

## APROXIMACION TEORICA A LOS PARAMETROS DE TRABAJO DEL SISTEMA ACELERADOR UN100K

*Efraín Solarte*  
*Departamento de Física*  
*Universidad del Valle*

*Libardo G. Torres*  
*Departamento de Física*  
*Universidad de Nariño*

---

### Resumen

Se presenta un modelo para el acelerador UN100K del implantador de Iones de la Universidad Nacional que es fundamentalmente un modelo de Gaus, de múltiples etapas. Dentro de este modelo matricial se realizaron cálculos de distancias focales y de trayectorias iónicas en función de las energías inicial y final de los iones y se presentan los resultados más relevantes.

### INTRODUCCION

Dentro del proyecto de Semiconductores que se desarrolla en la Universidad Nacional de Colombia, se construye un Implantador de Iones para el estudio y la producción de materiales. Parte fundamental de un Implantador es el Sistema Acelerador de Iones, que permite alcanzar y definir las energías necesarias para producir procesos de implante de impurezas en los materiales base. Un sistema acelerador, el UN100K, ha sido diseñado, construído y probado por los autores y se describe detalladamente en trabajos previos [1, 2]. El presente trabajo se centra en la óptica del sistema acelerador, en el modelado teórico de la máquina y la simulación de sus propiedades ópticas.

## REPRESENTACION MATRICIAL DE SISTEMAS OPTICOS

En aceleradores lineales DC, con simetría axial y para las condiciones normales de trabajo, las trayectorias iónicas se encuentran predominantemente en la región central del tubo acelerador y los diámetros de haz a la salida del sistema son generalmente pequeños comparados con la longitud del tubo; de esta forma, el tratamiento de los problemas ópticos en estos sistemas suele reducirse a la óptica paraxial, considerando los campos y la geometría de los electrodos en la región en la cual el tubo es preponderantemente lineal con lo cual se logra una gran simplicidad en el tratamiento del problema [3, 4].

La solución del problema de las trayectorias, para el caso de un sistema con simetría axial, descrito en coordenadas cilíndricas y en el marco de la aproximación paraxial, exige la solución de la ecuación diferencial [5]:

$$r\Phi_0'' + 2r'\Phi_0' + 4r''\Phi_0 = 0, \quad (1)$$

donde el eje  $Z$  se ha tomado en la dirección de propagación del haz iónico -Eje Optico-,  $r$  representa la posición radial de una partícula que describe la trayectoria y  $\Phi_0$  el potencial eléctrico sobre el eje óptico.

Definir un sistema óptico como esencialmente lineal significa que las soluciones de la Ecuación (1), en la región en la que se presenta su lineabilidad, son tales que la relación entre la posición radial  $r(z_d)$ , en un punto dado por la coordenada  $z_d$  inmediatamente después del sistema óptico y la posición y la pendiente de la trayectoria, en un punto  $z_a$ , inmediatamente antes del mismo es una combinación de la forma:

$$r(z_d) = Ar(z_a) + Br'(z_a) \quad (2)$$

Y que una relación análoga existe para la pendiente en  $z_d$ , de modo que se cumple:

$$r'(z_d) = Cr(z_a) + Dr'(z_a) \quad (3)$$

La posibilidad de escoger arbitrariamente el tamaño de una región lineal, dentro de la región de linealidad del sistema óptico y la exigencia de que las condiciones expresadas por las ecuaciones (2) y (3) se sigan manteniendo, permite representar la trayectoria por medio de un conjunto de duplas  $(r, r')$  tales que la relación entre dos de ellas, definidas para los puntos  $z_1$  y  $z_2$ , con  $z_1 < z_2$ , a la entrada y a la salida de esa región, se expresa con ecuaciones similares a (1) y (2), donde los coeficientes  $A, B, C$  y  $D$  dependen de la ecuación de trayectoria específica de esa región. Así se establece una

relación biunívoca entre el conjunto de duplas y la trayectoria, que permite definir un "espacio de traza" o de "configuración" cuyos objetos son duplas ordenadas de la forma  $\mathbf{r} = (r, r')$ , que satisfacen la condición de reproducir las soluciones particulares de la ecuación de trayectoria [3, 4, 6, 7], y relacionar el conjunto de duplas antes de la región lineal del sistema óptico, con las duplas después de la región a través de una ecuación matricial de la forma:

$$\begin{bmatrix} r_d \\ r'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_a \\ r'_a \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ó en forma compacta:

$$\mathbf{r}_d = M_s \mathbf{r}_a \quad (4.2)$$

Así el subespacio del espacio de configuración conformado por las duplas de trayectoria definidas antes del elemento óptico ó, "Espacio Objeto: O", es transformado en otro, constituido por las duplas definidas después del mismo elemento óptico llamado "Espacio Imagen: I", las ecuaciones (4) expresan entonces la transformación y que el sistema mismo se halla representado por la matriz  $M_s$ .

Para un acelerador lineal DC, debido a que es fundamentalmente un elemento de transporte de haz y no de formación de Imágenes, la aproximación paraxial lineal es generalmente suficiente tanto para diseñar un sistema específico como para calcular y predecir sus propiedades. Sin embargo, los resultados obtenidos dependen en gran manera de la fidelidad con que se consideren los detalles particulares de cada acelerador para modelar con ellos la matriz del sistema.

La forma más simple de modelar un acelerador lineal DC de gradiente constante consiste en considerar que el sistema está conformado por dos aperturas separadas una distancia igual a la longitud del acelerador: la apertura de entrada,  $A_e$ , y la apertura de salida,  $A_s$ , y una región de campo uniforme,  $C_u$  comprendida entre estas dos [4, 6]. Así la matriz que representa el acelerador se construye con el producto de las matrices que representan estos tres elementos:

$$M_s = A_s * C_u * A_e \quad (5)$$

Esta forma simple permite sin embargo sólo un estimado burdo de las propiedades del sistema óptico. La Figura 1 muestra la variación de la distancia focal imagen en función de la energía inicial de los iones, cuando son acelerados hasta 10 keV, para dos modelos del sistema UN100K: la línea

de 19 mm por aisladores de Acrílico [1, 2]. Entre electrodos se aplica una diferencia de potencial constante definida por una cadena calibrada de resistencias. El valor máximo del voltaje aplicable entre electrodos es cercano a los 5 kV. La longitud total de la región de aceleración es de 556 mm. (ver Figura 2).

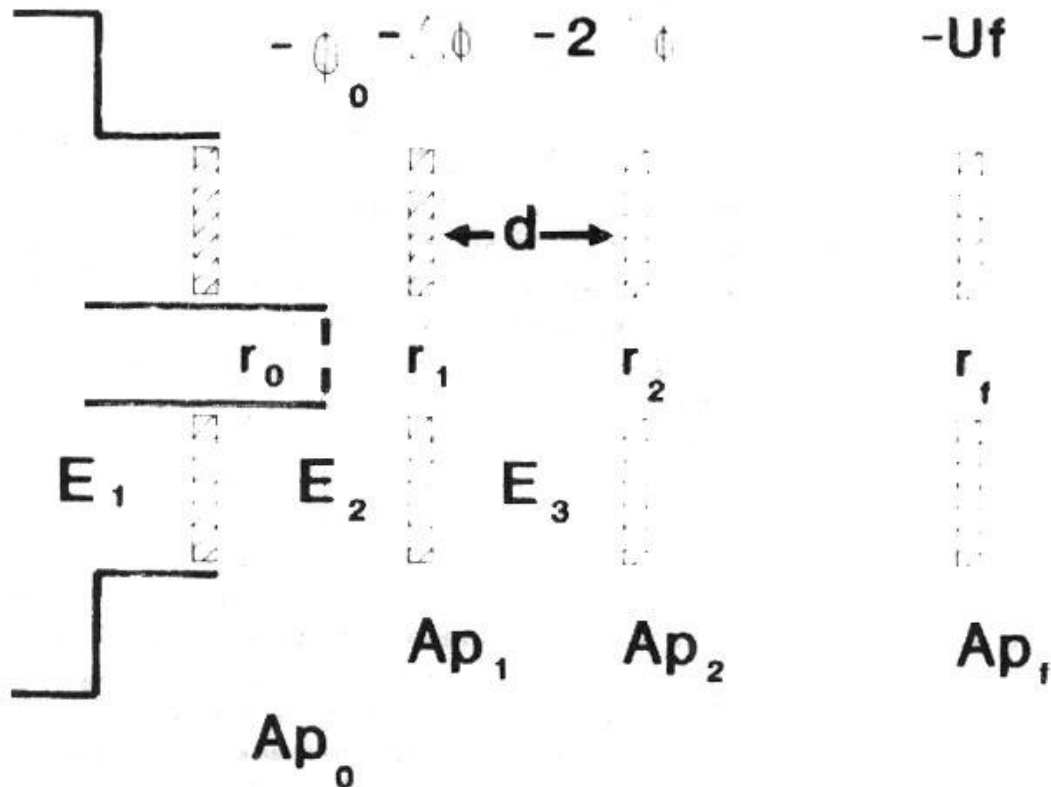


Figura 2: Esquema del acelerador UN100K

Al final de la región de aceleración y dentro de la misma estructura del acelerador, se encuentra un sistema de tres electrodos que actúa como lente espejo para electrones. Los iones positivos, producidos en una fuente de plasma y seleccionados según su masa atómica por un filtro de Wien, penetran al acelerador a través de una apertura de 0.75 mm de radio practicada en un disco de grafito que sirve de ventana de selección para el filtro de masas a la vez que de electrodo de inyección del acelerador. Este disco termina el tubo de inyección que penetra dentro del acelerador hasta la altura de la mitad del espacio ("gap") entre el primer y el segundo electrodo.

El diámetro creciente de los electrodos y el espejo final tienen como objeto evitar la producción de electrones de baja energía -por choque de iones

con los electrodos- y atrapar los electrones que de todas formas se producen dentro del acelerador para impedir que sean acelerados en dirección contraria al haz iónico, terminando en colisión con el electrodo de inyección con la consecuente emisión de rayos X, razón por la cual se escogió el Carbono, dado su bajo número atómico.

La geometría particular de este sistema de electrodos permite ver que un modelo simple, como el de campo uniforme entre dos aperturas, no es suficiente para describir las propiedades del acelerador.

## CONSTRUCCION DE LA MATRIZ DEL ACELERADOR

En una mejor aproximación a la descripción del acelerador UN100K, se incluye la geometría del sistema. Siguiendo el modelo propuesto por Gans [3, 4, 5, 8], se considera el tubo acelerador como un sistema secuencial de aperturas y regiones de campo uniforme -cada uno de estos limitado por dos aperturas-. Se considera la geometría particular de cada apertura definida por el radio de la misma y sus distancias a las aperturas siguiente y anterior en la secuencia de elementos del sistema.

De esta forma, una descripción más exacta del UN100K se logra mediante la siguiente división del sistema (ver Figura 2):

Una apertura de entrada,  $Ap_0$ , situada entre el primer y el segundo electrodo y mantenida a un potencial  $-\Phi_0$  igual al que define la energía de extracción de los iones en la fuente y a través del selector de masas [1]. Una primera Región de Campo,  $Cu_0$ , entre la apertura de entrada y el segundo electrodo del acelerador, este define a su vez la primera apertura visible del sistema de electrodos,  $Ap_1$ , luego una serie alternada de Regiones de Campo  $Cu_1$ , y Aperturas de radios uniformemente crecientes,  $Ap_1$ , hasta alcanzar la apertura final,  $Ap_f$ , del acelerador. Para efectos del cálculo de trayectorias se introducen, después del acelerador, 20 regiones libres de campo de longitud igual a la de las regiones de campo. El potencial del primer electrodo se supone cero y entre electrodos una diferencia de potencial constante e igual a  $D\Phi$ , de modo que la primera apertura visible se encuentra al potencial  $-D\Phi$ , la segunda a  $-2D\Phi$ , etc., la apertura final se encuentra al potencial total de aceleración  $-\Phi_f$ .

De esta forma la matriz del acelerador se construye como el producto de la matriz de la apertura final,  $M_{Ap_f}$ , la matriz de la región de campo entre el penúltimo y el último electrodos,  $M_{Cp_f}$ , 22 matrices de campo uniforme,  $M_{Cu_i}$ , la matriz del campo entre el segundo y tercer electrodo,  $M_{C_2_3}$ , la de la apertura del segundo electrodo,  $M_{Ap_1}$ , la del campo entre el electrodo de

grafito y el segundo electrodo,  $M_{C_{01}}$ , y la matriz de la apertura de entrada,  $M_{A_{pe}}$ .

Las matrices correspondientes a las aperturas de los electrodos restantes son, en esta aproximación, iguales a la matriz unidad, lo que significa que el tamaño finito de los electrodos y su espesor no afectan, dentro del marco de la aproximación, la distribución de campos dentro del tubo acelerador. Este resultado del modelo, está de acuerdo con las determinaciones realizadas por Galejs y Rose [1], empleando métodos análogos, de la distribución de potenciales en un tubo acelerador DC y de la medida, realiza por ellos, de la desviación de la distribución de Campo Uniforme debida al espesor y tamaño de electrodos y aperturas.

Con la matriz así construída se calculan las distancias focales en función, ya sea de los parámetros del acelerador (cálculos de diseño), ó de las energías de inicial y/o final de los iones. Todas las distancias que definen las propiedades del sistema óptico pueden ser calculados de los elementos matriciales de la Matriz del Sistema, por métodos bien conocidos [6].

Dado el tamaño del aparato y el número de matrices que componen la matriz del sistema, es posible hacer un trazado aproximado de las trayectorias iónicas, si dada una dupla  $(r, r')$  a la entrada del sistema se calcula secuencialmente cada una de las duplas imagen después de cada elemento del sistema óptico.

Estos cálculos se han realizado mediante un programa de computador y los resultados, que permiten la caracterización del acelerador y su empleo en el sistema de implantación iónica, se presentan y discuten en la próxima sección.

## RESULTADOS

Dado que el sistema de aceleración de un implantador es fundamentalmente un sistema de transporte de haz, con el que se busca por una parte comunicar a los iones la energía necesaria para un proceso de implantación dado y por otra obtener un haz ya sea finamente enfocado o por el contrario uniformemente distribuido en un plano, el parámetro óptico más importante es la distancia focal imagen del sistema.

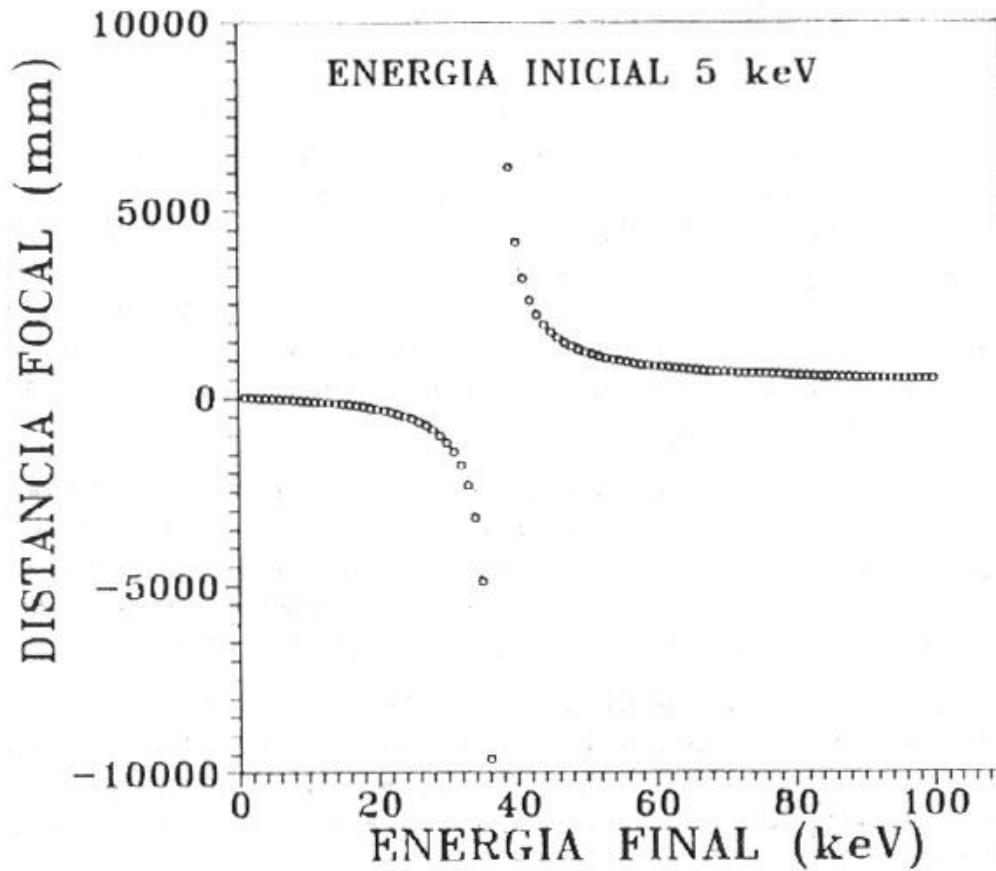


Figura 3: Distancia focal imagen en función de la energía final de los iones.

La Figura 3 muestra la dependencia de la distancia focal imagen como función de la energía final comunicada a los iones, para una energía inicial de 5 keV, que representa el máximo alcanzable actualmente en el sistema de extracción de implantador de la UN. Se observa que para energías por debajo de 38 keV el sistema es divergente. Este hecho no limita las posibilidades de la máquina, ya que la mayoría de los procesos de implantación, interesantes para los proyectos que se desarrollan en materiales, están sobre los 40 keV [4, 9]. Si se requieren menores energías de implantación se hace necesario trabajar a menores energías de entrada, para las cuales se obtienen comportamientos convergentes, sin embargo en este caso se obtienen menores intensidades de corriente. Este efecto se muestra en la Figura 4, tomada del trabajo de L. Torres [1], que presenta la característica Corriente de Iones vs Voltaje de Aceleración, medida en el implantador de la UN. El parámetro de las curvas es el potencial de extracción. Se observa que mien-

tras para valores pequeños de la energía inicial de los iones la curva tiende a saturarse, presenta una característica creciente para los voltajes mayores.

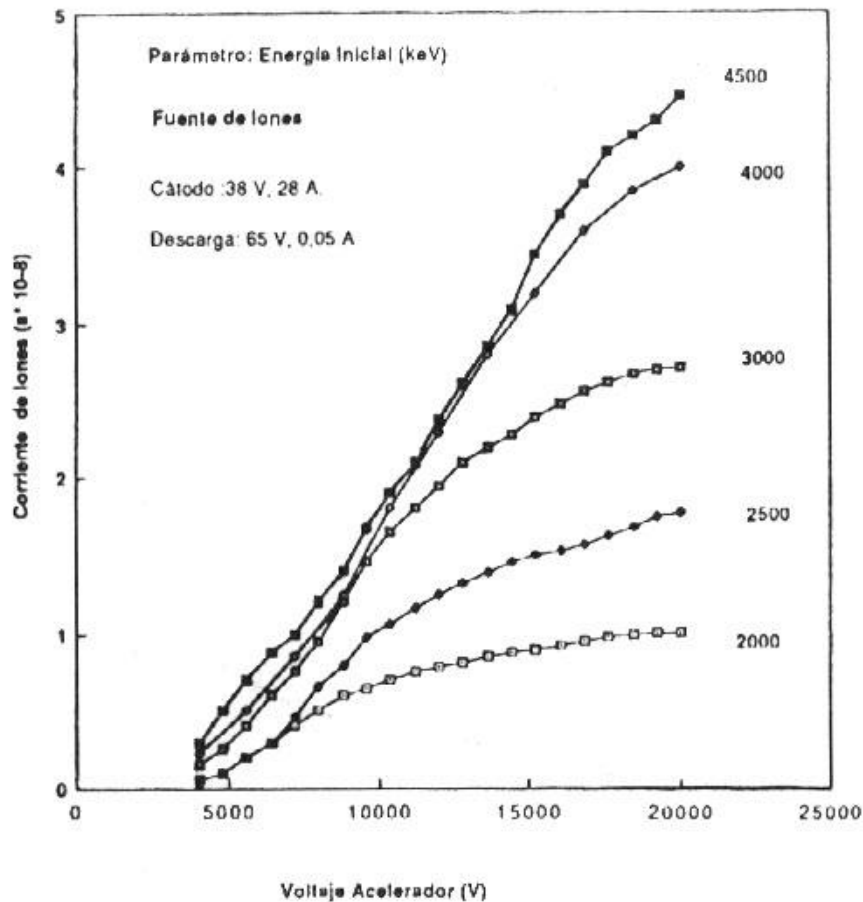


Figura 4: Característica Corriente de Iones vs Voltaje Acelerador, como parámetro la energía Inicial de los Iones. Tomada de la Ref. 1.

La Figura 5 muestra el resultado del cálculo de la distancia focal imagen, como función de la energía inicial de los iones, para una energía final de 20 keV. Aquí puede apreciarse que para energías iniciales mayores que 1.2 keV el punto focal se encuentra fuera del acelerador y que para energías del orden de 2 keV deben presentarse enfoques definidos y cercanos a la región en la cual se colocó el colector de iones [1]. Por otra parte se aprecia que para energías mayores que 2.6 keV el sistema es divergente. Lo anterior se corrobora con los cálculos de trayectorias presentados en las Figuras 6 y 7.



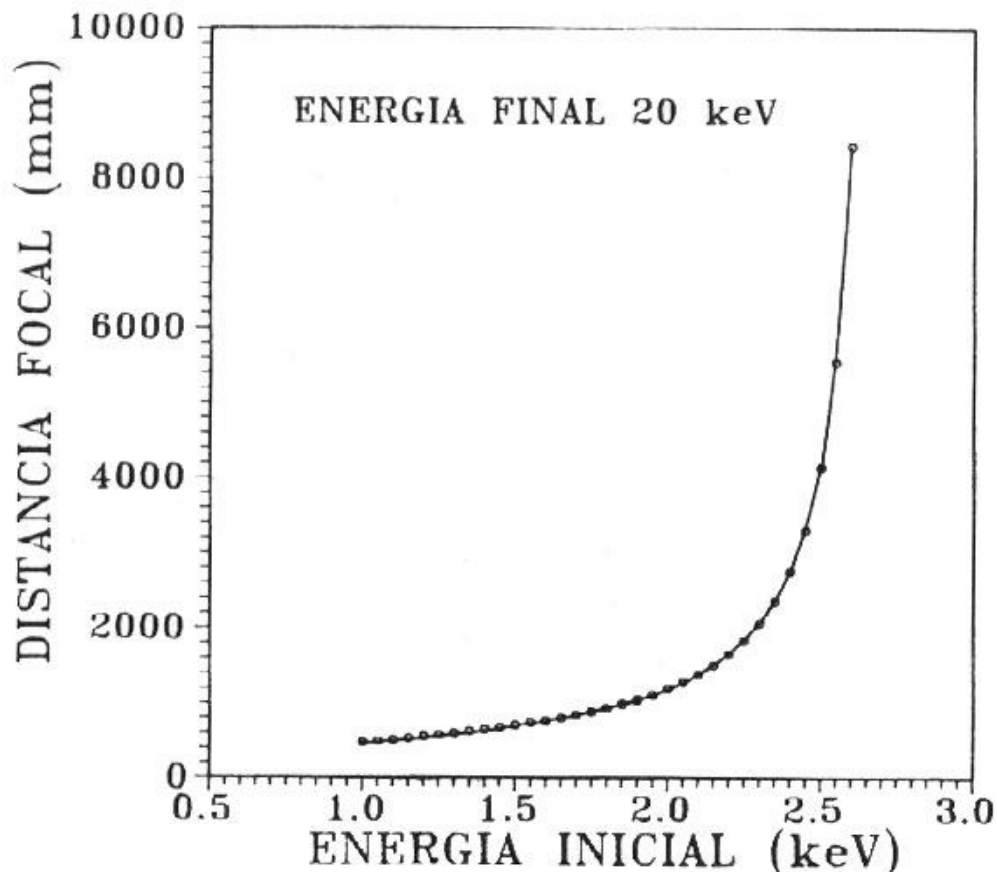
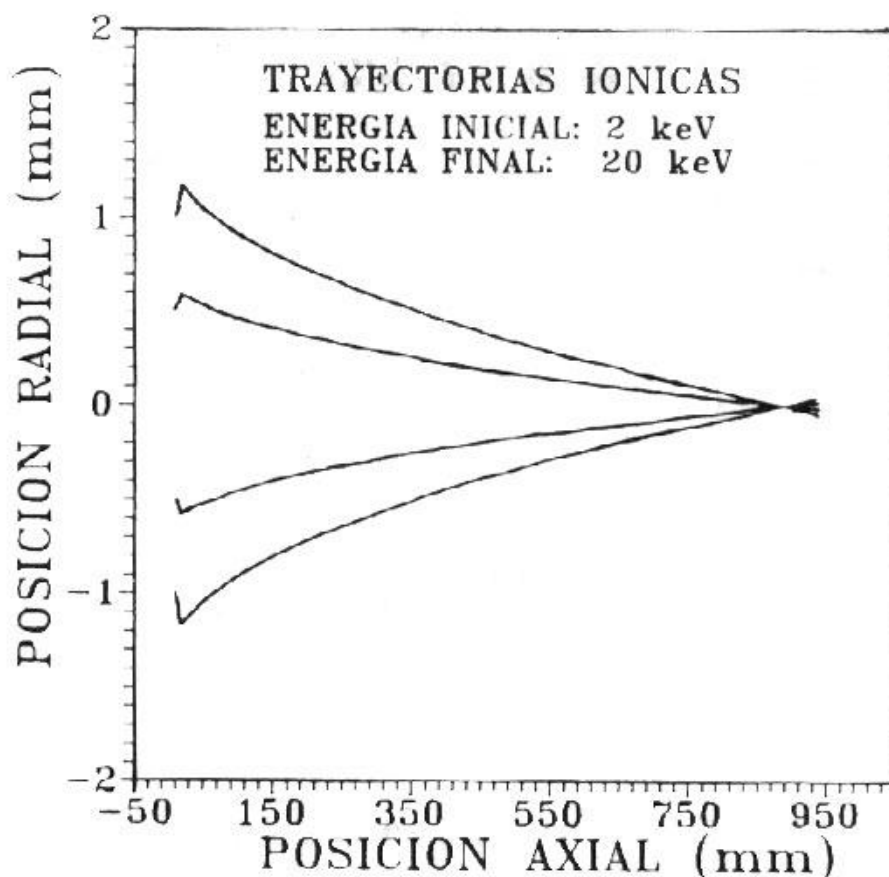


Figura 5: Distancias focales para una energía final de 20 keV, en función de la energía inicial.

La Figura 6 muestra las trayectorias iónicas para un haz paralelo al eje óptico que penetre al acelerador con 2 keV y lo abandone con 20 keV, se observa el efecto de enfoque. La Figura 7 muestra las trayectorias para un haz de 4 keV. Se calcularon trayectorias paralelas al eje y otras ligeramente dispersas (hasta 1 grado), la Figura muestra las trayectorias más significativas. Se observa que las trayectorias se abren hasta formar una sección transversal apreciablemente grande, aunque las trayectorias inicialmente paralelas se dispersan menos y se agrupan hacia el centro.



**Figura 6:** Efecto de enfoque a 20 keV.

Como el interés es simular el comportamiento del acelerador hasta los límites del diseño, se calcularon distancias focales para todos los rangos de energía y se realizaron análisis de trayectorias para cada caso. La Figura 8 muestra el resultado del cálculo de distancias focales positivas para la energía final de 100 keV, que constituye el límite de diseño de la máquina. El modelo permite predecir distancias focales fuera del acelerador para energías iniciales mayores de 6 keV. Para energías menores el haz es ligeramente divergente debido a que el punto focal se encuentra dentro del tubo. El efecto de esta posición del punto focal se observa en la Figura 9 que muestra las trayectorias de un haz de iones paralelo al eje que ingresa al tubo con una energía de 4 keV y es acelerado hasta 100 keV. El resultado encontrado muestra que un haz paralelo de 2 mm de diámetro inicial es expandido hasta un diámetro de 4 mm a lo largo de 94 cm de recorrido.

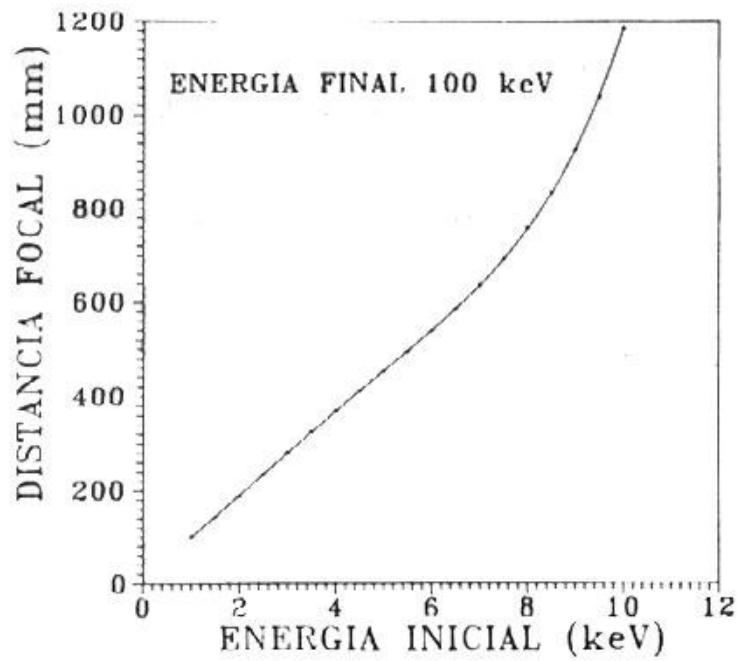
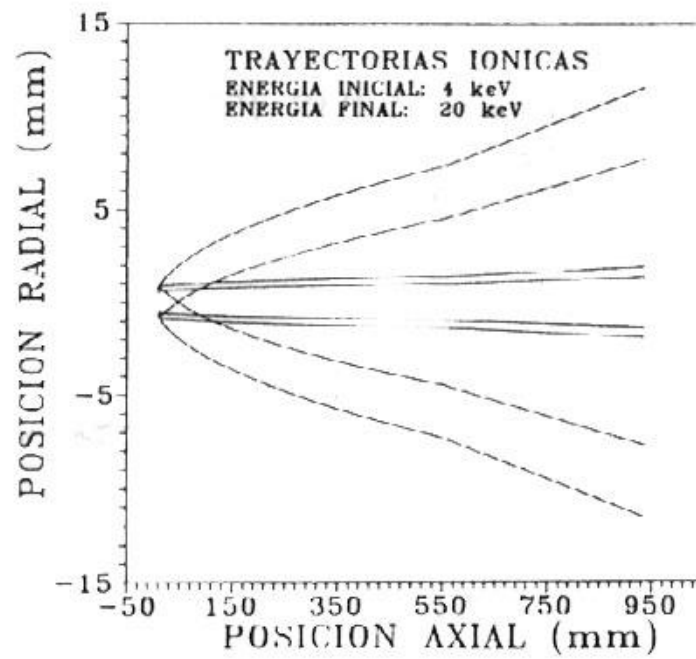


Figura 8:

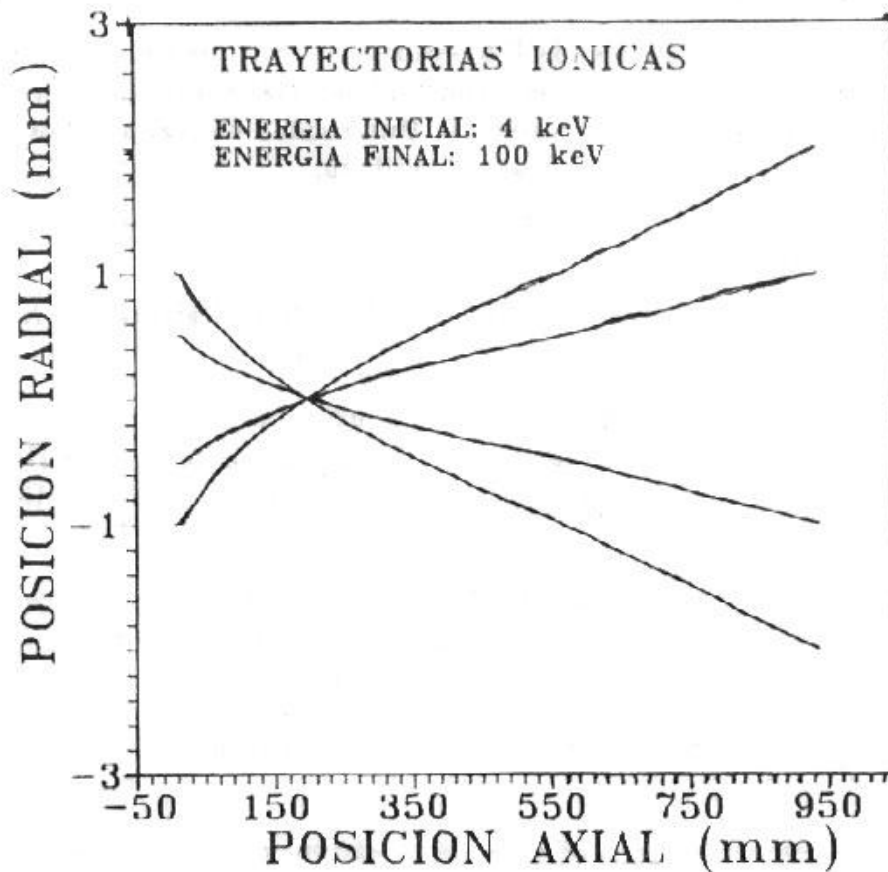


Figura 9: Efecto de leve divergencia por enfoque dentro del acelerador.

## CONCLUSIONES

Se ha construido un modelo del acelerador UN100K, que permite entender su funcionamiento y que es susceptible de modificaciones posteriores para incluir otros parámetros y efectos que permitan una mejor aproximación al problema. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten orientar los trabajos de caracterización del Implantador de Iones de la UN y sugieren algunas de las mediciones a realizar, como la determinación de los perfiles del haz iónico.

El método desarrollado y los problemas elaborados permitirán emprender otros cálculos como los de perfil de haz y distribución de intensidades.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue iniciado en la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, bajo el auspicio de Colciencias y concluído en trabajo conjunto de los autores en la Universidad del Valle y la Universidad de Nariño. Los autores agradecen a estas entidades el apoyo recibido.

## Referencias

1. Torres, L. G. *Tesis de Magister Scientiae*. Universidad Nacional, Bogotá, 1989.
2. Torres, L. y Solarte, E. "Acelerador Lineal Dc para producción de haces iónicos hasta 100 keV". En *Memorias del XIII Congreso Nacional de Física*, Ed. Soc. Col. Fis., Bogotá, 1989 (por publicar).
3. Galejs, A. y Rose, P. H. "Optics of Electrostatic Accelerator Tubes". En *Focusing of Charged Particles*. Ed. A. Septier. New York, Academic Press. 1967. Vol. 2. Cap. 5.
4. Wilson, R. G. y Brewer, G. R. "Ion Beams", New York, John Wiley & Sons, 1973.
5. Glasser, W. "Grundlagen der Elektronen Optik". Wien, Springer Verlag, 1952.
6. Bandford, A. P. "The transport of Charged Particle Beams", London. E. and F.N. Spon Limited, 1966.
7. Fronteau, J. "Some aspects of Trace-Space Computation for High Energy Charged Particle Beams". En *Focusing of Charged Particles* Ed. A. Septier. New York, Academic Press, 1967. Vol. 2. Cap. 5.4, p. 426-428.
8. Hartmetz, P. "Ionenoptische Untersuchungen an einem 350 keV Schwerionenbeschleuniger", Diplomarbeit, Universitaet Kaiserslautern, 1978.
9. Ryssel, H. y Glawsching, H. "Ion Implantation Techniques", Berlin, Springer Verlag, 1982.