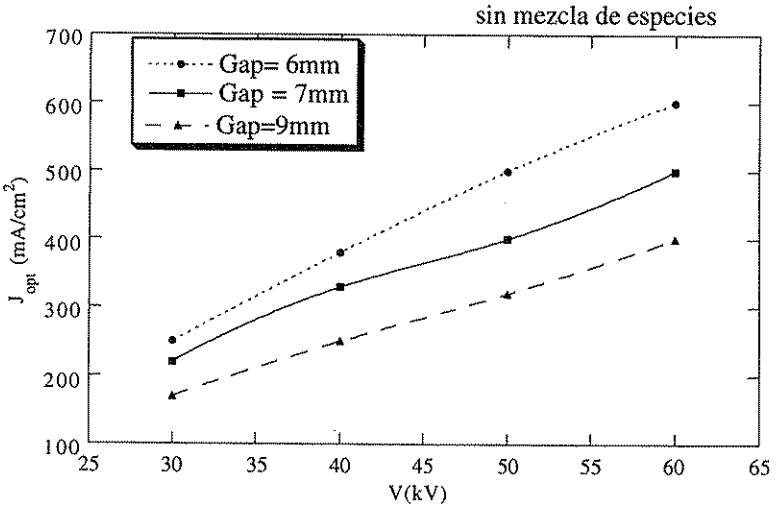
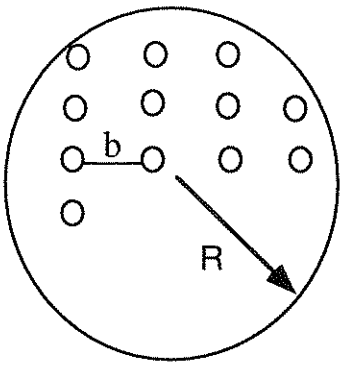


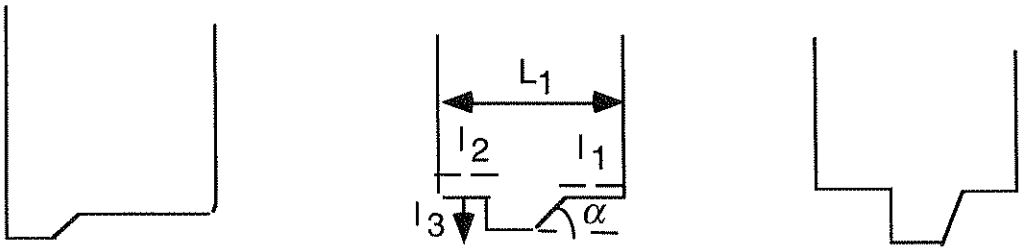
Fig. 15 b



b = 1mm

R = 15 cm

Fig. 16



(a) (b) (c)

Fig. 17

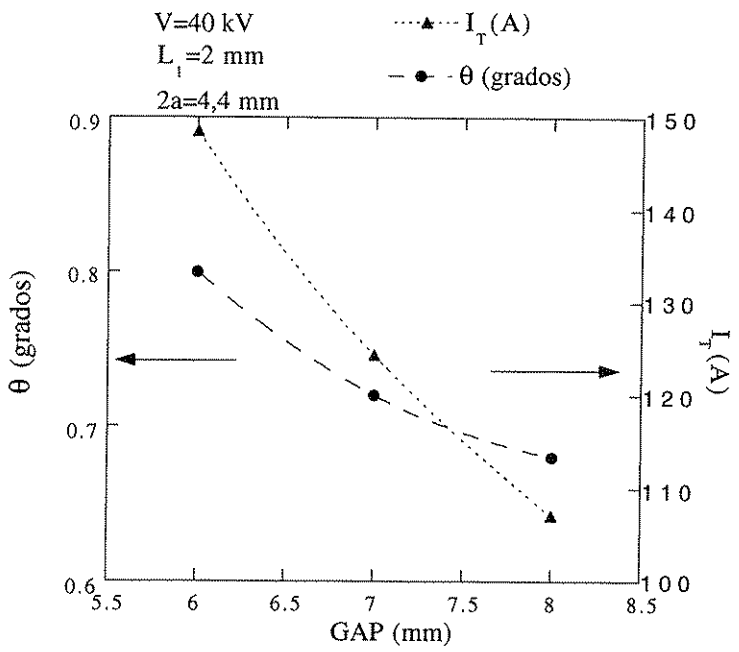


Fig. 18

THETA=0.8°

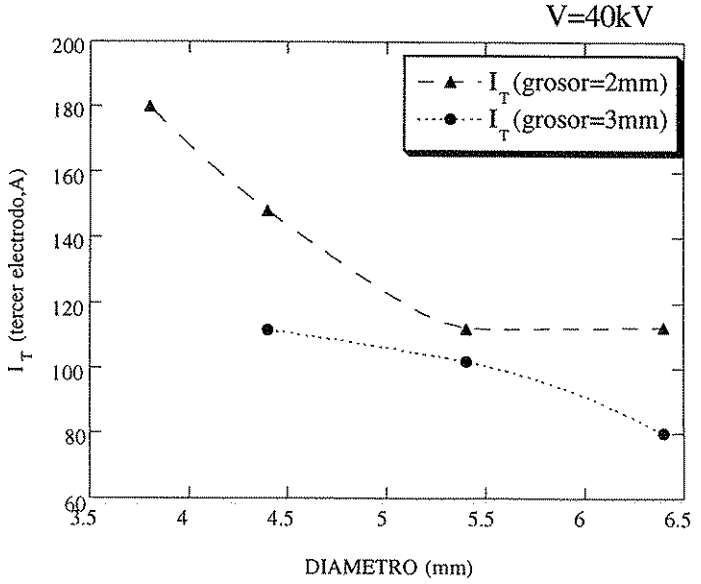


Fig. 19

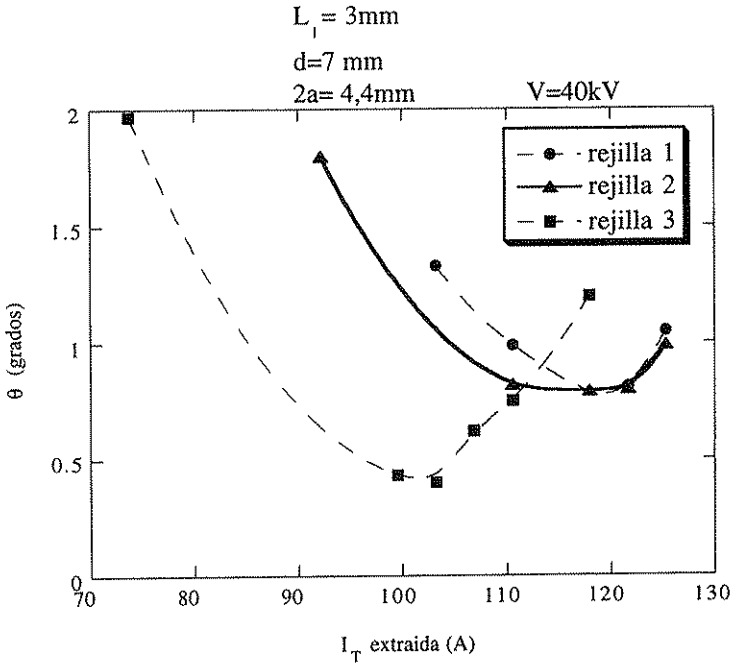

L_i = 3mm
d=7 mm
2a= 4,4mm
V=40kV
rejilla 1
rejilla 2
rejilla 3
θ (grados)
I_T extraida (A)

Fig. 20

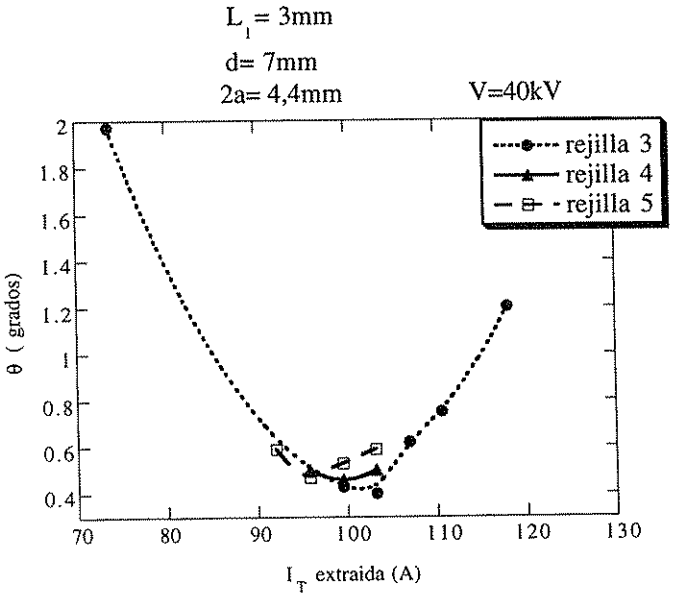

L_i = 3mm
d= 7mm
2a= 4,4mm
V=40kV
rejilla 3
rejilla 4
rejilla 5
θ (grados)
I_T extraida (A)

Fig. 21

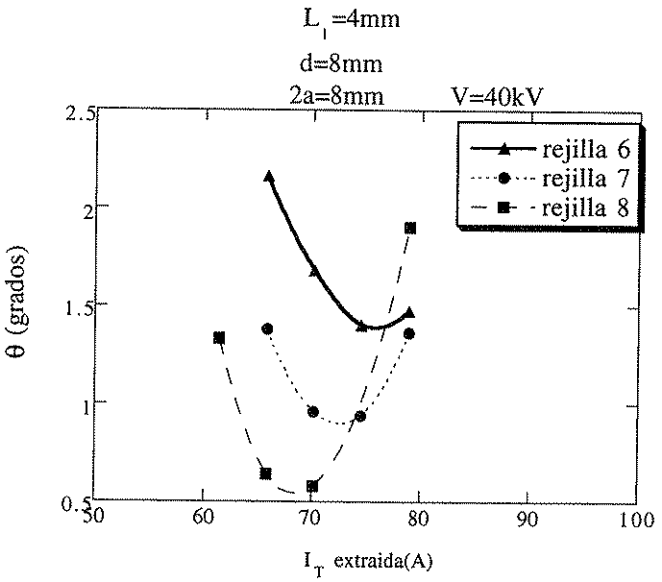

L_l =4mm
d=8mm
2a=8mm
V=40kV
rejilla 6
rejilla 7
rejilla 8
θ (grados)
I_T extraida(A)

Fig. 22

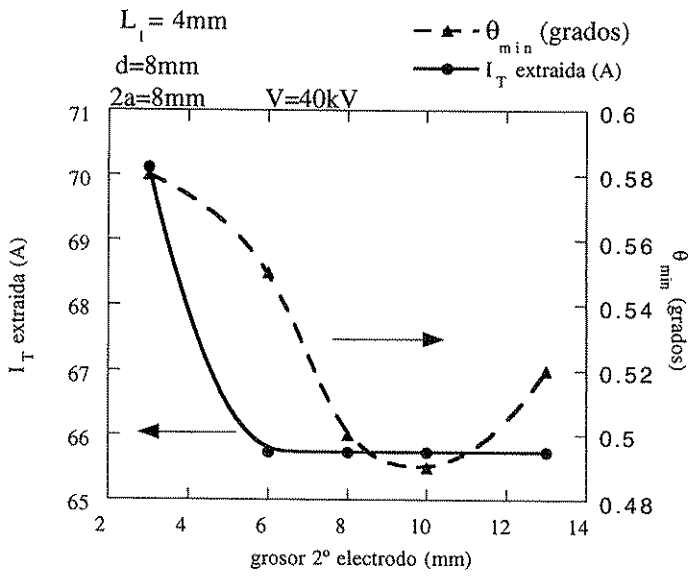

L_l = 4mm
d=8mm
2a=8mm
V=40kV
θ_min (grados)
I_T extraida (A)
I_T extraida (A)
θ_min (grados)
grosor 2° electrodo (mm)

Fig. 23

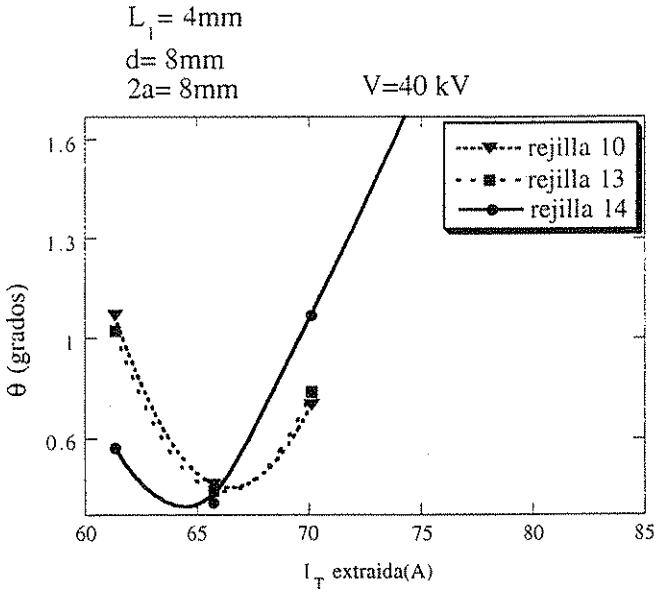

L1 = 4mm
d= 8mm
2a= 8mm
V=40 kV
rejilla 10
rejilla 13
rejilla 14
θ (grados)
1.6
1.3
1
0.6
60
65
70
75
80
85
I T extraida(A)

Fig. 24

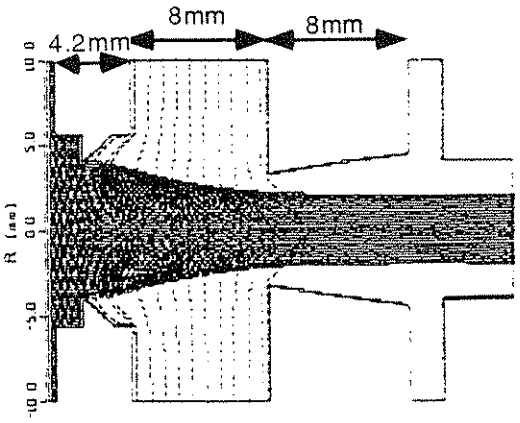

8mm
8mm
4.2mm

Fig. 25

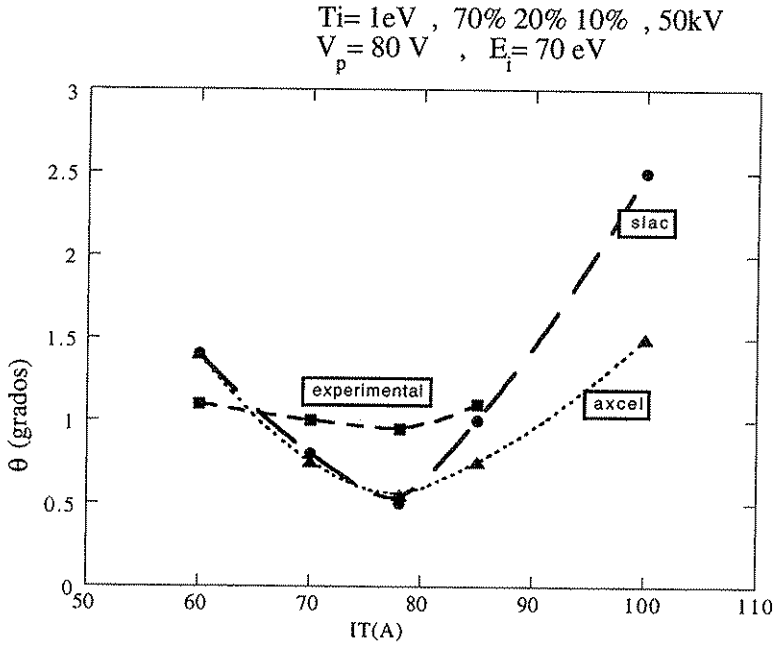

Ti= 1eV , 70% 20% 10% , 50kV
Vp= 80 V , Ei= 70 eV
θ (grados)
IT(A)
slac
experimental
axcel
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
50
60
70
80
90
100
110

Fig 26

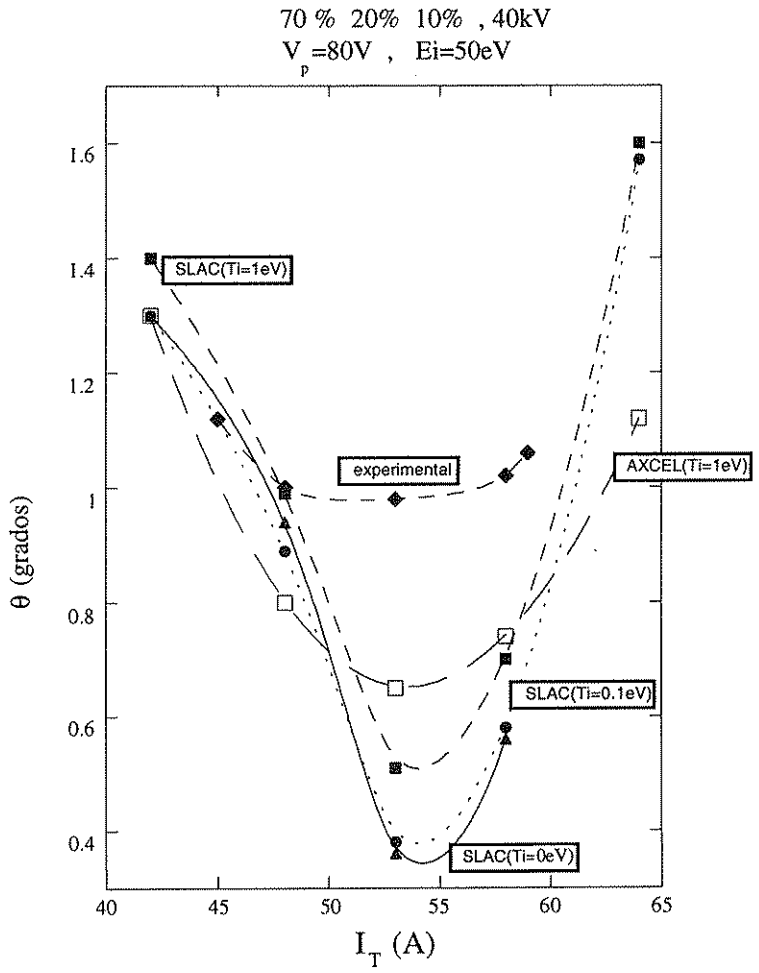
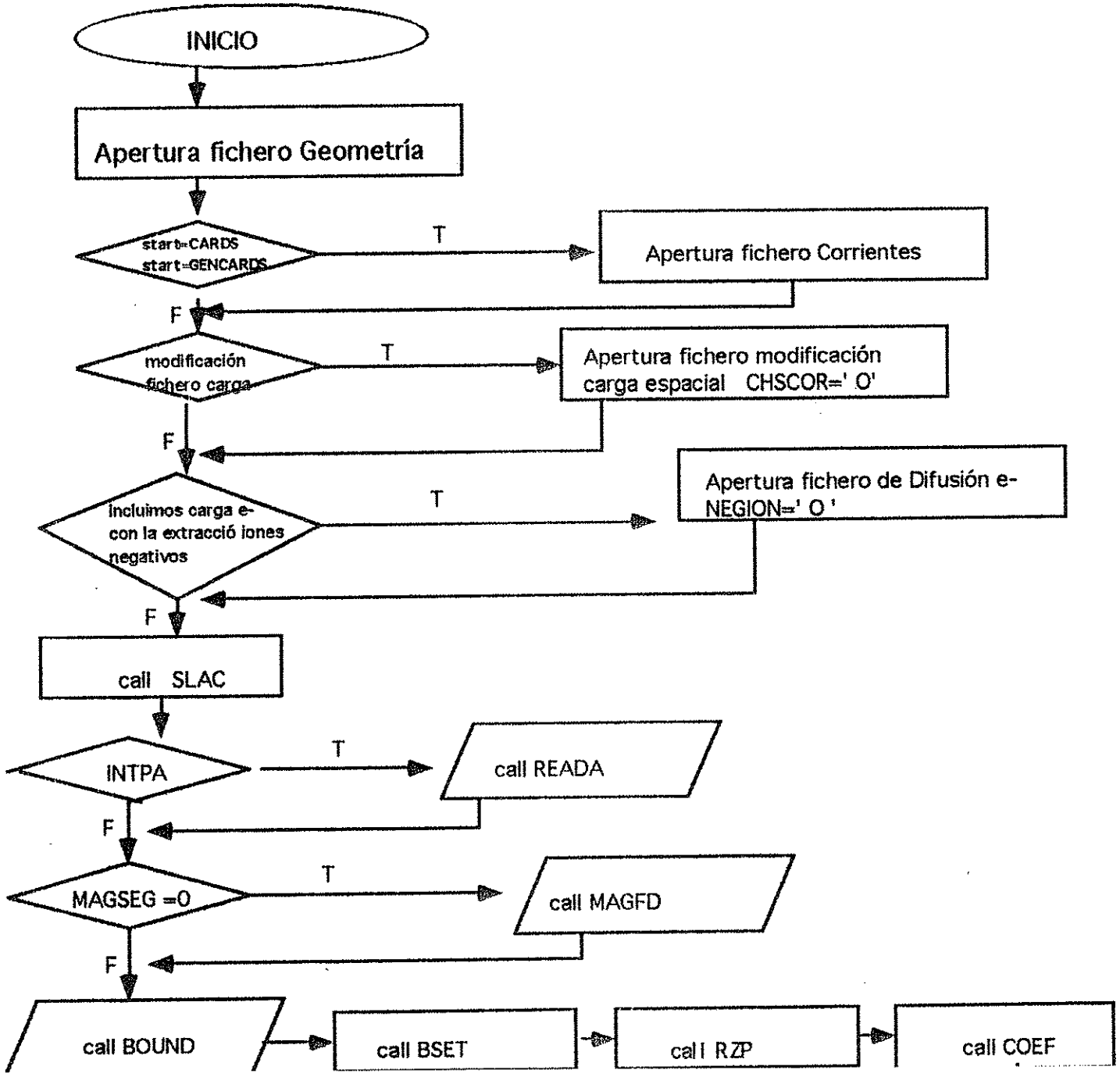
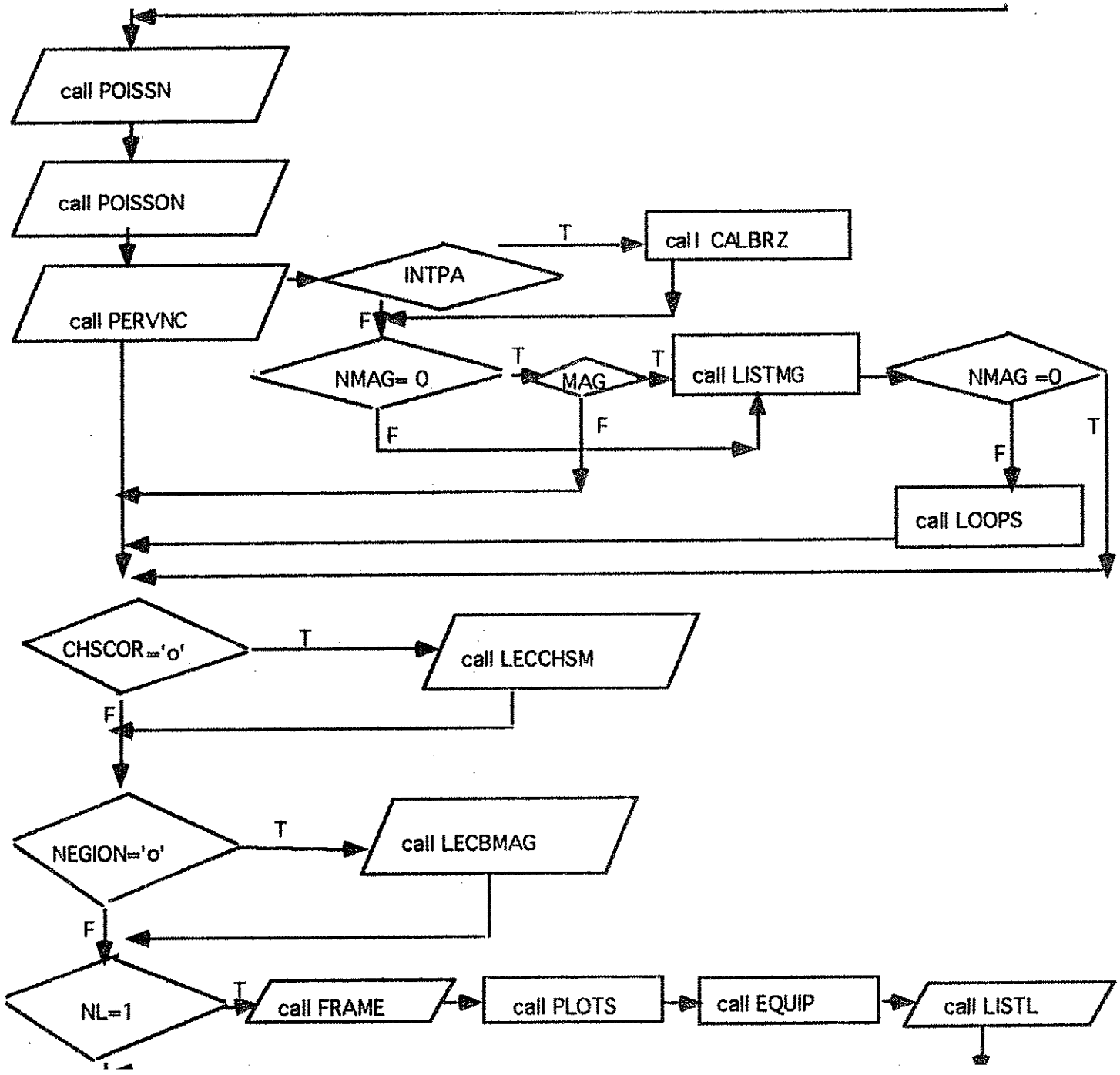
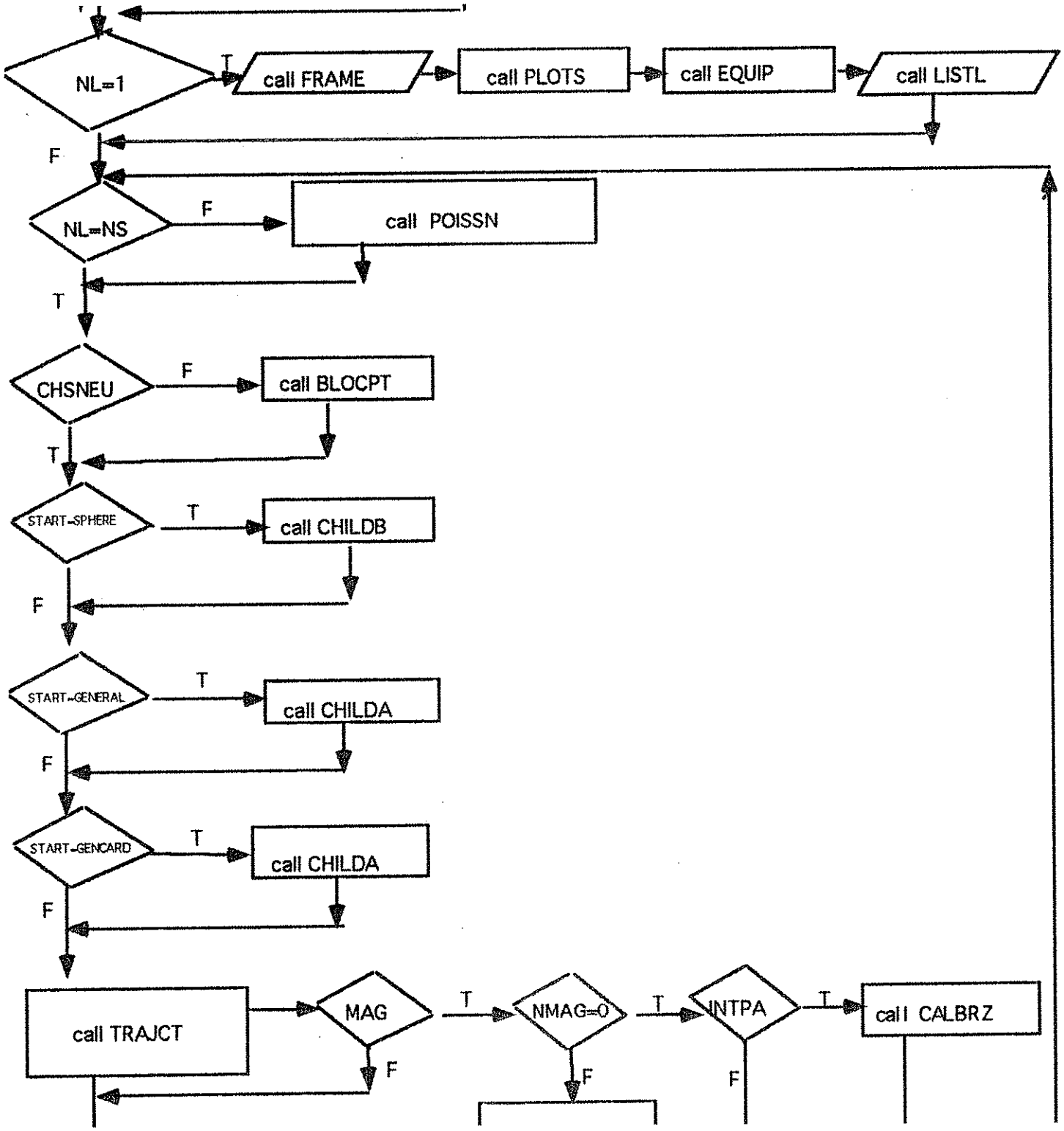
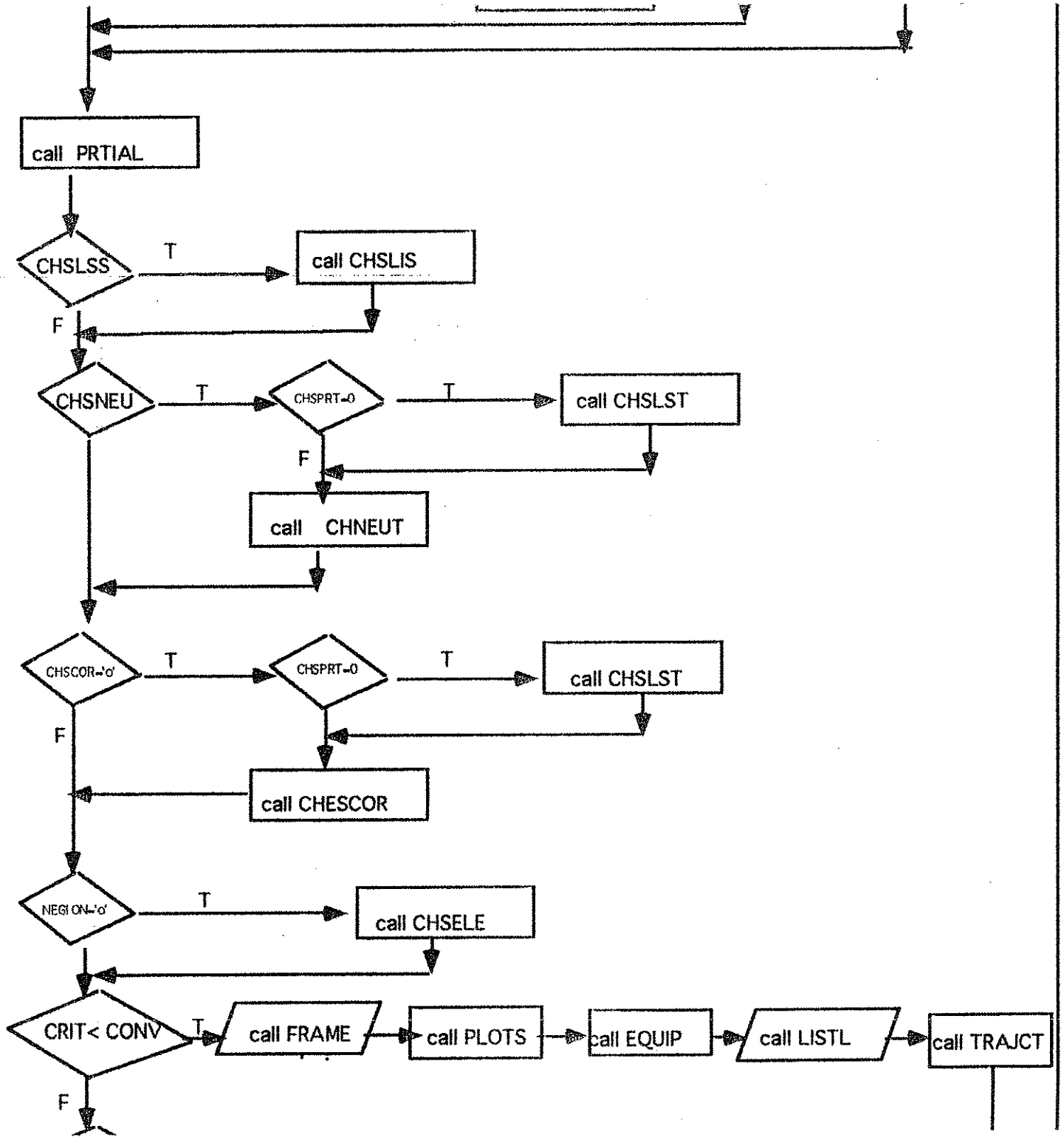

70 % 20% 10% , 40kV
V p =80V , Ei=50eV
SLAC(Ti=1eV)
experimental
AXCEL(Ti=1eV)
SLAC(Ti=0.1eV)
SLAC(Ti=0eV)
θ (grados)
I T (A)
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
40
45
50
55
60
65

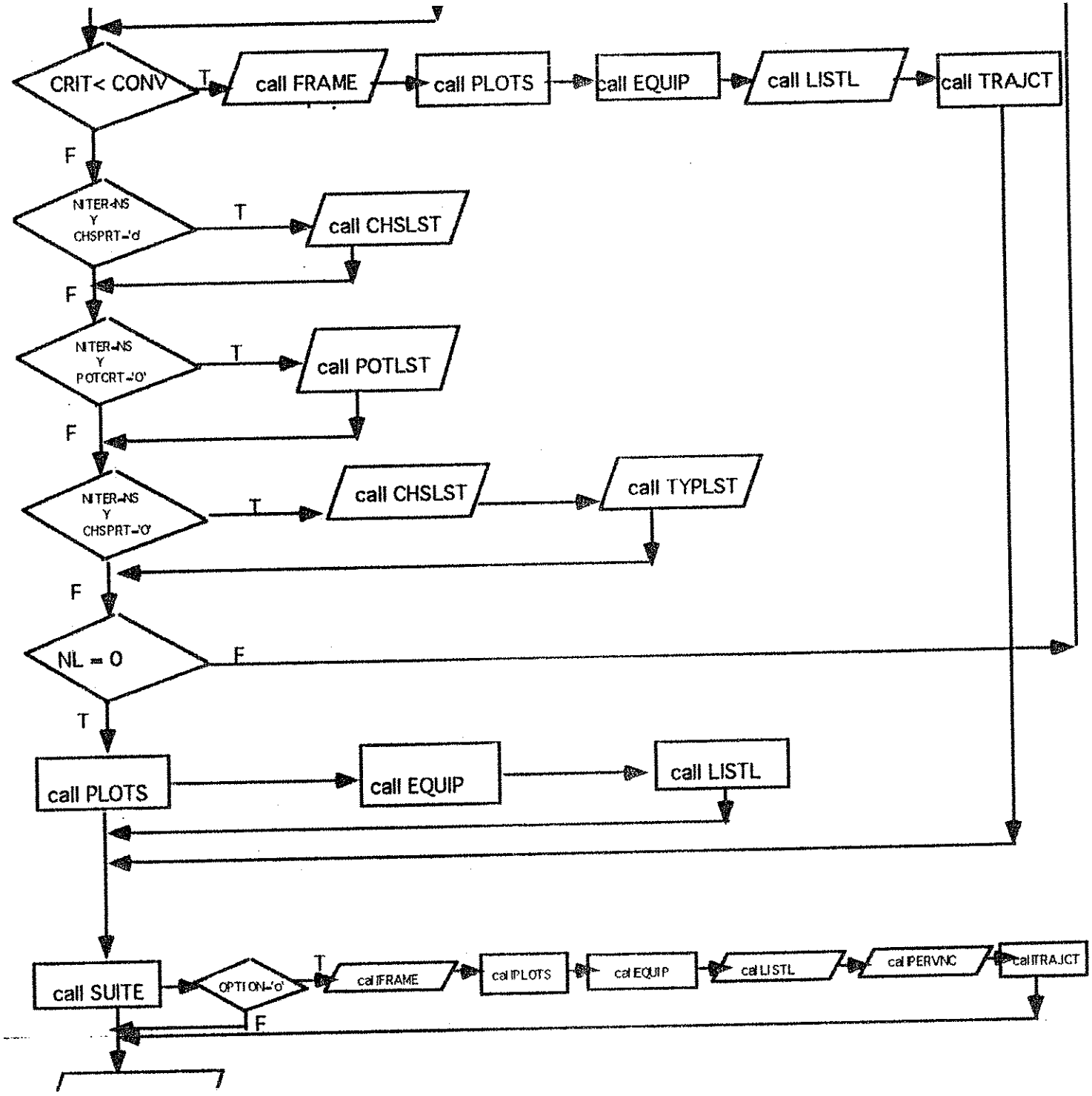
Fig. 27


INICIO
Apertura fichero Geometría
start=CARDS
start=GENCARDS
T
Apertura fichero Corrientes
F
modificación
fichero carga
T
Apertura fichero modificación
carga espacial CHSCOR=' O'
F
incluimos carga e-
con la extracció iones
negativos
T
Apertura fichero de Difusión e-
NEGION=' O '
F
call SLAC
INTPA
T
call READA
F
MAGSEG =0
T
call MAGFD
F
call BOUND
call BSET
call RZP
call COEF


call POISSN
call POISSON
call PERVNC
INTPA
T
call CALBRZ
F
NMAG= 0
T
MAG
T
call LISTMG
NMAG =0
F
F
F
T
call LOOPS
CHSCOR='o'
T
call LECCHSM
F
NEGION='o'
T
call LECBMAG
F
NL=1
T
call FRAME
call PLOTS
call EQUIP
call LISTL


NL=1
T
call FRAME
call PLOTS
call EQUIP
call LISTL
F
NL=NS
F
call POISSN
T
CHSNEU
F
call BLOCPT
T
START-SPHERE
T
call CHILDB
F
START-GENERAL
T
call CHILDA
F
START-GENCARD
T
call CHILDA
F
call TRAJCT
MAG
T
NMAG=0
T
INTPA
T
call CALBRZ
F
F
F


call PRTIAL
CHSLSS
T
call CHSLIS
F
CHSNEU
T
CHSPRT=0
T
call CHSLST
F
call CHNEUT
CHSCOR='o'
T
CHSPRT=0
T
call CHSLST
F
call CHESCOR
NEGI ON='o'
T
call CHSELE
CRIT< CONV
T
call FRAME
call PLOTS
call EQUIP
call LISTL
call TRAJCT
F


CRIT< CONV
T
call FRAME
call PLOTS
call EQUIP
call LISTL
call TRAJCT
F
NITER-NS
Y
CHSPRT-'d'
T
call CHSLST
F
NITER-NS
Y
POTCRT-'O'
T
call POTLST
F
NITER-NS
Y
CHSPRT-'O'
T
call CHSLST
call TYPLST
F
NL = 0
F
T
call PLOTS
call EQUIP
call LISTL
call SUITE
OPTION-'o'
T
calIFRAME
calIPLOTS
calIEQUIP
calILISTL
calIPERVNC
calITRAJCT
F

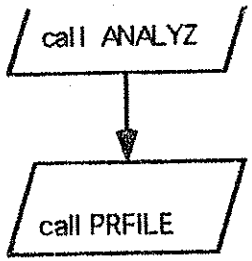


Fig. 28

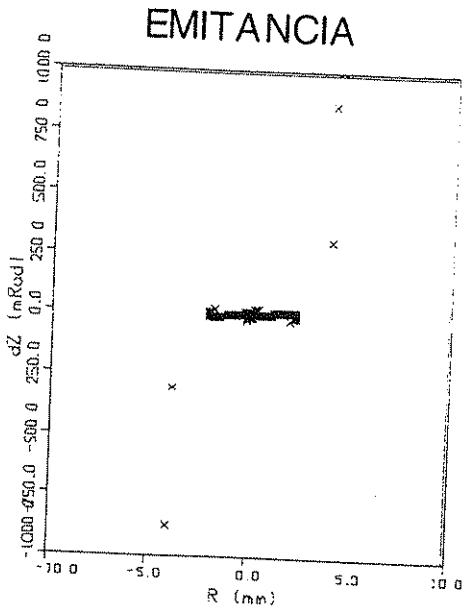


Fig. 29a

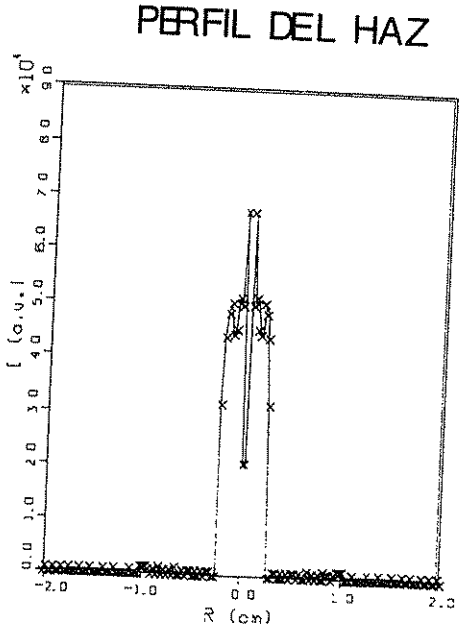


Fig. 29b