



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Calibración de un cañón de iones
de baja energía.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
FÍSICO**

Presenta:

Pedro Corona Arroyo



Tutor (a): Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- 1. Datos del alumno**
Corona
Arroyo
Pedro
Universidad Nacional Autónoma de México.
Facultad de Ciencias
Físico
095609443.
- 2. Datos del tutor**
Dra.
Beatriz Elizabeth
Fuentes
Madariaga
- 3. Datos del sinodal 1**
Dr.
Ramiro
García
García
- 4. Datos del sinodal 2**
Dr.
Horacio
Martínez
Valencia
- 5. Datos del sinodal 3**
Dr.
Juan Carlos
López
Vieyra
- 6. Datos del sinodal 4**
M. en C.
Luis Manuel
León
Rossano
- 7. Datos del trabajo escrito.**
Calibración de un cañón de iones de baja energía
126 p.
2007

Señor Dios gracias:

Por mi familia, mis amigos y mis maestros .

Por tu palabra que transforma corazones.

Por una vida llena de bendiciones.

Por concederme el privilegio de estudiar en la UNAM.

“Los cielos cuentan la gloria de Dios, y el firmamento anuncia la obra de sus manos”

Salmo 19:1

“Escucha el consejo, y recibe la corrección, para que seas sabio en tu vejez”

Proverbios 19:20

Mueve una mano y hace el mar, mueve otra y hace el bosque. Y cuando pasa por encima de nosotros, quedan las nubes, pedazos de su aliento.

Jaime Sabines

Agradecimientos

A Mi Hermosa y Dulce Esposa:

Gracias por tu amor sincero y tu apoyo incondicional en todo momento. Por permitirme compartir mi vida a tu lado. TE AMO

A Mis Padres:

Gracias por haberme dado la vida, y por su amor y dedicación. A ti papá te agradezco la firmeza con que me enseñaste a seguir adelante. A ti mamá quiero agradecerte por tu confianza en mi. Los quiero mucho.

A Mi Hermano:

Gracias por tu amor y tu apoyo siempre que lo he necesitado, porque siempre te preocupas por mi. Te quiero mucho.

A la Dra. Beatriz Fuentes Madariaga:

Gracias por haber sido mi maestra y por permitirme realizar este trabajo. Por sus consejos y su guía.

Al Dr. Horacio Martínez Valencia:

Quiero expresarle mi agradecimiento por su apoyo desinteresado así como mi admiración y respeto.

A Mis Sinodales:

Les agradezco sinceramente al Dr. Ramiro García García, al Dr. Juan Carlos López Vieyra y al M. en C. Luis Manuel León Rossano por la revisión de este trabajo y por las observaciones que con toda razón eran necesarias.

A Mis Amigos:

Gracias por su amistad que ha enriquecido mi vida. A Noguchi y Omar Riveroll por ofrecerme su ayuda sincera en todo momento. A Salvador por su calidad humana y apoyo que me ha dado. A Miguel por confiar en mí en los momentos difíciles. A todos con los que compartí grandes momentos durante mi carrera.

A Mi Querida UNAM:

Gracias por el privilegio de formarme profesionalmente dentro de tus aulas en la Facultad de Ciencias, y por los muchos excepcionales maestros que me enseñaron el placer de la Física.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE	4
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1 CONCEPTOS GENERALES	9
1.1 PLASMAS	9
1.1.1 DEFINICIÓN DE PLASMA	9
1.1.2 PARÁMETROS DE UN PLASMA	10
1.1.3 TIPOS DE DESCARGAS GASEOSAS	12
1.2 PROCESOS QUE OCURREN EN LA FORMACIÓN DE PLASMAS	18
1.2.1 IONIZACIÓN EN GASES	18
1.2.2 MECANISMOS DE IONIZACIÓN	22
1.2.3 FENÓMENOS EN LA IONIZACIÓN	23
1.2.4 EXCITACIÓN	25
CAPÍTULO 2 SISTEMA EXPERIMENTAL	27
2.1 SISTEMA DE VACÍO	28
2.1.1 BOMBA MECÁNICA	28
2.1.2 BOMBA TURBOMOLECULAR	29
2.2 FUENTE DE IONES	30
2.3 ENFOQUE, ACELERACIÓN Y SELECCIÓN DE IONES	32
2.3.1 ÓPTICA DE IONES	32
2.3.2 LENTES EINZEL	34
2.3.3 FILTRO DE VELOCIDADES	36
2.4 CAJA DE FARADAY	39

CAPÍTULO 3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	41
3.1	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CAÑÓN DE IONES	41
3.2	FORMACIÓN DEL HAZ DE IONES	41
3.3	OPTIMIZACIÓN DE LAS LENTES EINZEL	42
3.3.1	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	44
3.3.2	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	52
3.3.3	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	61
3.3.4	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	69
3.3.5	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	77
3.4	OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES	86
3.4.1	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	86
3.4.2	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	91
3.4.3	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	96
3.4.4	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	101
3.4.5	DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	106
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	111
4.1	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DE LAS LENTES EINZEL	111
4.1.1	RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	111
4.1.2	RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	112
4.1.3	RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	113
4.1.4	RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	114
4.1.5	RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	115
4.2	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES	117
4.2.1	OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	117
4.2.2	OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	118

4.2.3 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	119
4.2.4 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	120
4.2.5 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	121
4.3 COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE ENERGÍA PARA $E = 1.0, 3.0 \text{ y } 5.0 \pm 0.01 \text{ keV}$	122
CONCLUSIONES	124
BIBLIOGRAFÍA	125

INTRODUCCIÓN

Las primeras fuentes de partículas cargadas y rayos γ , fueron suministradas por el decaimiento de elementos naturalmente radiactivos, como el radio y el torio. Estos elementos expulsan partículas α con energías hasta de 5 ó 6 MeV, partículas β (electrones rápidos) con energías comparables, y rayos γ con energías que alcanzan los 3 MeV. Estas partículas de ocurrencia natural fueron estudiadas primero para determinar su propia naturaleza y después se utilizaron como proyectiles para bombardear varias clases de materiales e investigar cómo interaccionan con los elementos. Este último tipo de investigación condujo a Rutherford al descubrimiento del núcleo atómico.

Con el conocimiento del núcleo atómico y de que los electrones circundantes se pueden remover con bastante facilidad para producir un ion cargado, se hace evidente que si existía una caída de potencial muy grande entre los electrodos de alguna especie de máquina eléctrica, podrían ser acelerados estos iones y constituirse en una variedad de proyectiles para el estudio. Todas las máquinas que puedan producir un alto voltaje de corriente directa (cd) caen dentro de la denominación general de *aceleradores*.

Para la realización de este trabajo se utilizó un acelerador electrostático de baja energía (1-5 keV), localizado en el laboratorio de Espectroscopía del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM, en Cuernavaca, Morelos. A continuación, se ofrece una descripción breve de los temas tratados en esta tesis.

En el capítulo 1, se presenta la definición de plasma y se mencionan cuáles son los parámetros que lo definen. También se describen los diferentes tipos de descargas gaseosas para la producción de un plasma, así como los procesos que ocurren en la formación del mismo, tales como la ionización y la excitación.

En el capítulo 2, se describen los componentes principales del acelerador de baja energía, tales como el sistema de vacío, el cañón de iones constituido por la fuente de iones, las lentes Einzel, el filtro de velocidades y la caja de Faraday. Para una mayor comprensión del enfoque y de la aceleración de los iones producidos en la fuente (los cuales fueron iones de O^+), se describe el movimiento de partículas cargadas bajo la acción de un campo eléctrico (óptica de iones).

En el capítulo 3, se describen los experimentos para 1) La optimización de las lentes Einzel y 2) La optimización del haz de iones en el filtro de velocidades.

Para la optimización de las lentes Einzel, se midieron los valores de la intensidad de corriente iónica en función del voltaje aplicado al segundo electrodo de las lentes, para una energía dada. Esto se hizo para los cinco valores de la presión de trabajo dentro del cañón de iones (65, 70, 75, 80 y 85 μHg). Después, se tomaron los valores del voltaje aplicado a las lentes Einzel para los cuales la corriente fue máxima.

Para la optimización del haz de iones, se utilizaron las relaciones de optimización de las lentes Einzel, para ajustar los valores de la energía y del voltaje, con el fin de garantizar un haz de iones enfocado. Posteriormente, se midieron los valores de la intensidad de corriente iónica en función de la corriente del imán, lo que permite variar el campo magnético dentro del filtro de velocidades, encontrando los valores de la corriente del imán para los cuales la corriente es óptima. Esto es equivalente a decir, los valores de la corriente del imán que seleccionan al ion O^+ .

En el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos para la optimización de las lentes Einzel (relaciones de optimización) y para la optimización del haz (valores de la corriente del imán para la selección del ion O^+). También se compara el comportamiento de las curvas de distribución de energía para las presiones de trabajo elegidas y para los casos de 1.0, 3.0 y 5.0 keV.

Por último, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones que se siguen de los resultados experimentales.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 PLASMAS

1.1.1 DEFINICIÓN DE PLASMA

Como se sabe, los átomos son los constituyentes de las sustancias ordinarias. Están compuestos de un núcleo con carga positiva y de un número equivalente de electrones con carga negativa, por lo que son eléctricamente neutros. Cuando se extraen del átomo uno o más electrones, lo que queda es un exceso de carga positiva, que se denomina un *ion positivo*. Una sustancia que contiene iones, y que además conserva electrones libres se conoce como *plasma*. El plasma en conjunto es eléctricamente neutro, pero los iones y electrones son libres de moverse en forma independiente.

La ionización de un material puede darse de distintas maneras, como por ejemplo a través de las *descargas eléctricas*. Si a un gas se le aplica un campo eléctrico muy intenso pueden desprenderse algunos de los electrones orbitales, quedando los átomos del gas ionizados y algunos de sus electrones libres. Estos electrones son acelerados por el campo eléctrico y chocan con otros átomos, desprendiendo algunos de sus electrones, y así el proceso se da de manera continua. Esto es lo que se llama una descarga eléctrica y un gas ionizado es un típico caso de un plasma.

Otra forma de obtener un plasma es por medio de la absorción de fotones, lo que se conoce como *fotoionización*. Cuando el fotón tiene suficiente energía, su absorción por parte de un electrón da lugar a la emisión de otro electrón. Lo que queda es un átomo o molécula ionizado.

Una de las principales características que definen a un plasma es su capacidad de responder colectivamente a impulsos internos y externos. Esto es, para un gas constituido de átomos o moléculas neutras, las interacciones entre sus componentes se dan a distancias cortas; pero en el interior de un plasma, las partículas interactúan a distancias mucho mayores, por lo que aún los plasmas de baja densidad funcionan de manera cohesiva. Cada ion y cada electrón libre en el interior de un plasma puede sentir la influencia de muchas partículas a su alrededor, de manera que el comportamiento del plasma está determinado por interacciones colectivas y no sólo por la interacción entre dos partículas individuales.

Otra de sus características es la poca restricción al movimiento de cargas, por lo que el plasma tiende a mantener un estado de neutralidad eléctrica aún en regiones muy pequeñas. Cualquier acumulación de carga de un sólo signo en una región dada del plasma, producirá una fuerza atractiva para las cargas de signo opuesto lo suficientemente grande como para recuperar el equilibrio de la carga eléctrica casi instantáneamente. En este caso, el plasma permanecerá en un estado de *cuasineutralidad*, lo que significa que es un estado en el que la concentración de cargas positivas es casi igual a la concentración de cargas negativas.

Los movimientos colectivos y la cuasineutralidad son fundamentales para el estado de plasma, por lo que se puede definir al plasma como un sistema cuasineutro constituido por un gran número de partículas cargadas que exhiben movimientos colectivos.

1.1.2 PARÁMETROS DE UN PLASMA^[1]

De aquí en adelante cuando se hable de iones, se estarán considerando iones positivos, a menos que se indique lo contrario. Dado que existen plasmas en entornos muy distintos y con características muy diversas, es necesario definir apropiadamente los parámetros que describen el comportamiento de un plasma. Los principales parámetros son:

a) Neutralidad o cuasineutralidad

Generalmente un plasma está formado por igual número de iones positivos y electrones, lo que anula la carga total del sistema. En tal caso se habla de un plasma neutro; sin embargo, esta condición no siempre se satisface. Considérese por ejemplo, una fuente de iones dentro de la cual se admite gas He; no solamente se formarán iones He^+ sino que también se formarán iones He^{2+} , contribuyendo así a un número ligeramente mayor de electrones que de iones. Pero dado que la energía que se requiere para ionizar doblemente al He es muy grande (78.7 eV), puede decirse que el número de electrones y iones dentro del plasma es muy parecido, lo que se expresa como cuasineutralidad:

$$n_i \approx n_e \quad (1.1)$$

donde n_i es el número de iones y n_e es el número de electrones.

b) Longitud de Debye

El alcance de la fuerza eléctrica entre dos partículas es infinito, pero en el interior de un plasma éste se reduce debido a la presencia de las demás cargas de signo contrario que rodean a cualquier carga.

Consideremos un ion positivo en un plasma, el cual debido a la fuerza de Coulomb, atraerá toda una nube de electrones. Estos electrones formarán alrededor del ion una capa de carga negativa que impedirá que la carga de este ion sea sentida por cargas más lejanas. Lo mismo sucederá con los electrones y de esta manera se genera un efecto de *apantallamiento*, que limita el alcance real de la fuerza atractiva o repulsiva de cada carga hacia sus vecinos.

Esta distancia, que puede definirse como el radio de la esfera real de influencia de cada carga dentro del plasma, se conoce como la *longitud de Debye*, cuya expresión está dada por:

$$D = \left(\frac{\epsilon_0 kT}{2n_e e^2} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

donde ϵ_0 es la constante de permitividad ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$), k es una constante ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) llamada constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta del plasma en Kelvin, n_e es el número de cargas (positivas o negativas) por metro cúbico y e ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) es la carga del electrón.

La longitud de Debye proporciona una medida de la distancia a la cual la influencia de una sola partícula cargada es dominante. Más allá del valor de D , el campo eléctrico y, por tanto, la influencia de la partícula individual, es nula, y los efectos colectivos dominan.

Entonces, un criterio cuantitativo para la existencia de un plasma es que la dimensión lineal, L , del sistema sea grande comparada con D . Esto no es una gran restricción mientras la ionización del gas sea apreciable. A $T = 2000 \text{ K}$ y $n_e = 10^{18} \text{ electrones o iones/m}^3$, la longitud de Debye es $2.7 \times 10^{-6} \text{ m}$.

c) Frecuencia de plasma

Uno de los más rápidos e importantes movimientos colectivos es la oscilación de la

mayoría de los electrones del plasma respecto de los iones. Estas oscilaciones se producen cuando se viola la cuasineutralidad del plasma y las fuerzas electrostáticas entran en acción como una fuerza restauradora. Dado que los iones son mucho más masivos que los electrones, casi no se van a mover, por lo que la oscilación más notable es la de los electrones. Esto nos lleva a una oscilación armónica de los electrones.

La frecuencia de esta oscilación está dada por:

$$\nu = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

donde m_e es la masa del electrón ($m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ Kg) y las demás variables son las mismas de la ecuación 1.2. Para $n_e = 10^{18}$ electrones o iones / m^3 tenemos $\nu = 4.4 \times 10^{10}$ ciclos/s.

d) Temperatura: velocidad térmica

En general, las partículas de una determinada especie que están localizadas en un punto dado no tienen igual velocidad. Por el contrario, presentan una distribución de velocidades que en el equilibrio térmico está descrita por la distribución de Maxwell-Boltzmann. A mayor temperatura, mayor será la dispersión de velocidades.

Una medida de tal dispersión es la velocidad cuadrática media que, en el equilibrio térmico, se denomina también *velocidad térmica*, v_t . La velocidad térmica de los electrones es:

$$v_t = \left(\frac{3KT}{m_e} \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

1.1.3 TIPOS DE DESCARGAS GASEOSAS^[2,3]

Para entender los diferentes tipos de descarga gaseosa, se iniciará con el estudio de las descargas que corresponden a una corriente mínima de conducción, y de ahí se analizarán los casos en los que la corriente es máxima. Consideremos que el gas está encerrado en un tubo aislante, como se muestra en la figura 1.1 . En cada extremo del tubo hay un electrodo y entre ambos electrodos está una fuente de voltaje conectada en serie con una

resistencia cuyo valor es el adecuado para controlar la descarga gaseosa. La presión y la composición del gas pueden ser variables.

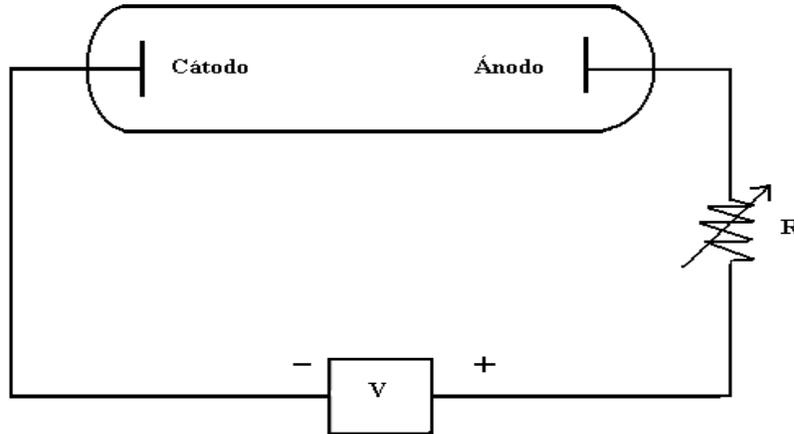


Figura 1.1 Un tubo de descarga.

a) Descarga no-automantenida

Mientras la corriente sea menor o igual a 10^{-11} A, el flujo de corriente no es suficiente para ionizar el gas de manera continua. Se requiere de un agente ionizante externo si se espera que el valor de la corriente no decaiga. Este tipo de descargas se llama *no-automantenida*.

La energía necesaria para preservar esta clase de descargas puede ser, por ejemplo, añadiendo energía de ionización a través de radiación de una longitud de onda, λ , apropiada .

Si la energía de ionización está dada por E_i , una radiación de frecuencia mínima:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_i}{h} \quad (1.5)$$

producirá la ionización al ser absorbida por el átomo. (h es la constante de Planck y tiene un valor de 6.62×10^{-34} J-s). Para energías de ionización del orden de 10 eV, se necesita una radiación con una longitud de onda máxima de $\lambda = 1239.8 \text{ \AA}$, que se encuentra en la región ultravioleta.

b) Descarga de Townsend

Si la diferencia de potencial a través del tubo de descarga es bastante grande (entre 100 y 600 V), la descarga se automantiene. La transición entre descargas no-automantidas y automantidas se efectúa para valores de la corriente mayores a 10^{-11} A, como se indica en la figura 1.2 .

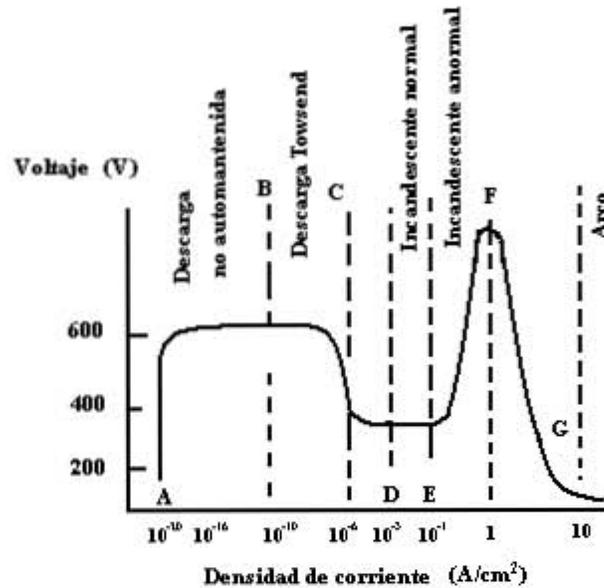


Figura 1.2 Curva característica del voltaje como función de la densidad de corriente para una descarga gaseosa

Entre los puntos B y C de la gráfica tienen lugar descargas conocidas como *descargas de Townsend*, en honor del físico que las estudió. Estas descargas son automantidas pues la corriente no se modifica a pesar de que se le retire la fuente de ionización externa.

En el voltaje de transición, las descargas combinadas que dan lugar al inicio del proceso de ionización, son también capaces de mantenerla. Sin embargo, hay que decir que un gas que se encuentre dentro de un tubo de descarga bajo la acción de una diferencia de potencial adecuada para producir una descarga automantida, no llegará a la ruptura de manera espontánea a menos que una influencia externa intervenga provocando una cierta cantidad de ionización.

Una vez que se logra la ionización inicial, los electrones pueden ganar energía en las colisiones y producir más ionización. Los electrones libres están entonces sujetos a la acción del campo eléctrico aplicado, y por tanto, pueden incrementar la ionización.

Como consecuencia, hay un crecimiento rápido del nivel de ionización y del flujo de corriente. La condición para el automantenimiento de una descarga se puede expresar de la siguiente manera: el número de electrones liberados por unidad de volumen dn_e en una distancia dx a lo largo de un campo eléctrico, E , es proporcional a E y a la densidad n_e de electrones, es decir,

$$dn_e = \epsilon E n_e dx \quad (1.6)$$

donde ϵ es el número de electrones liberados por volt y por electrón inicial. Integrando esta ecuación se obtiene:

$$n_e = n_0 \exp(\epsilon E x) \quad (1.7)$$

Cuando $x = d$ entonces $Ed = V_B$, que es el valor para el cual principia la descarga automantenida. Esta diferencia de potencial V_B recibe el nombre de *voltaje de ruptura*. Se tiene entonces que,

$$n_e = n_0 \exp(\epsilon V_B) \quad (1.8)$$

Además del proceso mencionado anteriormente, los iones que se dirigen hacia el cátodo bajo la acción del campo eléctrico producen emisión secundaria de electrones en el mismo cátodo. Si cada ion produce χ electrones secundarios, el número total de electrones producido en ambos procesos es $\chi (n_e - n_0)$. Para que la descarga sea automantenida este número debe ser igual a n_0 . Por lo tanto,

$$\chi[\exp(\epsilon V_B) - 1] = 1 \quad (1.9)$$

Usualmente $\exp(\epsilon V_B) \gg 1$. ϵ y χ se conocen como el primer y segundo coeficientes de Townsend, respectivamente.

c) Descargas incandescentes

Si se incrementa la corriente de la descarga haciendo que la resistencia en serie disminuya, los iones en el gas comenzarán a agruparse cerca del cátodo formando una nube de carga espacial positiva. El efecto de esta nube es concentrar la intensidad del campo eléctrico aplicado en una distancia más bien corta. Si no hay una resistencia que

limite la corriente, la carga espacial provocará un incremento continuo de la corriente y, en consecuencia, de la ionización. Cuando la corriente crece a unos cuantos miliamperes, la caída de potencial a través del tubo alcanza un mínimo.

Esta región de bajo voltaje representa las *descargas incandescentes*, y es la correspondiente a la parte de la curva característica de la figura 1.2 comprendida entre los puntos D y E.

La figura 1.3 muestra el diagrama de un tubo de descarga que opera en las condiciones mencionadas anteriormente, junto con gráficas del potencial y de la distribución de carga espacial.

Este tipo de descargas es alimentado en su totalidad, por los electrones secundarios que produce el bombardeo de los iones positivos sobre el cátodo. Los espacios oscuros y brillantes en el tubo que aparecen durante la descarga se describen brevemente a continuación.

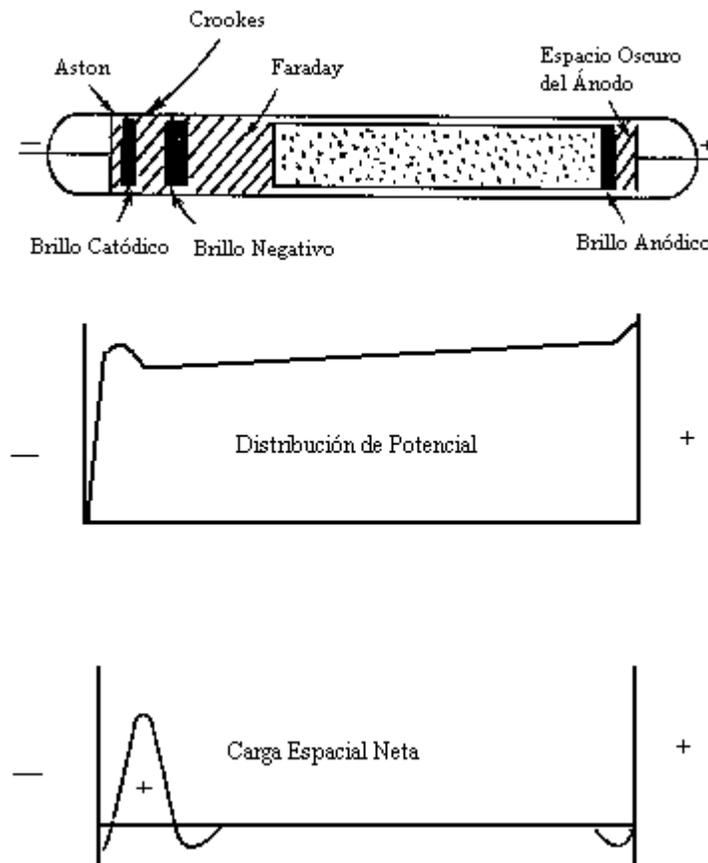


Figura 1.3 Apariencia física de una descarga brillante y gráficas del potencial y de la distribución de carga espacial neta

Los electrones secundarios producidos por el bombardeo de los iones se acumulan en el *espacio oscuro de Aston* (ver figura 1.3), y algunos se recombinan con los iones cercanos al cátodo, ocasionando el *brillo del cátodo* en la parte exterior de la región de oscuridad. Otros electrones se mueven del espacio oscuro de Aston hacia el brillo del cátodo sin que sean capturados, y son acelerados en la *región oscura de Crookes* por la carga espacial de iones positivos. En la región de Crookes los electrones adquieren energía suficiente para producir colisiones inelásticas; estas colisiones, a su vez, excitan el gas produciendo el *brillo negativo*.

El extremo del brillo negativo que se encuentra del lado del ánodo, indica el punto en el cual la energía de los electrones es demasiada baja para producir excitación posterior. Los electrones son acelerados todavía más en el *espacio oscuro de Faraday*, produciendo una *columna positiva*, la cual se extiende casi hasta el ánodo. En la columna positiva la carga espacial neta es cero. La columna positiva es un plasma.

Cuando la corriente en una descarga incandescente normal aumenta, la densidad de la corriente en el cátodo no sufre ninguna alteración. Esto se debe a que conforme la corriente crece, el área del cátodo también lo hace. Después de que toda el área del cátodo participa en la descarga, la corriente puede incrementarse solamente si la diferencia de potencial entre los electrodos aumenta. Este fenómeno se llama *descarga incandescente anómala*, y es el que corresponde a los puntos de la gráfica de la figura 1.2 que están comprendidos entre E y F. Cuando la densidad de la corriente crece, su crecimiento va acompañado por un aumento de la carga espacial y del campo en el cátodo. Finalmente, la energía que los iones positivos ceden al cátodo es lo suficientemente grande como para provocar emisión térmica de electrones. Cuando esto sucede, el voltaje a través de la descarga puede bajar hasta un valor característico correspondiente a una *descarga en arco*.

d) Descarga en arco

La descarga en arco a baja presión de gas presenta tres zonas características entre el cátodo y el ánodo en el tubo de descarga (figura 1.4). Estas regiones se caracterizan por la diferencia de potencial que se presenta a lo largo del tubo de descarga. Como se muestra en la figura 1.4, la primera región, llamada *caída catódica*, tiene la más alta diferencia de potencial (V_c) durante la descarga y su valor es sólo ligeramente inferior a la diferencia de potencial total. La segunda región todavía es la columna positiva, que

ocupa casi todo el volumen entre cátodo y ánodo con una diferencia de potencial muy pequeña. Por último en la región de *caída anódica* la diferencia de potencial es también pequeña comparada con la diferencia de potencial en la región de caída catódica.

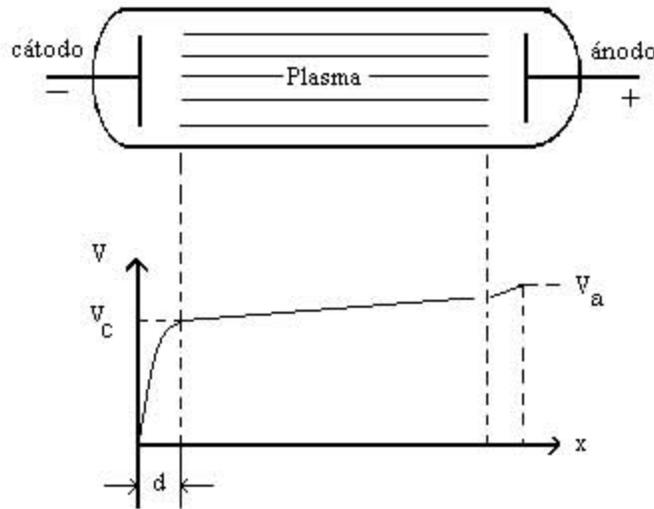


Figura 1.4 Distribución del voltaje en una descarga de arco

El valor V_c en la caída catódica depende de la emisión de electrones por el filamento (emisión termoiónica), y necesita ser mayor que la energía de ionización E_i de los átomos del gas en la región de descarga ($eV_c > E_i$) y además, su valor debe ser suficientemente alto para que la corriente electrónica tenga la densidad necesaria para que la descarga sea automantenida.

1.2 PROCESOS QUE OCURREN EN LA FORMACIÓN DE PLASMAS

1.2.1 IONIZACIÓN EN GASES^[3,4]

Cuando un átomo o molécula absorbe suficiente energía, uno o más electrones se liberan, y entonces se forman partículas cargadas positivamente; la partícula está ionizada, y el proceso se llama *ionización*. Los procesos más importantes de ionización son por colisión de electrones y por absorción de radiación, también conocido como fotoionización. La formación de iones negativos ocurre cuando electrones libres están disponibles para ligarse a sí mismos a átomos o moléculas neutras.

En la ionización por impacto electrónico, se estudia un sistema en el cual un cátodo caliente emite electrones que se introducen en el gas y permiten la conducción eléctrica. Si la diferencia de potencial es suficientemente grande, los electrones emitidos por el cátodo pueden adquirir bastante energía como para producir ionización en el gas a través de colisiones.

Los iones y electrones se mueven en direcciones opuestas bajo la acción de un campo eléctrico aplicado, y al hacerlo se producen colisiones con otros electrones, iones y átomos del gas, que afectan considerablemente la descarga.

Después de pasar por una diferencia de potencial V , y considerando que la energía cinética ganada es igual a la pérdida de energía potencial, tenemos para iones y electrones que parten con velocidad inicial cero, que

$$\frac{1}{2} m_e v_e = |eV| \quad (1.10)$$

$$\frac{1}{2} m_i v_i = |eV| \quad (1.11)$$

donde m_e es la masa del electrón y m_i es la masa del ion; v_e y v_i son las velocidades correspondientes. Si, por ejemplo, existe una diferencia de potencial $V = 10$ V, la velocidad del electrón es $v_e = 1.8 \times 10^8$ cm/s, y para el ion de hidrógeno es $v_i = 4.5 \times 10^6$ cm/s. Para una densidad igual de iones y de electrones, la parte principal de la corriente i de la descarga se debe a los electrones, cuya velocidad relativa es mucho más grande que la de los iones.

Tanto los iones como los electrones sufren colisiones elásticas como inelásticas. En una colisión elástica, la energía cinética de las partículas que la producen se conserva, en tanto que en una colisión inelástica no sucede así; en las colisiones inelásticas el cambio en la energía cinética se compensa por la variación de la energía interna de una o de las dos partículas que en ella toman parte.

Para entender tales procesos consideremos un electrón, cuya energía cinética es mayor que la requerida para ionizar, que colisiona con las moléculas o átomos de un gas los cuales se encuentran en el estado base. El punto de vista clásico es considerar al electrón y al átomo como esferas elásticas duras de masa constante las cuales en una colisión intercambian energía y momento sujetas a las leyes de conservación. Como resultado del

impacto, el electrón primario usualmente produce un ion positivamente cargado y otro electrón.

En general, la energía de los dos electrones emergentes no será la misma sino que dependerá del ángulo en el cual son dispersados. Cuando un electrón primario se aproxima a un átomo puede, en virtud de su campo eléctrico, interactuar con uno de los electrones ligados más cercanos a su trayectoria. Si la fuerza ejercida por el electrón primario sobre el atómico es suficientemente grande y actúa durante un tiempo considerable, un electrón secundario puede ser liberado del átomo. Qué tanto un electrón primario penetrará en el átomo dependerá de su dirección inicial y su velocidad, y también del número y configuración de los electrones atómicos. Entre más grande la rapidez y más pequeño el número atómico, más pequeña es la desviación del electrón primario de su trayectoria inicial. La desviación o dispersión es por causa de la repulsión del electrón primario por los electrones atómicos. Sin embargo, un átomo no puede considerarse como una distribución rígida de cargas. Por lo tanto, el electrón primario que se aproxima desplazará a los electrones atómicos con respecto al núcleo y el átomo se convierte en un dipolo eléctrico inducido. El grado de polarización es más grande para los átomos más pesados, esto es, incrementa con el número atómico. Se sigue que el cambio de momento, el potencial de ionización, y la probabilidad de ionización dependerán de la polarizabilidad del átomo.

Desarrollar un dipolo inducido lleva tiempo. Por otra parte, el intervalo de tiempo durante el cual el electrón primario está cercano al átomo y su distancia más cercana de aproximación, determinan la amplitud del momento dipolar. Consecuentemente un electrón muy rápido puede sólo actuar sobre los electrones atómicos durante un tiempo muy corto y la polarización no puede darse por completo.

La *energía de ionización* (E_i) de un átomo puede derivarse fácilmente sólo en ciertos casos. La energía requerida para desprender al electrón de un átomo de hidrógeno, el cual tiene una carga nuclear positiva ($Z=1$) está dada por la suma de la energía potencial y cinética:

$$E_i = -\frac{Ze^2}{r} + \frac{m_e v^2}{2} \quad (1.12)$$

donde e y m_e son la carga y la masa del electrón, respectivamente y v es la velocidad del

electrón en la órbita. Según la teoría de Bohr, el electrón que se encuentra en el estado de energía más bajo ($n=1$) se mueve en una órbita circular cuyo radio r está dado igualando la atracción electrostática entre el electrón y el protón con la fuerza centrípeta que actúa sobre el electrón. Por tanto,

$$\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \quad (1.13)$$

La cuantización del momento angular requiere que:

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad (1.14)$$

Despejando v de (1.13), y sustituyendo en (1.12) se obtiene una expresión para la energía de ionización en función de r :

$$E_i = -\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{r} \quad (1.15)$$

Eliminando v de (1.14) se obtiene una expresión para r . Sustituyéndola en (1.15), se encuentra que:

$$E_i = -\frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^2} \left(\frac{Z}{n}\right)^2 \quad (1.15)$$

Sustituyendo los valores de las constantes en (1.15), encontramos que para el átomo de hidrógeno

$$E_i = -13.6 \text{ eV} \quad (1.16)$$

La dinámica de las colisiones elásticas está basada en la conservación de la energía cinética y el momento lineal de las partículas. A partir de estos requisitos de conservación se obtiene que los electrones sólo transfieren una parte pequeña de su energía cinética a los iones si se efectúan entre ellos colisiones elásticas. Si consideramos, por ejemplo, una colisión con un solo grado de libertad entre dos

partículas de masas m_1 y m_2 , donde m_2 está inicialmente en reposo, la razón entre las energías cinéticas es :

$$\frac{E_{2f}}{E_{1i}} = \frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2} \quad (1.17)$$

Para $m_1 \ll m_2$, la relación anterior se reduce a sólo:

$$\frac{E_{2f}}{E_{1i}} = \frac{4m_1}{m_2} \quad (1.18)$$

Para $m_1 / m_2 \approx 1/1800$, que es el caso de un electrón que choca con el ion de hidrógeno, la fracción de la energía transferida en la colisión (del electrón al ion) es solamente 4/1800. Por lo tanto, no ocurre excitación o ionización de las partículas del gas.

Si la colisión es inelástica, los átomos o moléculas del gas se excitan o ionizan por la energía que adquieren de las partículas incidentes. Por lo tanto, la condición para que ocurra ionización es que la energía cinética de los electrones, $\frac{1}{2}mv^2$, sea por lo menos igual a la energía de ionización del átomo, eV_i , esto es:

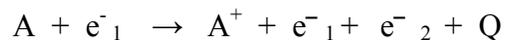
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq eV_i$$

1.2.2 MECANISMOS DE IONIZACIÓN^[1]

La ionización es un fenómeno que consiste en arrancar uno o más electrones de las capas de un átomo o molécula de un gas, puede ser efectuado por medio del bombardeo de electrones, de otros iones, de átomos neutros o de radiación (fotones).

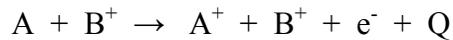
Si se representa por A, B, ..., a un átomo o molécula en su estado natural y por A^+ , B^+ , ... cuando se encuentran ionizados se tiene que:

a) La reacción que se presenta, al bombardear con un electrón e^- a un átomo o una molécula A, queda expresada de la forma siguiente:



tal expresión significa que se obtiene un átomo ionizado positivamente A^+ , el electrón incidente e^-_1 , el electrón desprendido del átomo e^-_2 , más cierta energía de reacción Q , donde $Q = E_{cin} - E'_{cin}$.

b) Para el caso del choque de un ion positivo B^+ con un átomo o molécula A , la reacción que se obtendrá será:



logrando ionizar positivamente al átomo A al serle arrancado un electrón e^- , con su correspondiente energía de reacción Q .

c) Si la ionización se efectúa por medio de dos átomos neutros A y B , la reacción que ocurre puede ser cualesquiera de estas dos formas:



dependiendo de: (i) que el átomo A choque con un electrón e_B^- correspondiente al átomo B , quedando éste ionizado, (ii) que el átomo B choque con un electrón e_A^- correspondiente al átomo A , quedando éste ionizado.

d) Cuando se hace incidir un haz de luz (fotón) sobre un átomo A desprendiendo un electrón (efecto fotoeléctrico), se obtiene el proceso siguiente:



lo que significa que un fotón incidente con una energía $h\nu$, cambia su energía después del choque a $h\nu'$ donde ν es la frecuencia inicial del fotón, y ν' es la frecuencia después del choque.

1.2.3 FENÓMENOS EN LA IONIZACIÓN

En la ionización se presentan los siguientes fenómenos:

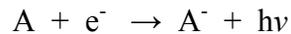
- a) Fenómeno de captura
- b) De recombinación

- c) De colisión superelástica
- d) Transferencia de carga

a) Fenómeno de captura

Es la captura de un electrón e^- por un átomo o molécula neutra A, para así formar un ion negativo A^- , emitiéndose la energía de amarre bajo la forma de un fotón (captura radiativa).

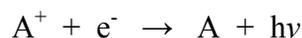
La expresión de la reacción es:



Este proceso depende de la energía cinética del electrón incidente y de la naturaleza del átomo o molécula golpeada, la energía liberada en el curso de la captura, aparece bajo la forma de radiación $h\nu$. Esta energía será la suma de la energía cinética E_{cin} del electrón y de la afinidad electrónica E_a del átomo considerando $h\nu = E_{cin} + E_a$.

b) Fenómeno de recombinación

Es cuando un electrón queda ligado a un átomo o molécula ionizada A^+ . Para el caso en que el átomo ionizado positivamente capture a un electrón, este átomo queda neutralizado emitiendo energía de radiación según la expresión:



proceso que se denomina como “recombinación radiativa”, y donde la energía del fotón $h\nu$ está dada por $h\nu = E + eV_i$, siendo E la energía del electrón.

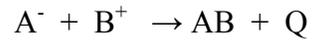
En el fenómeno de recombinación, existe también la posibilidad de que dos iones de signos contrarios se encuentren y que en el curso del choque el ion negativo ceda su electrón al ion positivo, dando por resultado la formación de dos átomos neutros según la expresión:



La energía de recombinación, que es aproximadamente igual a la energía de ionización menos la afinidad electrónica, puede aparecer ya sea bajo la forma de energía

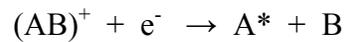
cinética aumentada en los dos átomos como energía de excitación, o como energía de radiación emitida en el curso de la recombinación.

Es posible también, la recombinación de un ion positivo con uno negativo para formar un átomo neutro, siendo la reacción:



presentándose estos casos solamente en regiones de un gas donde la ionización es muy densa.

Existe también la recombinación disociativa, que se produce cuando un electrón se recombina con un ion molecular, originando que la molécula se disocie en dos átomos, uno de ellos que queda excitado y otro en estado neutro, como se representa mediante la expresión:



c) Colisión superelástica

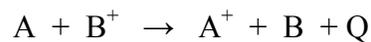
Es la colisión de un electrón incidente con un átomo excitado A^* , entregando éste su energía de excitación al electrón incidente bajo la forma de energía cinética E'_{cin} , siendo la representación de la reacción:



con $E'_{cin} > E_{cin}$.

d) Transferencia de carga

Se produce en el curso de las colisiones entre átomos ionizados y neutros, durante los cuales la carga del ion pasa al átomo neutro, siendo la reacción:



1.2.4 EXCITACIÓN

Los átomos y moléculas de un gas se pueden excitar por el impacto de electrones, iones o partículas neutras, o por la absorción de fotones.

La excitación por impacto de electrones ocurre si la energía cinética del electrón incidente, en la colisión inelástica electrón- átomo o electrón molécula, es la necesaria para la transición de un nivel de energía electrónico a otro en el caso atómico, y además de los estados electrónicos, los estados rotacional y vibracional en el caso de las moléculas.

Después de la colisión inelástica la energía cinética del proyectil es menor que antes y la diferencia de energía cinética es invertida precisamente en la excitación de la partícula con la que choca el electrón incidente.

En la colisión electrón-átomo, una transición permitida hará pasar al átomo de un estado m con energía E_m a otro estado con energía n con energía E_n , siendo $E_m - E_n = E_{mn}$ la energía que le comunica al electrón y que se suele llamar energía de excitación. Por lo tanto, si el valor de la energía comunicada por la colisión es menor que la energía de excitación, el proceso de excitación no ocurre.

Si el electrón choca con una molécula, la energía que le comunica puede contribuir parcialmente a la excitación de electrones y al cambio del movimiento de los átomos que conforman a la molécula.

En los procesos de excitación mediante colisiones inelásticas átomo-átomo ó átomo-ion, es muy probable que ocurran gran número de procesos en comparación con los que ocurren en las colisiones inelásticas electrón-átomo. Esto se debe a que los iones y átomos poseen estructura y pueden cambiar sus estados de energía, cosa que no ocurre con los electrones.

La excitación por absorción de un fotón ocurre cuando su energía satisface el requisito para la frecuencia de Bohr: $h\nu = E_n - E_m$, lo que da una transición ópticamente permitida entre un estado m y el estado excitado n .

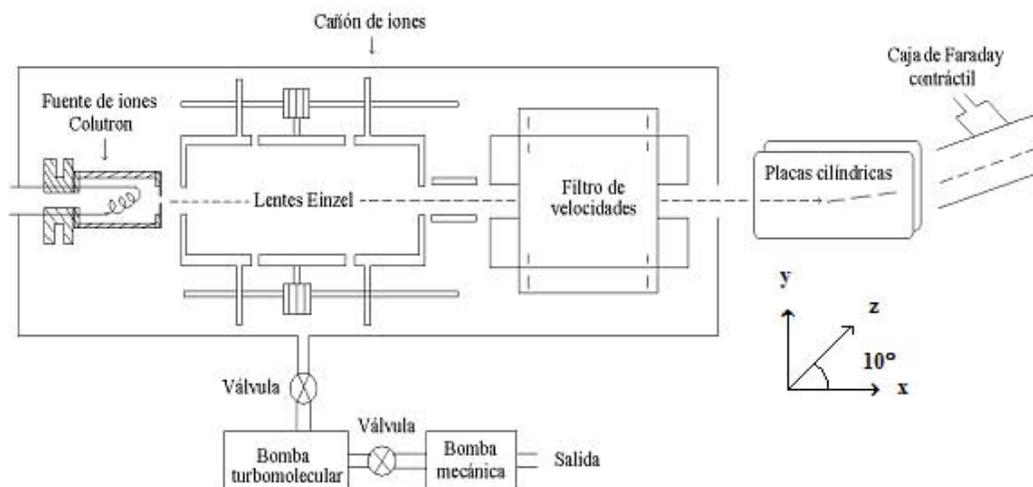
CAPÍTULO 2. SISTEMA EXPERIMENTAL

El desarrollo de este trabajo se realizó en el acelerador de baja energía, de 1 a 5 keV, que se encuentra en el Laboratorio de Espectroscopía del Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, localizado en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

El acelerador está formado principalmente por un cañón de iones que en su interior tiene: una fuente de iones tipo *colutron* y un sistema de enfoque, aceleración y selección de iones (lentes Einzel y filtro de velocidades); unas placas paralelas cilíndricas para corregir la dirección del haz de iones (ya que el cañón de iones se encuentra desviado 10° con respecto al eje principal del acelerador); la celda de reacción donde se encuentra el blanco; y el sistema de detección conformado por una caja de Faraday, un analizador parabólico y dos multiplicadores de electrones.

Se tiene también un sistema de vacío conformado por tres bombas mecánicas y dos bombas turbomoleculares, con las cuales se alcanza una presión de vacío de 10^{-7} Torr.

Para los objetivos de esta tesis, sólo se trabajó con los componente donde se producen, enfocan, aceleran y seleccionan los iones, por lo que únicamente se describen la fuente de iones, las lentes Einzel, el filtro de velocidades, la caja de Faraday (colocada después de las placas paralelas cilíndricas) así como las bombas mecánicas y turbomoleculares. La figura 2.1 muestra el sistema utilizado.



2.1 Esquema del sistema utilizado para este trabajo (fuente de iones, lentes Einzel, filtro de velocidades, placas cilíndricas, caja de Faraday y bombas de vacío).

El haz de iones se desvía 10° con respecto al eje principal del cañón.

2.1 SISTEMA DE VACÍO^[4,5]

Para garantizar que los iones que se están enviando hacia el gas que funciona como blanco, mantengan su identidad desde que se producen hasta que entran en la celda de reacción, y desde que se generan los productos hasta que éstos son detectados, es necesario contar con sistemas de vacío que proporcionen una presión tal que el camino libre medio λ de los iones moviéndose a través del gas residual, sea mucho mayor que la distancia que hay entre el lugar donde se producen los iones y el sistema de detección. Para encontrar la presión de operación se emplea la conocida fórmula $\lambda = (\sigma n)^{-1}$ donde n es el número de partículas por unidad de volumen del gas residual, σ es la sección transversal de colisión del proyectil con dicho gas. Por lo general, estas secciones son del orden de 10^{-16} a 10^{-15} y el camino libre medio es del orden de 10 veces mayor a las dimensiones del acelerador cuando la presión es de 10^{-7} Torr. Esta presión se alcanza con facilidad en el laboratorio. El sistema de vacío está compuesto por tres bombas mecánicas y dos bombas moleculares.

2.1.1 BOMBA MECÁNICA

Con este tipo de bombas se alcanzan presiones del orden de 10^{-1} a 10^{-3} Torr, y sirven de apoyo a las bombas turbomoleculares, ya que éstas funcionan óptimamente a partir de una presión de 10^{-3} Torr.

Las bombas mecánicas consisten en un espacio cilíndrico (estator) que alberga a un cilindro de diámetro menor que gira dentro de él (rotor). En el rotor, hay unas paletas que se encuentran sujetas por medio de un resorte. La bomba de paletas rotatorias posee dos ductos, uno de dimensiones mayores respecto al otro. El ducto mayor da al exterior de la bomba (conexión con la cámara a desalojar), y dentro de la bomba hasta el estator; es considerado como la entrada al estator. Por otra parte, el ducto pequeño es la salida del estator y conduce a un recipiente parcialmente lleno de aceite. Al final del ducto menor se coloca una válvula de descarga, la cual regula la salida de gas del estator al recipiente, éste a su vez tiene salida al exterior de la bomba.

El funcionamiento es el siguiente: al girar el rotor provoca que las paletas se deslicen sobre las paredes del estator, esto permite la entrada del gas entre el estator y el rotor; después se mueve el volumen de gas contenido en esta región hasta la salida del estator.

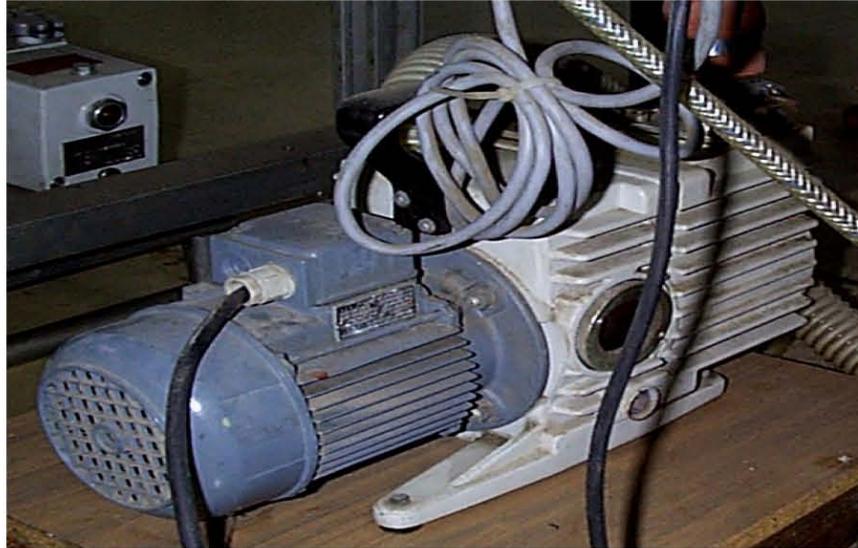


Figura 2.2 Fotografía de una bomba mecánica.

Para medir la presión de vacío obtenida por una bomba mecánica, se emplea un termopar. En su forma más simple, este medidor consiste de una unión termoeléctrica, cuya temperatura aumenta debido a una corriente eléctrica constante y regulada que se aplica al circuito. El cambio de la temperatura de la unión varía de acuerdo a la cantidad de calor tomada por el gas dentro del sistema, por lo que el potencial generado a través de las terminales de la unión depende de la temperatura y por consiguiente de la presión del gas. Los voltajes generados por la diferencia de temperatura son del orden de milivolts, suficientes para alimentar externamente un potenciómetro calibrado para indicar la presión.

2.1.2 BOMBA TURBOMOLECULAR

Este tipo de bomba cuenta con un rotor sobre el cual se encuentran montadas una gran cantidad de aspas, separadas éstas por una serie de discos que se encuentran fijos a la estructura de la bomba. El eje de las aspas (rotor) tiene sus extremos montados sobre baleros lubricados por aceite para reducir la fricción. El vacío se logra debido a la diferencia de presiones creada cuando las aspas giran a una gran velocidad (36, 000 rpm). El intervalo en el que operan eficientemente estas bombas va de 10^{-3} a 10^{-9} Torr. La figura 2.3 muestra una fotografía de una bomba turbomolecular.

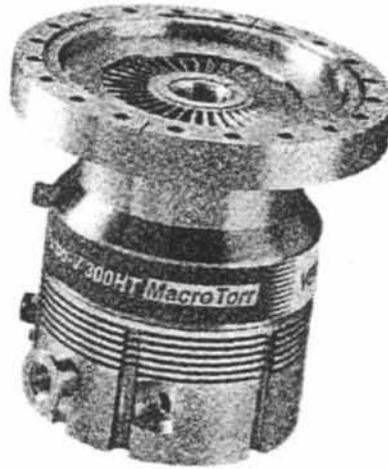


Figura 2.3 Fotografía de una bomba turbomolecular.

Para presiones menores a 10^{-3} Torr, se usan medidores de alto vacío como el medidor por ionización de cátodo caliente (ion gauge). En este tipo, los electrones emitidos de un filamento caliente, son acelerados hacia una malla cilíndrica cargada positivamente, algunos de ellos pasan entre el espacio de la malla y un colector negativo, al chocar con las moléculas del gas del sistema de vacío, producen iones positivos que son atraídos y capturados por el colector. Con un voltaje constante en la malla y con una emisión de corriente de electrones constante, el número de iones positivos es proporcional a la densidad molecular cuando la presión es menor a 10^{-3} Torr; en consecuencia, la corriente iónica sobre el colector es una medida indirecta de la presión.

2.2 FUENTE DE IONES^[12]

Otro elemento que forma parte del acelerador y que resulta de gran importancia es la fuente de iones, ya que es ahí donde se admite el gas a ionizar y, por medio de una descarga en arco se obtiene el ion con el que se desea trabajar. La fuente que se empleó es una fuente de iones tipo colutron; su fotografía se presentada en la figura 2.4 así como su esquema en la figura 2.5 .

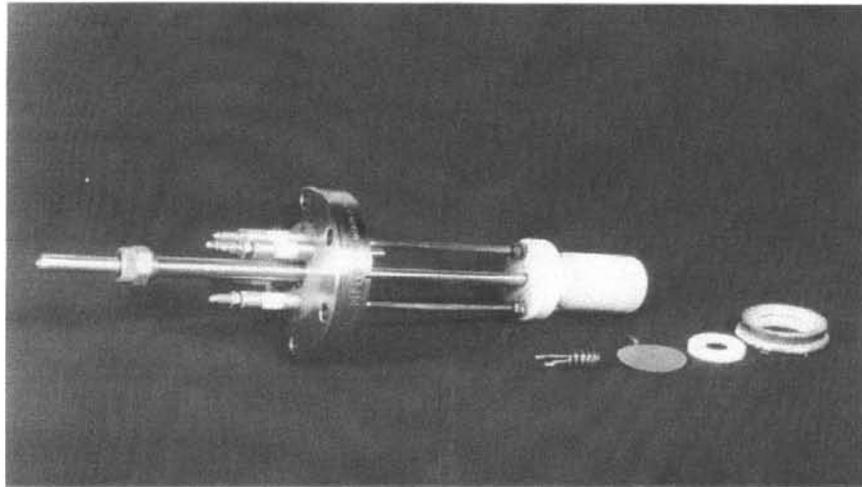


Figura 2.4 Fotografía de la fuente de iones.

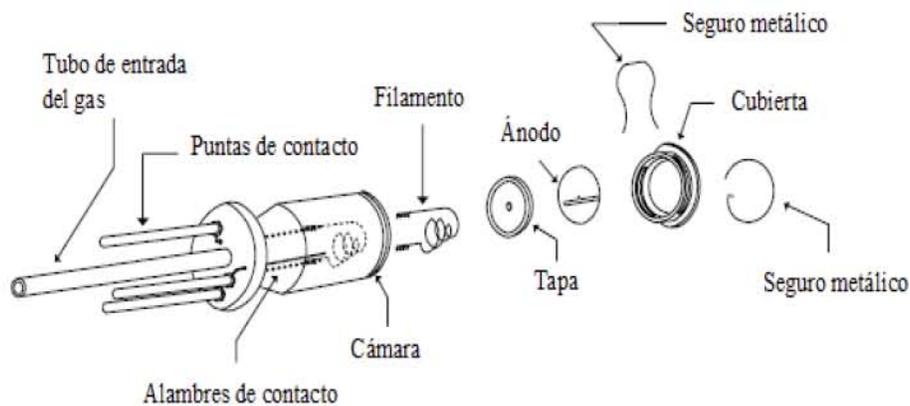


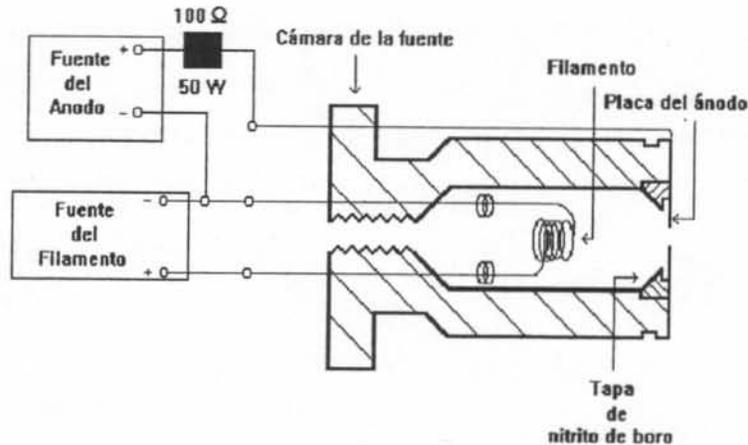
Figura 2.5 Esquema de la fuente de iones.

Los tres elementos principales de la fuente son los siguientes:

- 1) Cámara de la fuente: Es el espacio dentro del cual se admite el gas que se desea ionizar. Es de nitrito de boro que es un material de poca resistencia a esfuerzos mecánicos pero que en cambio, tiene la ventaja de soportar altas temperaturas por lo cual puede funcionar como un horno, por lo que permite obtener iones de materiales sólidos y gaseosos.
- 2) Filamento: Es un filamento de tungsteno que se conecta a una fuente de corriente para que por emisión termoiónica se obtengan los electrones responsables de la ionización. La corriente que se hace pasar por el filamento es tal que cuando se aplica una diferencia de potencial entre el filamento y el ánodo, se produce una descarga continua.
- 3) Ánodo. Una vez que el filamento ha producido electrones y que el gas que se desea ionizar se encuentra dentro de la cámara de la fuente, los electrones son acelerados

aplicando un voltaje al ánodo, tal que la energía que proporcione a los electrones sea suficiente para que estos logren ionizar a los átomos o moléculas del gas que se encuentra dentro de la fuente.

La figura 2.6 muestra un esquema de la electrónica de la fuente de iones.



2.6 Esquema de la electrónica de la fuente de iones.

2.3 ENFOQUE, ACELERACIÓN Y SELECCIÓN DE IONES

En la fuente de iones no sólo se producen iones de un solo tipo, como lo fue O^+ para este trabajo, sino también otros iones como O_2^+ . Todos estos iones son enfocados por medio de unas lentes electrostáticas conocidas como lentes Einzel y posteriormente se usa un filtro de velocidades para seleccionar el ion de interés. Una mejor comprensión del enfoque y aceleración de los iones producidos en la fuente, se logra estudiando el movimiento de partículas cargadas bajo la acción de un campo eléctrico.

2.3.1 ÓPTICA DE IONES^[7,8]

La propagación de la luz en cualquier medio heterogéneo puede describirse según la ley de refracción. Para esto, deben conocerse los valores de los coeficientes de refracción a lo largo de toda la trayectoria, teniendo importancia solamente sus valores relativos. El movimiento de partículas cargadas bajo la acción de un campo eléctrico estático puede estudiarse utilizando la representación de superficies equipotenciales, tal como se muestra en la figura 2.7.

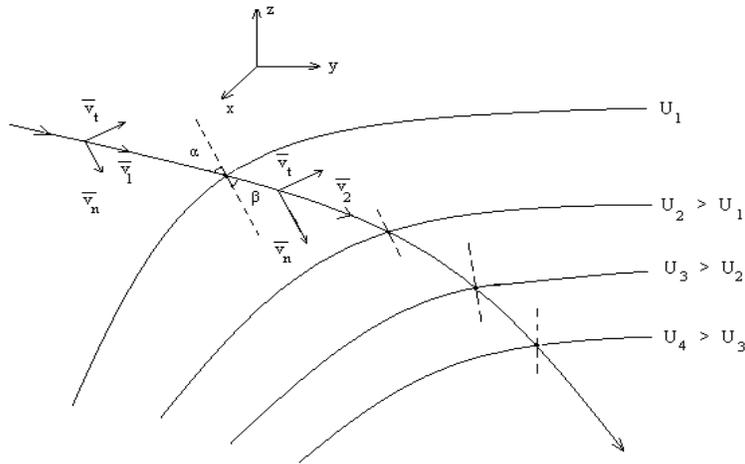


Figura 2.7 Trayectoria de una partícula cargada bajo la acción de un campo eléctrico.

Si las superficies se encuentran suficientemente cercanas unas de otras puede considerarse que el potencial en el espacio de separación entre dos superficies equipotenciales continuas es constante, y que todas las variaciones de potencial se dan por saltos pequeños entre las mismas superficies. Al atravesar la superficie U_1 (ver figura 2.7) la partícula experimenta la acción de la fuerza $\mathbf{F} = -qE \mathbf{z}$ de donde obtenemos para la velocidad su componente tangencial v_t y su componente normal v_n a la trayectoria. Se observa que $\Delta v_n \neq 0$ a la vez que $\Delta v_t = 0$, esto es $v_t = v_t'$ de donde se sigue que $v_1 \sin \alpha = v_2 \sin \beta$. Por analogía a la óptica geométrica a α y β se les denomina ángulo de incidencia y ángulo de refracción, respectivamente. Por otra parte, como la velocidad de una partícula está determinada por el valor del potencial en un punto dado, se tiene que:

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU$$

de donde $v = \sqrt{2qU/m}$ y la relación para α y β se puede escribir como:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sqrt{U_2}}{\sqrt{U_1}} \quad (2.2)$$

La raíz cuadrada del valor del potencial en un punto dado juega el papel de coeficiente de refracción. Así, la trayectoria se aproxima a una línea quebrada y la variación de su dirección se determina en cada punto de cruce con la superficie equipotencial por la ley de refracción. En el límite, la línea quebrada se transforma en una curva suave que describe la trayectoria de la partícula en el campo.

Los campos eléctricos de simetría axial son los más apropiados para enfocar haces de partículas cargadas, lo cual se logra con el empleo de cilindros coaxiales con orificios circulares.

2.3.2 LENTES EINZEL^[9]

De manera análoga a la óptica, en la cual una lente hace que los rayos luminosos que inciden sobre ella se concentren en un punto, existen lentes electrostáticas que se emplean para enfocar un haz de partículas cargadas. Así como existen lentes “delgadas y gruesas” en óptica, existen también lentes electrostáticas “delgadas y gruesas”, correspondiendo las primeras a planos conductores paralelos con una abertura en el centro (por donde pasan las partículas cargadas) a los cuales se aplicó una diferencia de potencial. Las lentes electrostáticas “gruesas” están hechas de secciones de cilindro conductor hueco a las que se aplica una diferencia de potencial. Éstas son conocidas como lentes Einzel, y se componen de tres electrodos cilíndricos de igual diámetro, alineados en un mismo eje, de tal manera que cuando se aplica el mismo potencial al primer y tercer electrodos, la energía de las partículas cargadas no se ve alterada, obteniendo únicamente un efecto de enfoque.

Considérese el caso particular de un haz de iones positivos con carga $+e$ que atraviesa por una lente “Einzel” con voltajes tales que $U_2 > U_1$, ver figura 2.8.

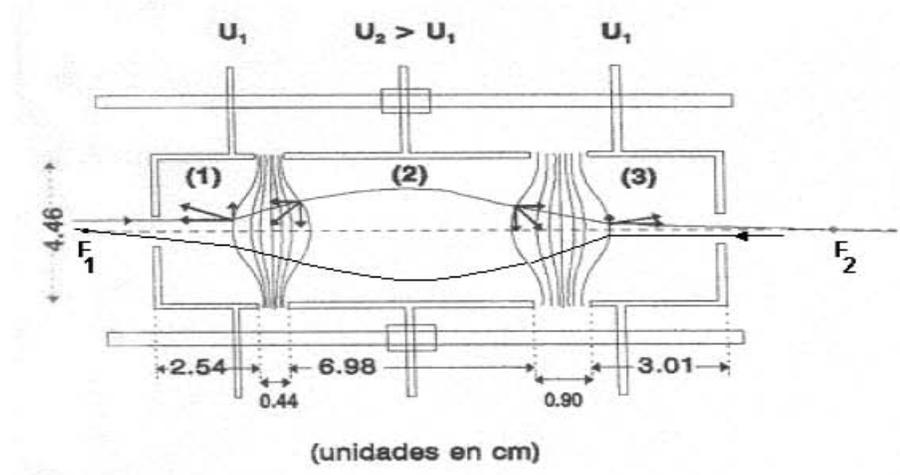


Figura 2.8 Esquema de las lentes Einzel.

Cerca del eje cada superficie equipotencial tiende a tomar forma esférica, el haz de iones paraxial se comportará como un haz de rayos luminosos que atraviesan una lente gruesa con coeficientes de refracción que varían gradualmente. A fin de simplificar, se

considerarán dos haces de iones paralelos al eje óptico, uno que entra por la izquierda y otro por la derecha; considérese ahora la primera trayectoria y la primera región de separación interelectrodos. En la primera parte de esta región la componente radial de la fuerza está dirigida hacia fuera del eje, y bajo la acción de esta fuerza el ion positivo se aleja de dicho eje. Del lado derecho de esta región la fuerza radial que actúa sobre el ion hace que cambie la concavidad de la trayectoria y se dirija hacia el eje. Cuando el ion positivo entra en la segunda región de separación, la fuerza radial continúa desviándolo hacia el eje y en la última parte de esta región la fuerza radial tiende a alejar al ion del eje. Se observa que el ion en la región del segundo electrodo pasa más tiempo bajo la acción de la fuerza radial de enfoque, que el tiempo en que está sometido a la fuerza radial de desenfoque. Por lo tanto, la trayectoria del ion positivo cruza el eje óptico en el punto F_2 .

Un análisis similar para el ion positivo que entra a la lente “Einzel” por la derecha indica que el haz converge sobre el eje óptico en el punto F_1 . A los puntos F_1 y F_2 se les llama primer y segundo focos principales de la lente (medidos a partir del centro del electrodo intermedio).

La fotografía de las lentes Einzel, así como el circuito eléctrico, se ilustran en las figuras 2.9 y 2.10 respectivamente.

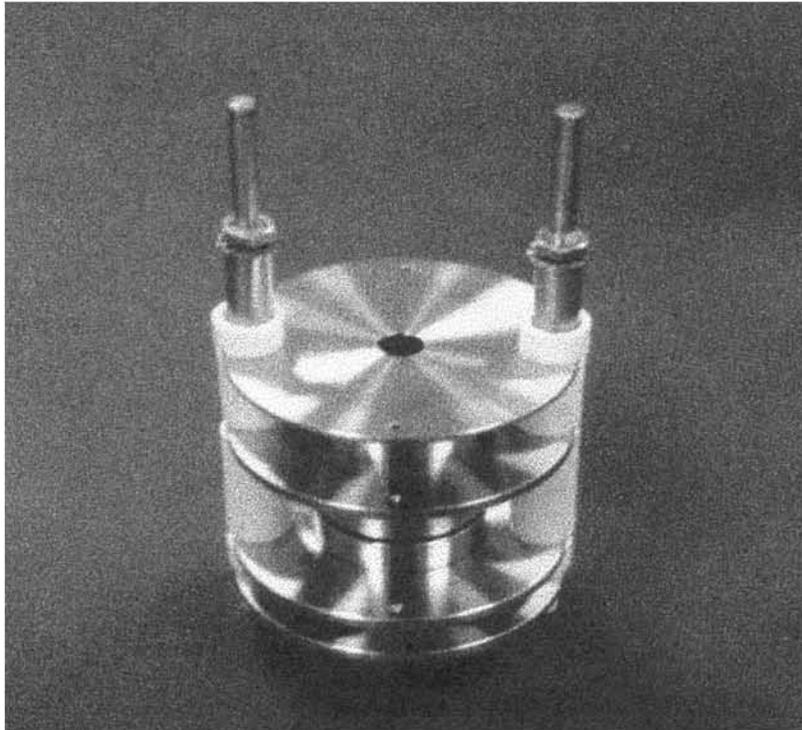


Figura 2.9 Fotografía de las lentes Einzel.

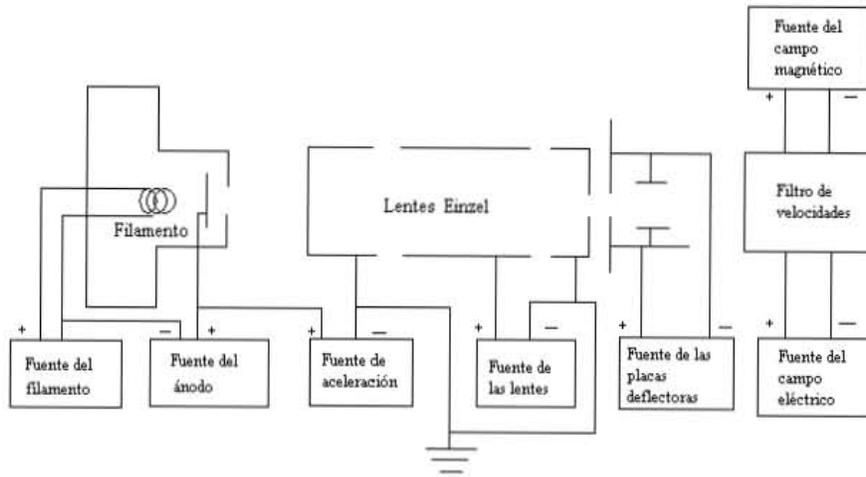


Figura 2.10 Electrónica de las lentes Einzel.

2.3.3 FILTRO DE VELOCIDADES^[10,14]

Una vez que se han producido los iones positivos y estos han sido acelerados y enfocados por medio de las lentes Einzel, el paso a seguir es seleccionar el ion con el que se desea trabajar siendo ésta la función del filtro de velocidades también conocido como filtro de Wien.

Este filtro de velocidades se compone de un imán (para proporcionar el campo magnético) y un juego de placas deflectoras electrostáticas (para proporcionar un campo eléctrico).

La manera como funciona este filtro es la siguiente: se aplican un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección del haz incidente. Como se sabe, la fuerza que actúa sobre una partícula con carga ne que se mueve con velocidad \mathbf{v} y se encuentra bajo la influencia de un campo eléctrico \mathbf{E} y uno magnético \mathbf{B} , está dada por la fuerza de Lorentz:

$$\mathbf{F} = ne (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.3)$$

En el filtro de Wien el campo magnético es proporcionado por un electroimán, mientras que el campo eléctrico se obtiene al aplicar una diferencia de potencial a un par de placas planas y paralelas. Una fotografía del filtro de velocidades se observa en 2.11. La figura 2.12 muestra una vista superior y una vista lateral del filtro de velocidades.

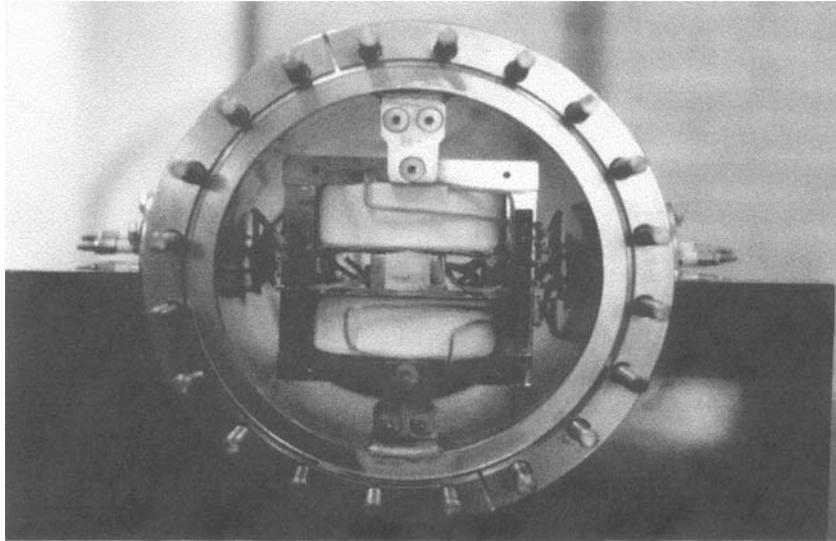


Figura 2.11 Fotografía del Filtro de Velocidades.

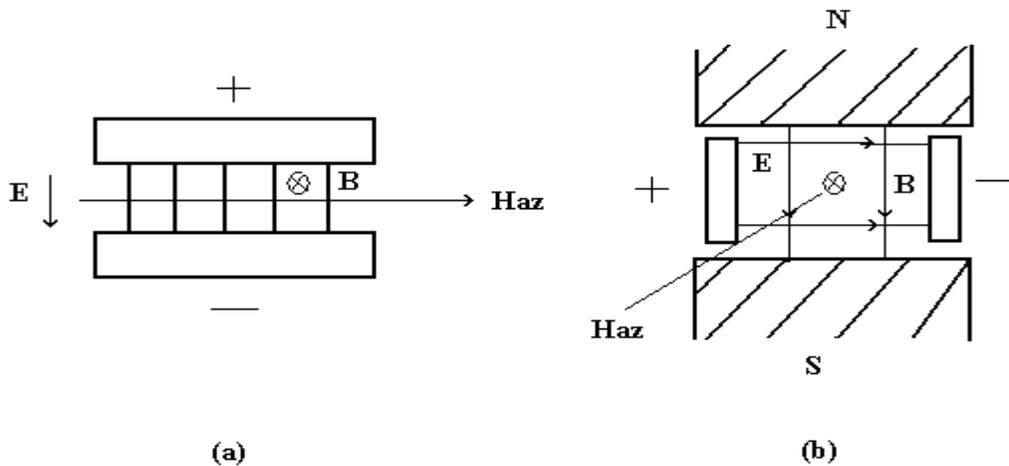


Figura 2.12 (a) Vista superior del filtro de velocidades. El campo magnético B entra en el plano de la hoja. (b) El filtro de velocidades visto desde la entrada del haz.

Sólo aquellos iones que tengan una velocidad $v' = E / B$ podrán pasar a través del filtro sin desviarse. Sabemos que $v' = \sqrt{2qV/m}$ donde q es la carga del ion, m es su masa y V es el voltaje de aceleración. Por tanto, un ion con velocidad v' y de masa m que se mueve a través del filtro no será deflectado si:

$$B \sqrt{\frac{2qV}{m}} = E \quad (2.4)$$

De esta ecuación que expresa la condición para que no exista deflexión, se obtiene la condición para la masa:

$$m = 2qV \left(\frac{B}{E} \right)^2 \quad (2.5)$$

Dado que el campo magnético para una bobina está dado por:

$$B = KI \quad (2.6)$$

donde I es la corriente de la bobina y K es una constante que depende del número de vueltas, de la constante de permeabilidad μ_0 y de la geometría de la bobina.

Por tanto, se tiene que:

$$\sqrt{m} = \frac{\sqrt{2qV}}{E} KI \quad (2.7)$$

Si el campo eléctrico E se mantiene constante, se tiene que:

$$k = \frac{E}{K\sqrt{2qV}} = \text{constante} \quad (2.8)$$

De lo que se sigue que:

$$I = k\sqrt{m} \quad (2.9)$$

Variando el campo magnético B mediante la corriente I se obtiene:

$$I_n = k\sqrt{m_n} \quad (2.10)$$

donde m_n es la masa del ion no deflectado para E e I_n dados.

La fuente de iones, las lentes Einzel y el filtro de velocidades se encuentran alineados en un eje que se encuentra desviado 10° con respecto al eje principal del acelerador; por tal razón, es necesario corregir la dirección del haz de iones. Para ello se cuenta con un juego de placas paralelas cilíndricas a las que se les aplica un voltaje de 150 V por cada KeV de aceleración.

Después, el haz sigue su trayectoria pasando por varios colimadores situados a lo largo del acelerador.

2.4 CAJA DE FARADAY

La caja de Faraday se emplea para medir la corriente de partículas que se están haciendo incidir en el blanco. El esquema de la caja de Faraday se da en la figura 2.13 .

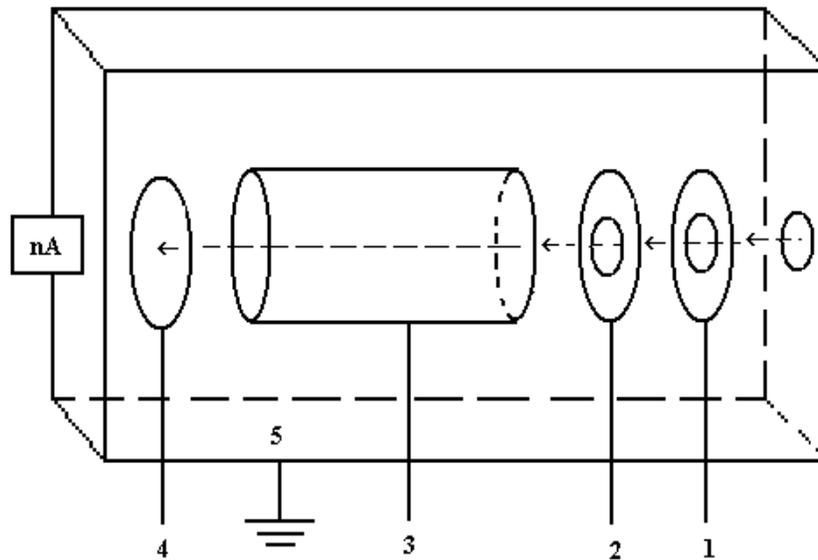


Figura 2.13 Esquema de la caja de Faraday.

Como se puede apreciar, consta de 4 electrodos los cuales tienen las siguientes funciones:

- El electrodo número 1, al que se aplica un voltaje positivo V_1 , se encarga de repeler a los iones positivos lentos provenientes del gas residual. Tiene un valor de $V_1 = 50 \text{ V}$.
- El electrodo número 2, que se encuentra a un potencial negativo V_2 , tiene como función evitar que salgan los electrones secundarios producidos dentro de la caja de Faraday. Se encuentra a un potencial negativo $V_2 = -90 \text{ V}$.
- El electrodo número 3, que es un electrodo cilíndrico al cual se le aplica un potencial negativo, tiene como fin regresar a la placa colectora los electrones que salen de la misma. Se le aplica un potencial negativo $V_3 = -300 \text{ V}$.

d) El electrodo número 4 es la placa colectora que se encuentra conectada a un electrómetro; con él se mide la corriente de partículas que están incidiendo en el blanco.

La caja protectora cubre los cuatro electrodos descritos de partículas cargadas existentes en el gas residual y está conectada a tierra.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

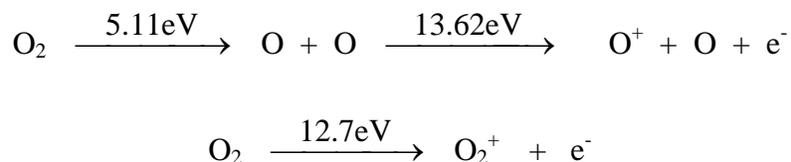
OBJETIVO: OPTIMIZACIÓN DE LAS LENTES EINZEL Y OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES

3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CAÑÓN DE IONES.

Los experimentos planteados en este trabajo de tesis son la optimización de las lentes Einzel y la optimización del haz de iones. Para la realización de los mismos, se necesita en primer lugar obtener una presión de vacío del orden de 10^{-7} Torr a lo largo de todo el acelerador. Los pasos a seguir para lograr esto son muy sencillos: 1) Se enciende el sistema de circulación del agua, la cual fluye a través de un serpentín alrededor de la fuente de iones, para evitar el sobrecalentamiento de la misma, 2) Se enciende la bomba mecánica y se abren todas las válvulas, enseguida se encienden las bombas turbomoleculares y se espera que lleguen a la máxima velocidad de funcionamiento, 3) Se enciende el medidor de la presión de vacío y a partir de la lectura de 2×10^{-6} Torr se comienza a degasificar el filamento, estableciendo corriente al mismo gradualmente desde cero hasta alcanzar los 16 A y 4) Se espera hasta que el medidor de la presión de vacío indique el valor de 10^{-7} Torr.

3.2 FORMACIÓN DEL HAZ DE IONES.

Una vez que se ha logrado la presión de vacío deseada dentro del sistema experimental, se continua con la formación de iones, los cuales se obtienen admitiendo oxígeno molecular O_2 dentro de la fuente de iones (para el caso particular de este trabajo). La fuente de iones que se utilizó funciona en la región de descarga en arco a bajas presiones, y los iones que se producen no son de una sola especie, estos pueden ser iones positivos como O^+ y O_2^+ o iones negativos como O^- . A continuación se presentan las reacciones para la formación de los iones O^+ y O_2^+ , indicando también los valores de la energía de ionización para la molécula neutra O_2 en ambos casos:



Para la optimización del sistema experimental se trabajó con el ion positivo O^+ . Las mediciones se realizaron para cinco valores distintos de la presión del gas O_2 dentro de la fuente de iones, a saber 65, 70, 75, 80 y $85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$; se eligieron estos valores de la presión ya que dentro de este intervalo, los valores medidos de la corriente iónica son reproducibles. En cada caso, se aplicó un potencial de 100 V en el ánodo. La corriente de descarga que se obtiene en el ánodo es de aproximadamente 0.1 A, en todos los casos estudiados.

3.3 OPTIMIZACIÓN DE LAS LENTES EINZEL

Después de producir el haz de iones, es necesario enfocarlo, ya que éste no se encuentra colimado. Se requiere, entonces, de la optimización de las lentes Einzel para determinar experimentalmente la relación entre el voltaje V_L aplicado al segundo electrodo de las lentes, y la energía E de aceleración de los iones que forman el haz.

Los valores que se necesitan del voltaje aplicado a las lentes, son aquellos para los cuales la corriente iónica I es máxima, y los denotaremos como $V_{L\text{max}}$. Por lo tanto, se registraron en tablas las mediciones correspondientes a la corriente iónica I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel, para distintos valores de la energía E de aceleración. Las energías E de aceleración para O^+ fueron de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 y $5.0 \pm 0.01 \text{ keV}$.

Una vez que se obtuvieron estos datos, de cada tabla se tomó el valor requerido del voltaje aplicado, formando así el conjunto de valores $V_{L\text{max}}$ que se utilizaron para encontrar las relaciones de optimización. También se realizaron las gráficas correspondientes a dichos datos experimentales, las cuales nos muestran la distribución de energía, y donde el máximo de cada curva nos indica el valor del voltaje para el cual el haz de iones está enfocado. Esto se hizo para cada una de las cinco presiones del gas O_2 dentro de la fuente de iones.

Por otra parte, tiene que mencionarse que la fuente de iones, las lentes Einzel y el filtro de velocidades se encuentran alineados en un eje que se encuentra desviado 10° con respecto al eje principal del acelerador, por esta razón es necesario corregir la dirección del haz de iones; para ello se cuenta con un juego de placas paralelas cilíndricas a las que se les aplica un voltaje de 150 V por cada keV de aceleración.

Se construyó entonces una tabla de referencia (Tabla I) para obtener los valores del potencial de las lentes Einzel y del potencial de las placas deflectoras para distintos valores de la energía de aceleración. Alrededor de estos valores iniciales del voltaje aplicado a las lentes Einzel, se registró en tablas el valor de la corriente iónica I obtenida como función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel. Los valores de la corriente se midieron en un electrómetro digital Keithley Modelo 480 conectado a una caja de Faraday, la cual estaba colocada a la salida de las placas paralelas cilíndricas. La magnitud de la corriente iónica I fue del orden de 10^{-9} A. Los valores de esta tabla fueron proporcionados por el Dr. Horacio Martínez, investigador del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM.

Energía ± 0.01 E (keV)	Voltaje de las lentes ± 1 V_L (V)	Voltaje de las placas ± 1 V_p (V)
1.0	700	150
1.5	1050	225
2.0	1400	300
2.5	1750	375
3.0	2100	450
3.5	2450	525
4.0	2800	600
4.5	3150	675
5.0	3500	750

Tabla I. Se muestran los valores de referencia para el voltaje V_L aplicado al segundo electrodo de las lentes Einzel, y para el voltaje V_p en las placas paralelas cilíndricas para la corrección del haz de iones.

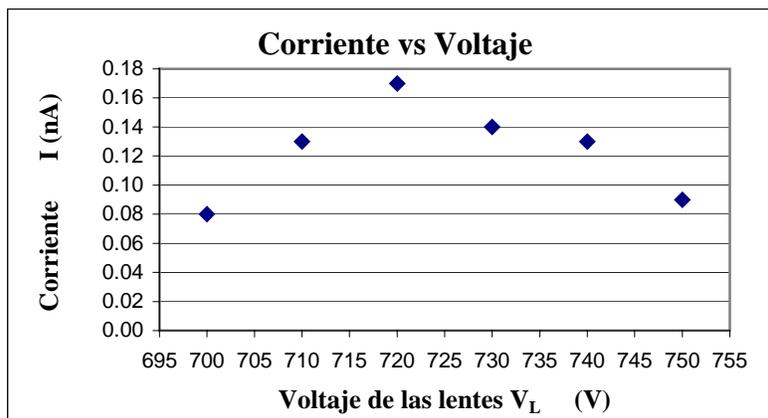
3.3.1 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

Se admitió gas O_2 dentro de la fuente de iones a una presión de $65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$, y se midieron los valores de la corriente iónica I en función del voltaje aplicado a las lentes Einzel V_L , para los siguientes valores de la energía de aceleración $E = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5$ y $5.0 \pm 0.01 \text{ keV}$. Se presentan las tablas con los datos experimentales así como las gráficas correspondientes.

$V_L \pm 1 \text{ (V)}$	$I \pm 0.005 \text{ (nA)}$
700	0.08
710	0.13
720	0.17
730	0.14
740	0.13
750	0.09

$E = 1.0 \pm 0.01 \text{ keV}$

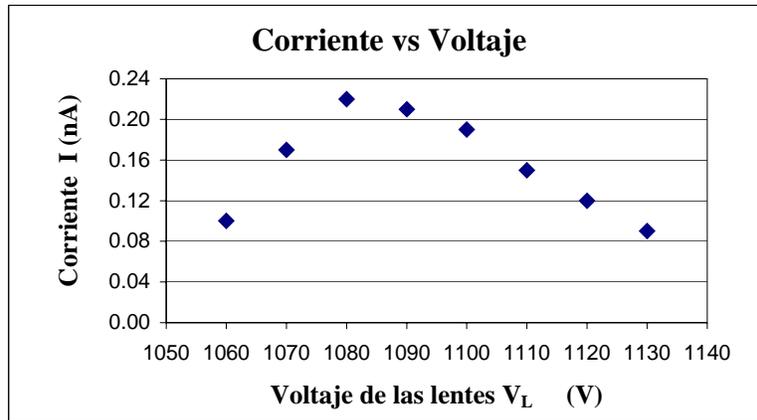
Tabla 3.1 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.1 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.0 \pm 0.01 \text{ keV}$.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1060	0.10
1070	0.17
1080	0.22
1090	0.21
1100	0.19
1110	0.15
1120	0.12
1130	0.09
$E = 1.5 \pm 0.01$ keV	

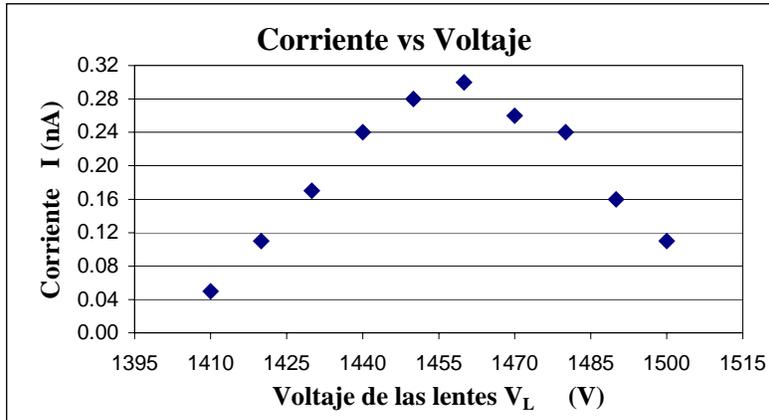
Tabla 3.2 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.2 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1410	0.05
1420	0.11
1430	0.17
1440	0.24
1450	0.28
1460	0.30
1470	0.26
1480	0.24
1490	0.16
1500	0.11
$E = 2.0 \pm 0.01$ keV	

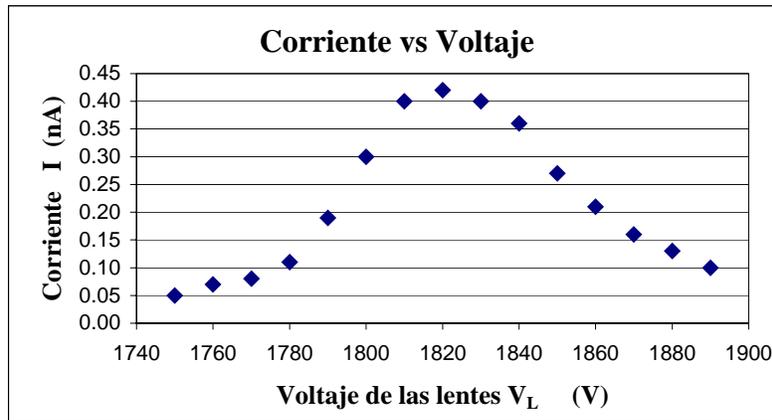
Tabla 3.3 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.3 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1750	0.05
1760	0.07
1770	0.08
1780	0.11
1790	0.19
1800	0.30
1810	0.40
1820	0.42
1830	0.40
1840	0.36
1850	0.27
1860	0.21
1870	0.16
1880	0.13
1890	0.10
$E = 2.5 \pm 0.01$ keV	

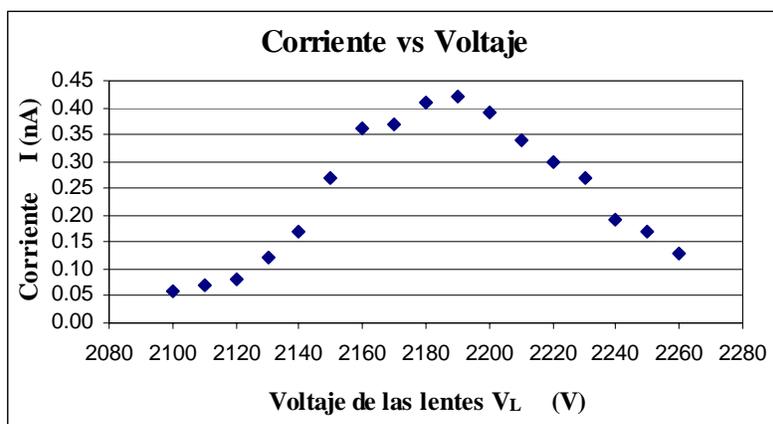
Tabla 3.4 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.4 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2100	0.06
2110	0.07
2120	0.08
2130	0.12
2140	0.17
2150	0.27
2160	0.36
2170	0.37
2180	0.41
2190	0.42
2200	0.39
2210	0.34
2220	0.30
2230	0.27
2240	0.19
2250	0.17
2260	0.13
2270	0.11
$E = 3.0 \pm 0.01$ keV	

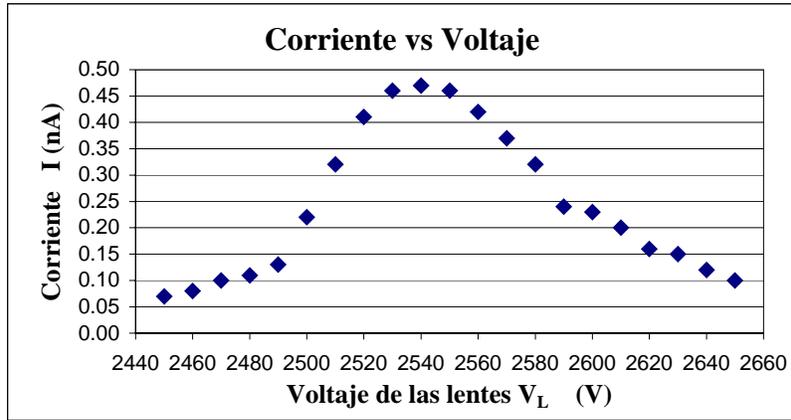
Tabla 3.5 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.5 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2450	0,07
2460	0,08
2470	0.10
2480	0.11
2490	0.13
2500	0.22
2510	0.32
2520	0.41
2530	0.46
2540	0.47
2550	0.46
2560	0.42
2570	0.37
2580	0.32
2590	0.24
2600	0.23
2610	0.20
2620	0.16
2630	0.15
2640	0.12
2650	0.10
$E = 3.5 \pm 0.01$ keV	

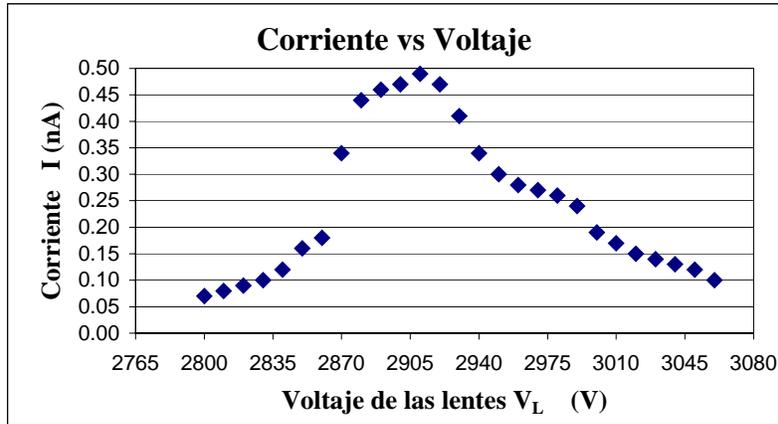
Tabla 3.6 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.6 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2800	0.07
2810	0.08
2820	0.09
2830	0.10
2840	0.12
2850	0.16
2860	0.18
2870	0.34
2880	0.44
2890	0.46
2900	0.47
2910	0.49
2920	0.47
2930	0.41
2940	0.34
2950	0.30
2960	0.28
2970	0.27
2980	0.26
2990	0.24
3000	0.19
3010	0.17
3020	0.15
3030	0.14
3040	0.13
3050	0.12
3060	0.10
$E = 4.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.7 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

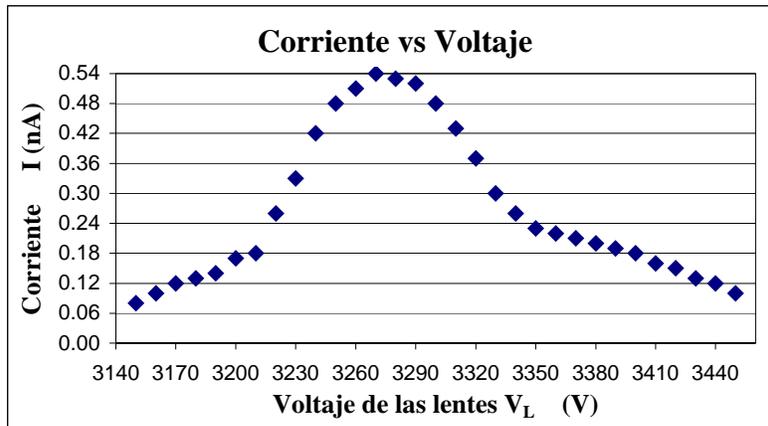


Gráfica 3.7 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3150	0.08
3200	0.17
3210	0.18
3220	0.26
3230	0.33
3240	0.42
3250	0.48
3260	0.51
3270	0.54
3280	0.53
3290	0.52
3300	0.48
3310	0.43
3320	0.37
3330	0.30
3340	0.26
3350	0.23
3360	0.22
3370	0.21
3380	0.20

3390	0.19
3400	0.18
3410	0.16
3420	0.15
3430	0.13
3440	0.12
3450	0.10
$E = 4.5 \pm 0.01$ keV	

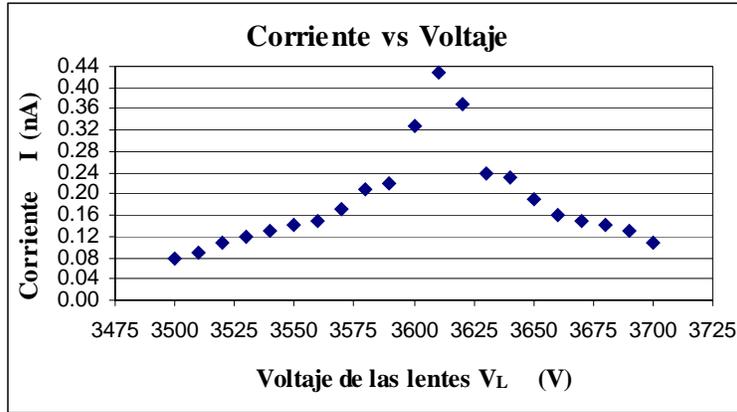
Tabla 3.8 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.8 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3500	0.08
3510	0.09
3520	0.11
3530	0.12
3540	0.13
3550	0.14
3560	0.15
3570	0.17
3580	0.21
3590	0.22
3600	0.33
3610	0.43
3620	0.37
3630	0.24
3640	0.23
3650	0.19
3660	0.16
3670	0.15
3680	0.14
3690	0.13
3700	0.11
$E = 5.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.9 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



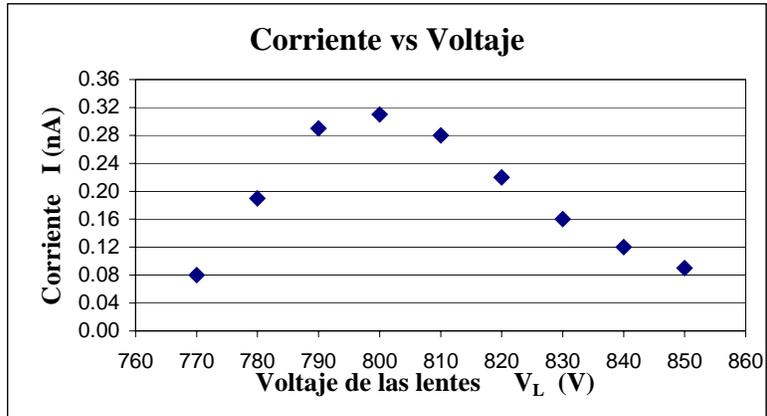
Gráfica 3.9 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV.

3.3.2 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 70 \pm 2.5$ μ Hg

Se admitió gas O_2 dentro de la fuente de iones a una presión de 70 ± 2.5 μ Hg, y se midieron los valores de la corriente iónica I en función del voltaje aplicado a las lentes Einzel V_L , para los siguientes valores de la energía de aceleración $E = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5$ y 5.0 ± 0.01 keV. Se presentan las tablas con los datos experimentales así como las gráficas correspondientes.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
770	0.08
780	0.19
790	0.29
800	0.31
810	0.28
820	0.22
830	0.16
840	0.12
850	0.09
$E = 1.0 \pm 0.01$ keV	

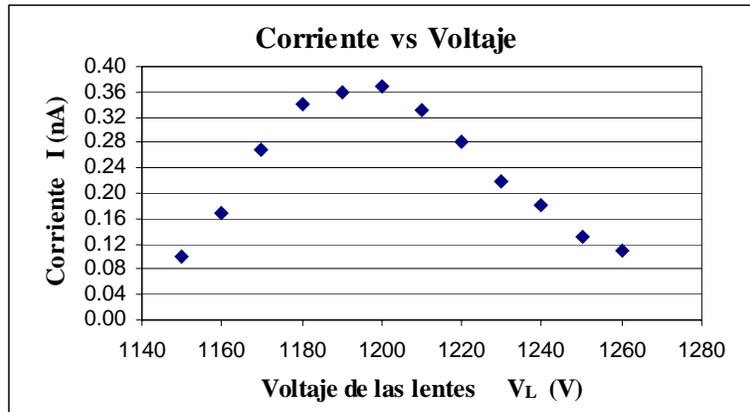
Tabla 3.10 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.10 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1150	0.10
1160	0.17
1170	0.27
1180	0.34
1190	0.36
1200	0.37
1210	0.33
1220	0.28
1230	0.22
1240	0.18
1250	0.13
1260	0.11
$E = 1.5 \pm 0.01$ keV	

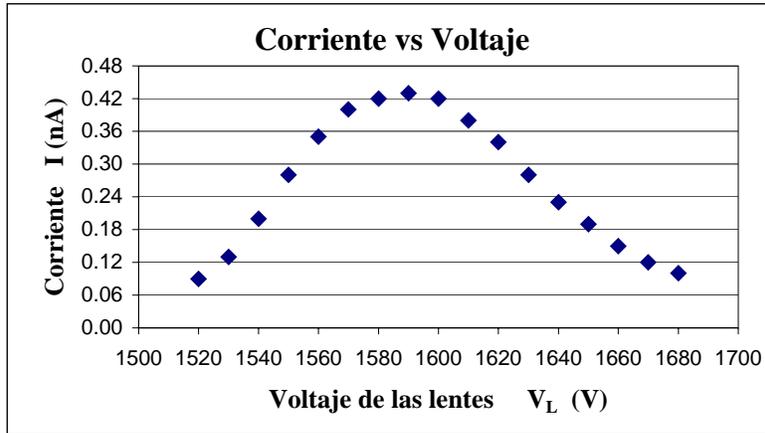
Tabla 3.11 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.11 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1520	0.09
1530	0.13
1540	0.20
1550	0.28
1560	0.35
1570	0.40
1580	0.42
1590	0.43
1600	0.42
1610	0.38
1620	0.34
1630	0.28
1640	0.23
1650	0.19
1660	0.15
1670	0.12
1680	0.10
$E = 2.0 \pm 0.01$ keV	

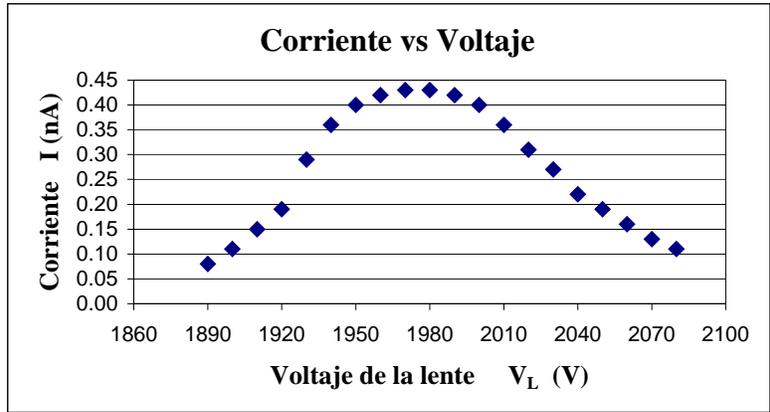
Tabla 3.12 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.12 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1890	0.08
1900	0.11
1910	0.15
1920	0.19
1930	0.29
1940	0.36
1950	0.40
1960	0.42
1970	0.43
1980	0.43
1990	0.42
2000	0.40
2010	0.36
2020	0.31
2030	0.27
2040	0.22
2050	0.19
2060	0.16
2070	0.13
2080	0.11
$E = 2.5 \pm 0.01$ keV	

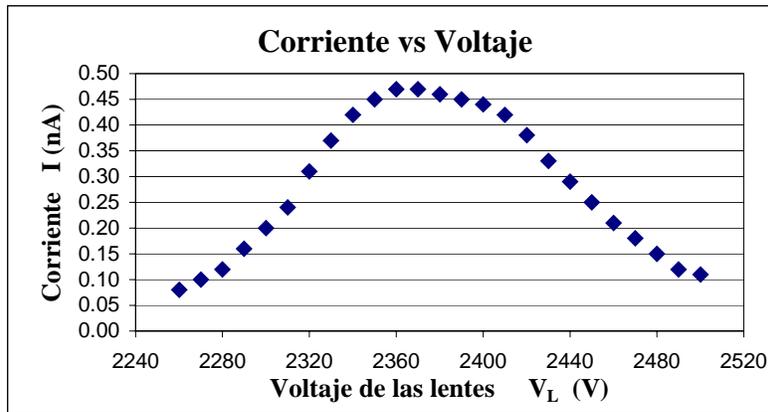
Tabla 3.13 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.13 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2260	0.08
2270	0.10
2280	0.12
2290	0.16
2300	0.20
2310	0.24
2320	0.31
2330	0.37
2340	0.42
2350	0.45
2360	0.47
2370	0.47
2380	0.46
2390	0.45
2400	0.44
2410	0.42
2420	0.38
2430	0.33
2440	0.29
2450	0.25
2460	0.21
2470	0.18
2480	0.15
2490	0.12
2500	0.11
$E = 3.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.14 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

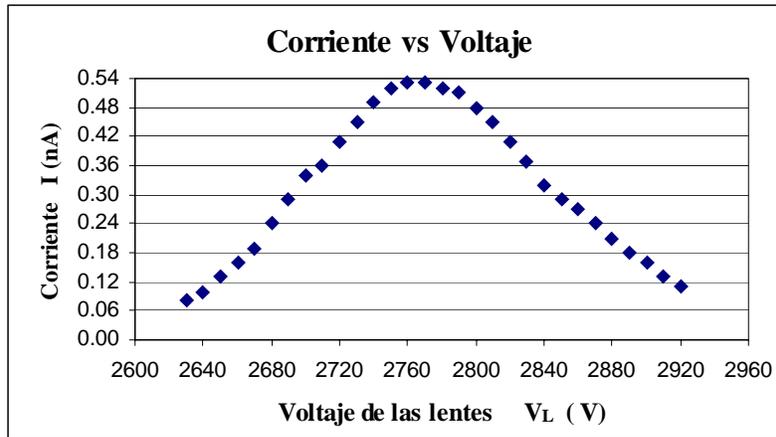


Gráfica 3.14 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2630	0.08
2640	0.10
2650	0.13
2660	0.16
2670	0.19
2680	0.24
2690	0.29
2700	0.34
2710	0.36
2720	0.41
2730	0.45
2740	0.49
2750	0.52
2760	0.53
2770	0.53
2780	0.52
2790	0.51
2800	0.48
2810	0.45
2820	0.41
2830	0.37
2840	0.32
2850	0.29
2860	0.27
2870	0.24
2880	0.21

2890	0.18
2900	0.16
2910	0.13
2920	0.11
$E = 3.5 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.15 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

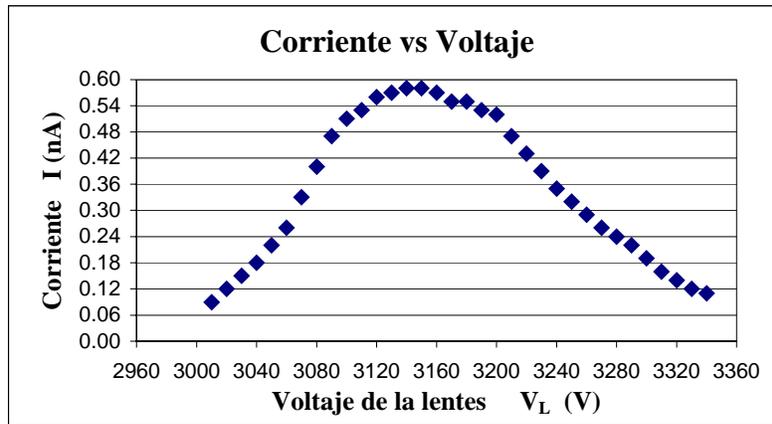


Gráfica 3.15 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3010	0.09
3020	0.12
3030	0.15
3040	0.18
3050	0.22
3060	0.26
3070	0.33
3080	0.40
3090	0.47
3100	0.51
3110	0.53
3120	0.56
3130	0.57
3140	0.58
3150	0.58
3160	0.57
3170	0.55
3180	0.55
3190	0.53
3200	0.52
3210	0.47
3220	0.43
3230	0.39
3240	0.35
3250	0.32
3260	0.29
3270	0.26
3280	0.24

3290	0.22
3300	0.19
3310	0.16
3320	0.14
3330	0.12
3340	0.11
$E = 4.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.16 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

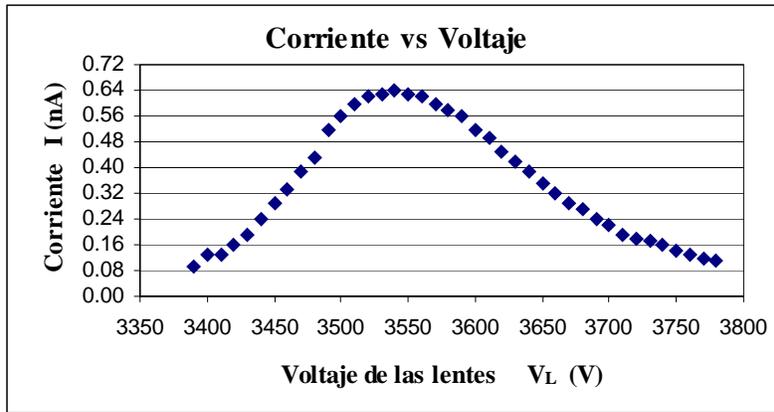


Gráfica 3.16 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3390	0.09
3400	0.13
3410	0.13
3420	0.16
3430	0.19
3440	0.24
3450	0.29
3460	0.33
3470	0.39
3480	0.43
3490	0.52
3500	0.56
3510	0.60
3520	0.62
3530	0.63
3540	0.64
3550	0.63
3560	0.62
3570	0.60
3580	0.58
3590	0.56
3600	0.52
3610	0.49
3620	0.45
3630	0.42
3640	0.39
3650	0.35

3660	0.32
3670	0.29
3680	0.27
3690	0.24
3700	0.22
3710	0.19
3720	0.18
3730	0.17
3740	0.16
3750	0.14
3760	0.13
3770	0.12
3780	0.11
$E = 4.5 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.17 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

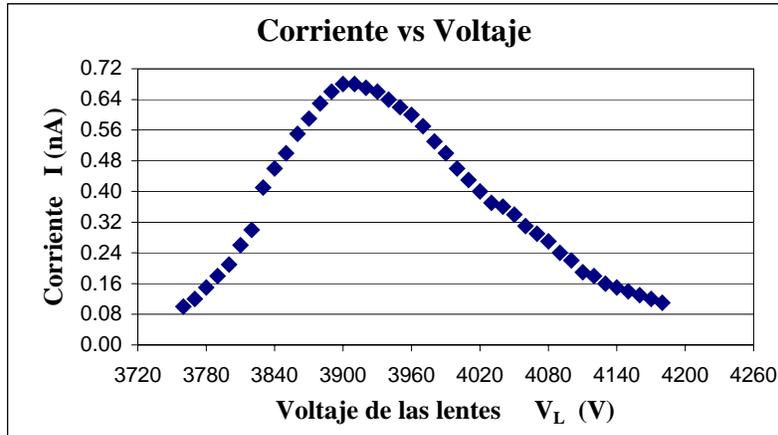


Gráfica 3.17 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3760	0.10
3770	0.12
3780	0.15
3790	0.18
3800	0.21
3810	0.26
3820	0.30
3830	0.41
3840	0.46
3850	0.50
3860	0.55
3870	0.59
3880	0.63
3890	0.66
3900	0.68
3910	0.68
3920	0.67
3930	0.66
3940	0.64
3950	0.62
3960	0.60
3970	0.57
3980	0.53
3990	0.50
4000	0.46

4010	0.43
4020	0.40
4030	0.37
4040	0.36
4050	0.34
4060	0.31
4070	0.29
4080	0.27
4090	0.24
4100	0.22
4110	0.19
4120	0.18
4130	0.16
4140	0.15
4150	0.14
4160	0.13
4170	0.12
4180	0.11
$E = 5.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.18 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



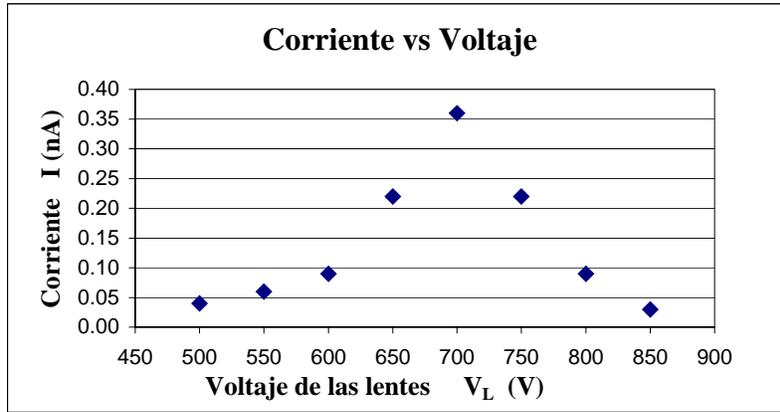
Gráfica 3.18 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV.

3.3.3 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 75 \pm 2.5$ μ Hg

Se admitió gas O_2 dentro de la fuente de iones a una presión de 75 ± 2.5 μ Hg, y se midieron los valores de la corriente iónica I en función del voltaje aplicado a las lentes Einzel V_L , para los siguientes valores de la energía de aceleración $E = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5$ y 5.0 ± 0.01 keV. Se presentan las tablas con los datos experimentales así como las gráficas correspondientes.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
500	0.04
550	0.06
600	0.09
650	0.22
700	0.36
750	0.22
800	0.09
850	0.03
$E = 1.0 \pm 0.01$ keV	

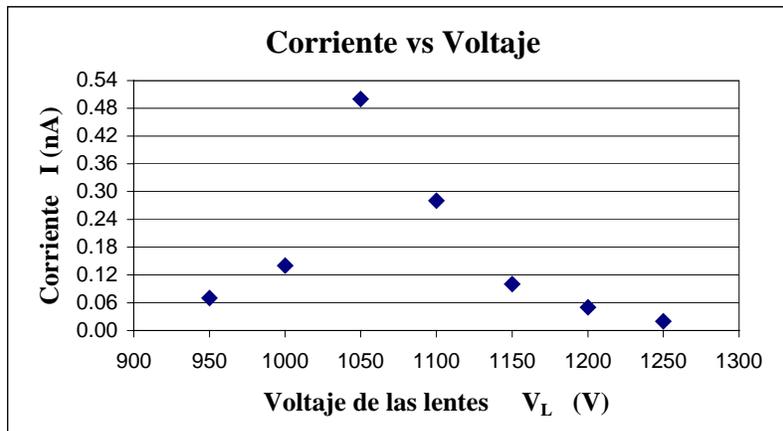
Tabla 3.19 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.19 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
950	0.07
1000	0.14
1050	0.50
1100	0.28
1150	0.10
1200	0.05
1250	0.02
$E = 1.5 \pm 0.01$ keV	

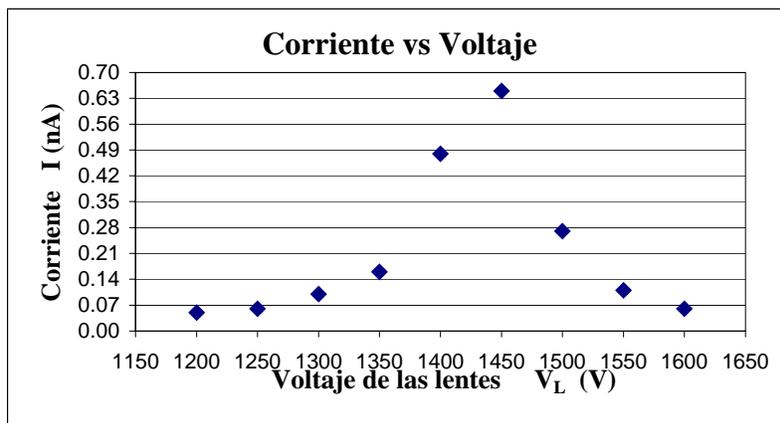
Tabla 3.20 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.20 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1200	0.05
1250	0.06
1300	0.10
1350	0.16
1400	0.48
1450	0.65
1500	0.27
1550	0.11
1600	0.06
$E = 2.0 \pm 0.01$ keV	

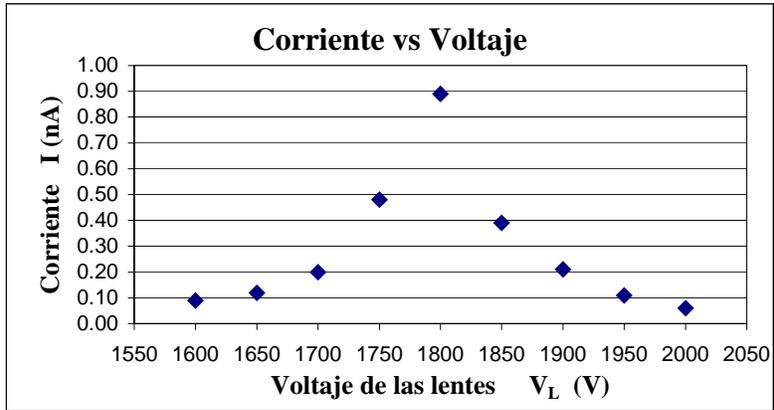
Tabla 3.21 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.21 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1600	0.09
1650	0.12
1700	0.20
1750	0.48
1800	0.89
1850	0.39
1900	0.21
1950	0.11
2000	0.06
$E = 2.5 \pm 0.01$ keV	

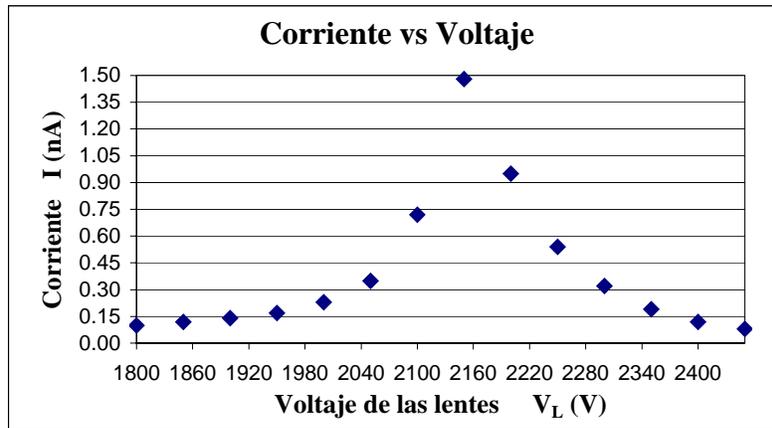
Tabla 3.22 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.22 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1800	0.10
1850	0.12
1900	0.14
1950	0.17
2000	0.23
2050	0.35
2100	0.72
2150	1.48
2200	0.95
2250	0.54
2300	0.32
2350	0.19
2400	0.12
2450	0.08
$E = 3.0 \pm 0.01$ keV	

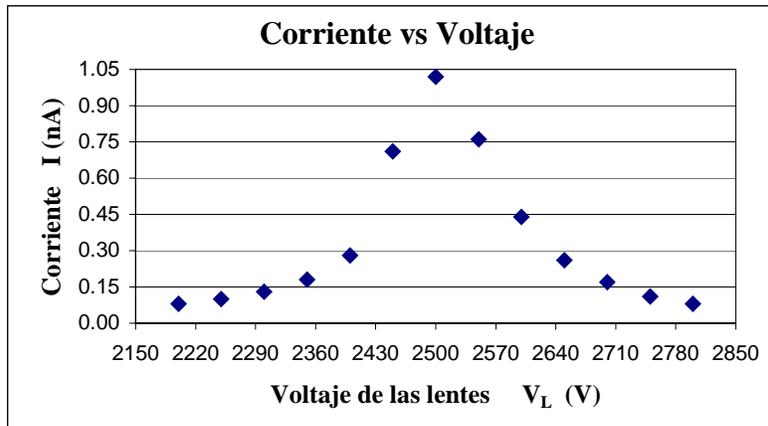
Tabla 3.23 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.23 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2200	0.08
2250	0.10
2300	0.13
2350	0.18
2400	0.28
2450	0.71
2500	1.02
2550	0.76
2600	0.44
2650	0.26
2700	0.17
2750	0.11
2800	0.08
$E = 3.5 \pm 0.01$ keV	

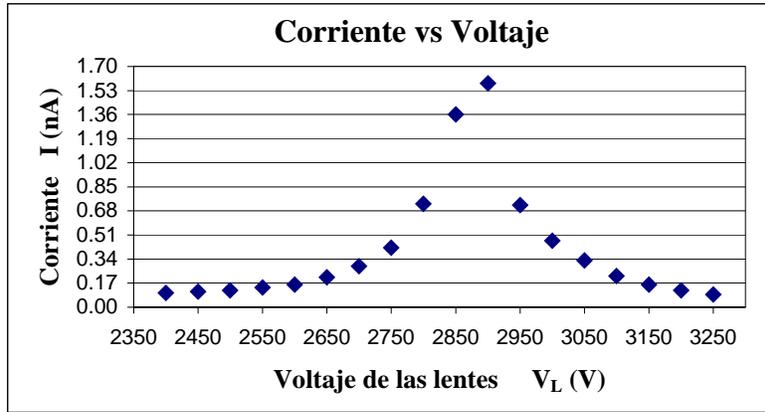
Tabla 3.24 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.24 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2400	0.10
2450	0.11
2500	0.12
2550	0.14
2600	0.16
2650	0.21
2700	0.29
2750	0.42
2800	0.73
2850	1.36
2900	1.58
2950	0.72
3000	0.47
3050	0.33
3100	0.22
3150	0.16
3200	0.12
3250	0.09
$E = 4.0 \pm 0.01$ keV	

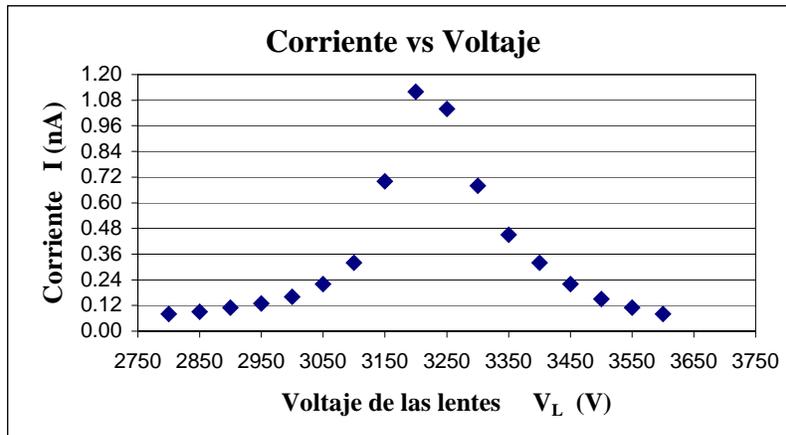
Tabla 3.25 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.25 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2800	0.08
2850	0.09
2900	0.11
2950	0.13
3000	0.16
3050	0.22
3100	0.32
3150	0.70
3200	1.12
3250	1.04
3300	0.68
3350	0.45
3400	0.32
3450	0.22
3500	0.15
3550	0.11
3600	0.08
$E = 4.5 \pm 0.01$ keV	

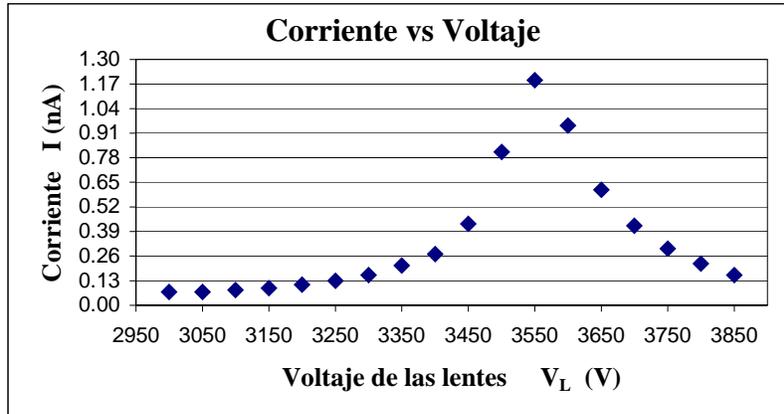
Tabla 3.26 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.26 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3000	0.07
3050	0.07
3100	0.08
3150	0.09
3200	0.11
3250	0.13
3300	0.16
3350	0.21
3400	0.27
3450	0.43
3500	0.81
3550	1.19
3600	0.95
3650	0.61
3700	0.42
3750	0.30
3800	0.22
3850	0.16
$E = 5.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.27 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



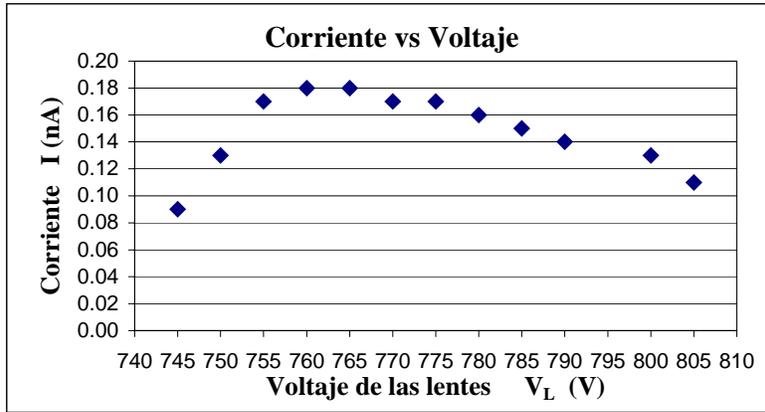
Gráfica 3.27 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV.

3.3.4 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 80 \pm 2.5$ μHg

Se admitió gas O_2 dentro de la fuente de iones a una presión de 80 ± 2.5 μHg , y se midieron los valores de la corriente iónica I en función del voltaje aplicado a las lentes Einzel V_L , para los siguientes valores de la energía de aceleración $E = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5$ y 5.0 ± 0.01 keV. Se presentan las tablas con los datos experimentales así como las gráficas correspondientes.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
745	0.09
750	0.13
755	0.17
760	0.18
765	0.18
770	0.17
775	0.17
780	0.16
785	0.15
790	0.14
800	0.13
805	0.11
$E = 1.0 \pm 0.01$ keV	

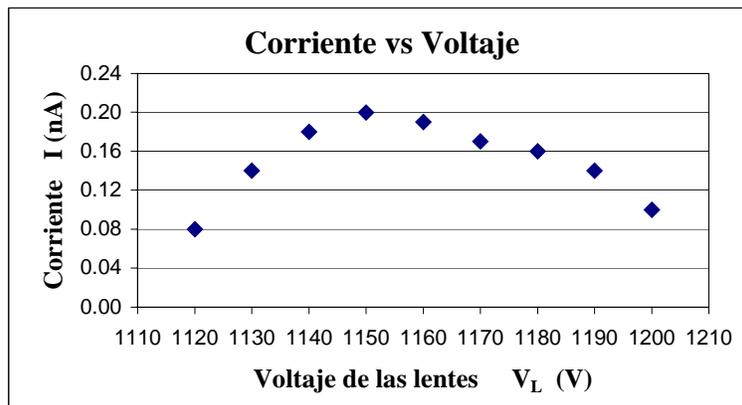
Tabla 3.28 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.28 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1120	0.08
1130	0.14
1140	0.18
1150	0.20
1160	0.19
1170	0.17
1180	0.16
1190	0.14
1200	0.10
$E = 1.5 \pm 0.01$ keV	

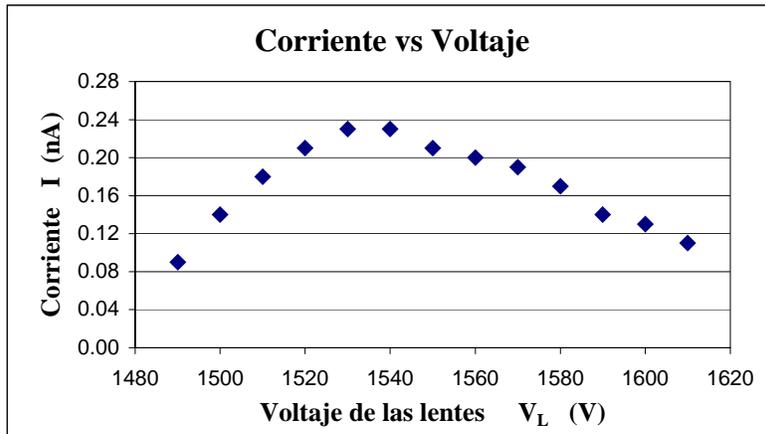
Tabla 3.29 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.29 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1490	0.09
1500	0.14
1510	0.18
1520	0.21
1530	0.23
1540	0.23
1550	0.21
1560	0.20
1570	0.19
1580	0.17
1590	0.14
1600	0.13
1610	0.11
$E = 2.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.30 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

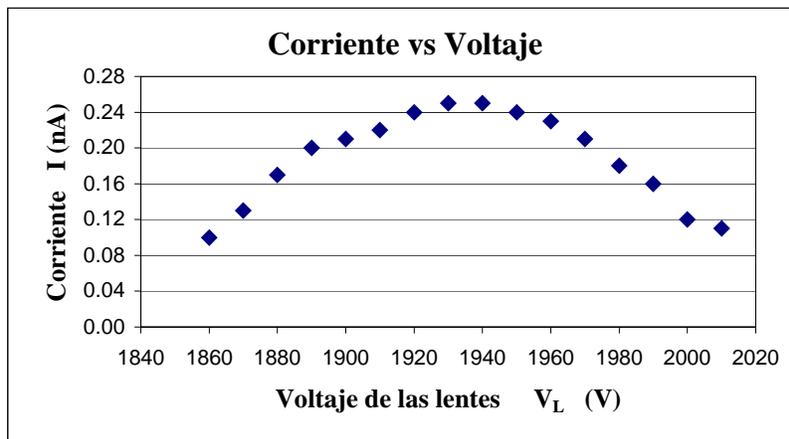


Gráfica 3.30 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1860	0.10
1870	0.13
1880	0.17
1890	0.20
1900	0.21
1910	0.22
1920	0.24
1930	0.25
1940	0.25
1950	0.24
1960	0.23
1970	0.21
1980	0.18
1990	0.16
2000	0.12
2010	0.11

$E = 2.5 \pm 0.01$ keV

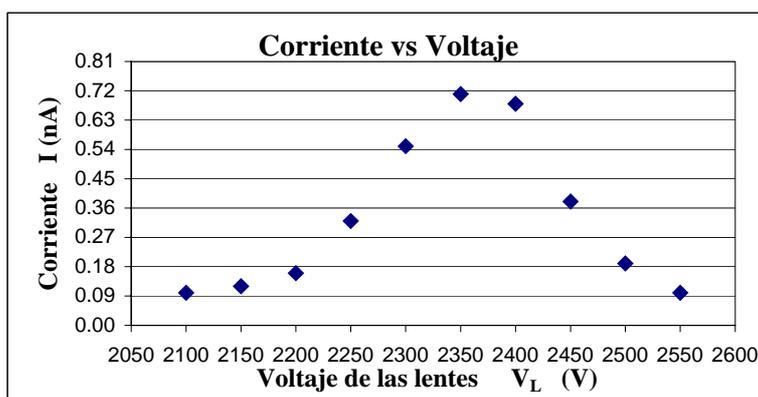
Tabla 3.31 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.31 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2100	0.10
2150	0.12
2200	0.16
2250	0.32
2300	0.55
2350	0.71
2400	0.68
2450	0.38
2500	0.19
2550	0.10
$E = 3.0 \pm 0.01$ keV	

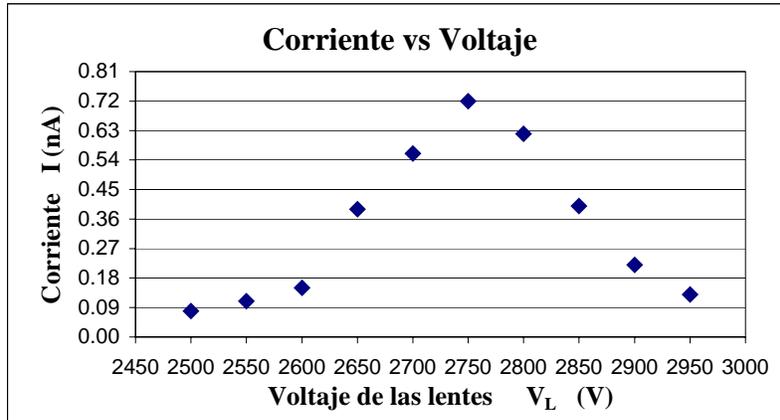
Tabla 3.32 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.32 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2500	0.08
2550	0.11
2600	0.15
2650	0.39
2700	0.56
2750	0.72
2800	0.62
2850	0.40
2900	0.22
2950	0.13
$E = 3.5 \pm 0.01$ keV	

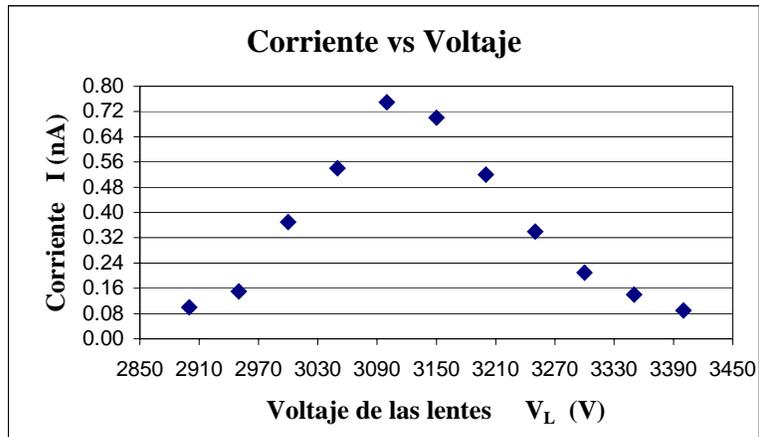
Tabla 3.33 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.33 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2900	0.10
2950	0.15
3000	0.37
3050	0.54
3100	0.75
3150	0.70
3200	0.52
3250	0.34
3300	0.21
3350	0.14
3400	0.09
$E = 4.0 \pm 0.01$ keV	

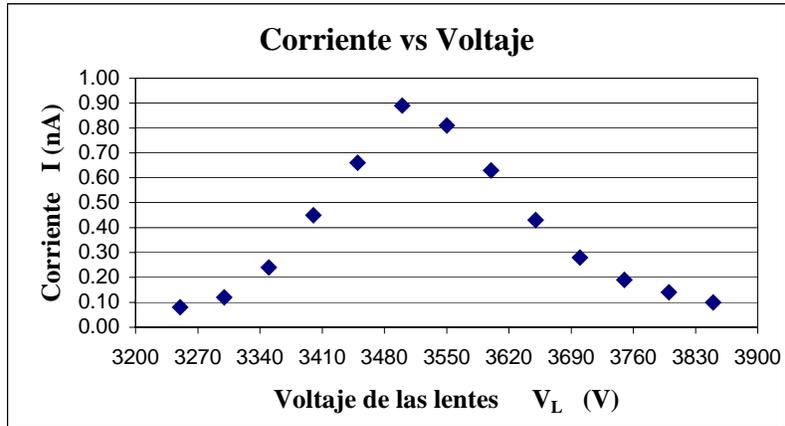
Tabla 3.34 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.34 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3250	0.08
3300	0.12
3350	0.24
3400	0.45
3450	0.66
3500	0.89
3550	0.81
3600	0.63
3650	0.43
3700	0.28
3750	0.19
3800	0.14
3850	0.10
$E = 4.5 \pm 0.01$ keV	

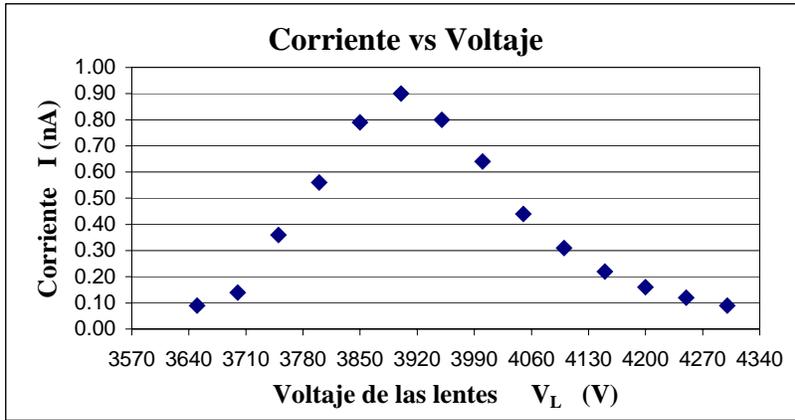
Tabla 3.35 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.35 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3650	0.09
3700	0.14
3750	0.36
3800	0.56
3850	0.79
3900	0.90
3950	0.80
4000	0.64
4050	0.44
4100	0.31
4150	0.22
4200	0.16
4250	0.12
4300	0.09
$E = 5.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.36 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



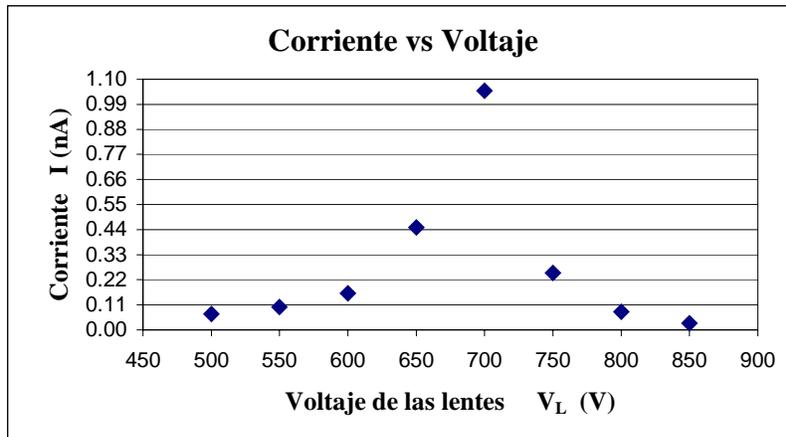
Gráfica 3.36 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV.

3.3.5 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

Se admitió gas O_2 dentro de la fuente de iones a una presión de $85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$, y se midieron los valores de la corriente iónica I en función del voltaje aplicado a las lentes Einzel V_L , para los siguientes valores de la energía de aceleración $E = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5$ y 5.0 ± 0.01 keV. Se presentan las tablas con los datos experimentales así como las gráficas correspondientes.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
500	0.07
550	0.10
600	0.16
650	0.45
700	1.05
750	0.25
800	0.08
850	0.03
$E = 1.0 \pm 0.01$ keV	

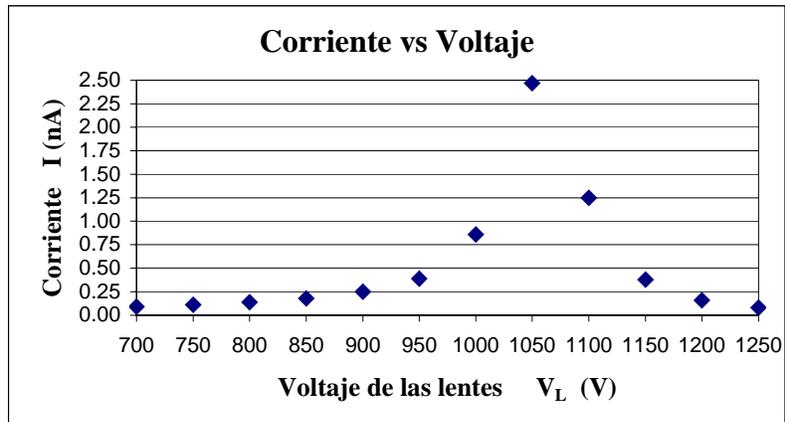
Tabla 3.37 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.37 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
700	0.09
750	0.11
800	0.14
850	0.18
900	0.25
950	0.39
1000	0.86
1050	2.47
1100	1.25
1150	0.38
1200	0.16
1250	0.08
$E = 1.5 \pm 0.01$ keV	

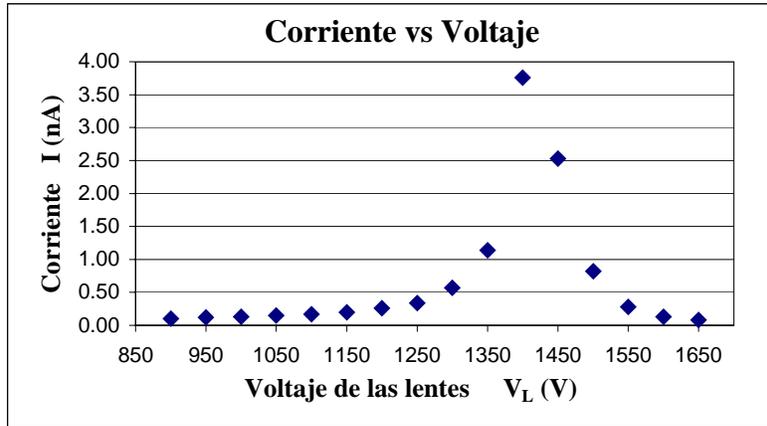
Tabla 3.38 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.38 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
900	0.10
950	0.12
1000	0.13
1050	0.15
1100	0.17
1150	0.20
1200	0.26
1250	0.34
1300	0.57
1350	1.14
1400	3.76
1450	2.53
1500	0.82
1550	0.28
1600	0.13
1650	0.08
$E = 2.0 \pm 0.01$ keV	

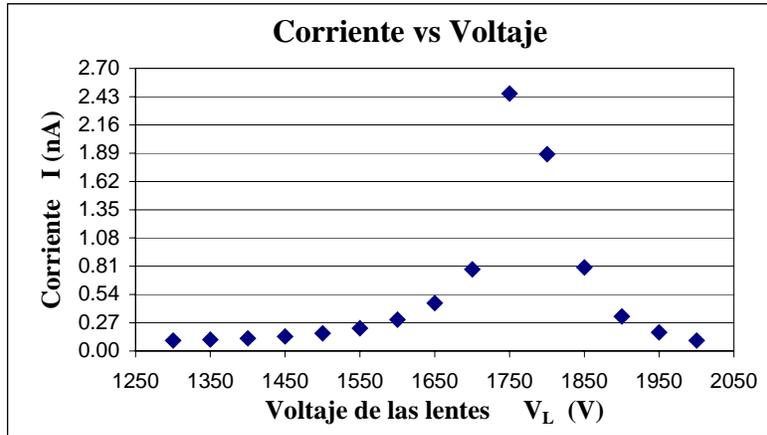
Tabla 3.39 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.39 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1300	0.10
1350	0.11
1400	0.12
1450	0.14
1500	0.17
1550	0.22
1600	0.30
1650	0.46
1700	0.78
1750	2.46
1800	1.88
1850	0.80
1900	0.33
1950	0.18
2000	0.10
$E = 2.5 \pm 0.01$ keV	

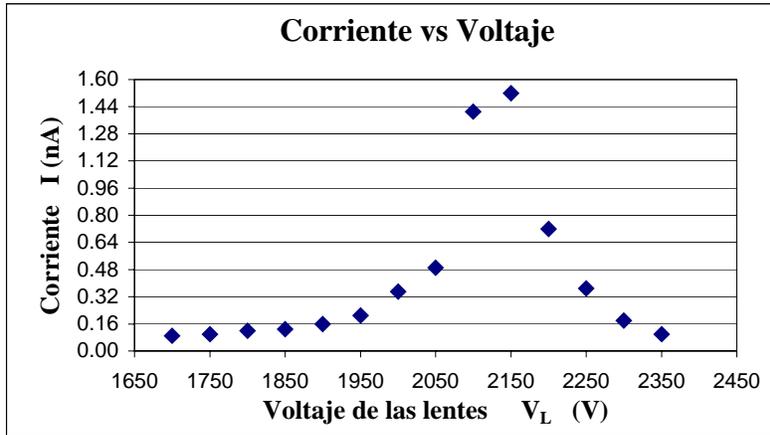
Tabla 3.40 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.40 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
1700	0,09
1750	0,1
1800	0,12
1850	0,13
1900	0,16
1950	0,21
2000	0,35
2050	0,49
2100	1,41
2150	1,52
2200	0,72
2250	0,37
2300	0,18
2350	0,1
$E = 3.0 \pm 0.01$ keV	

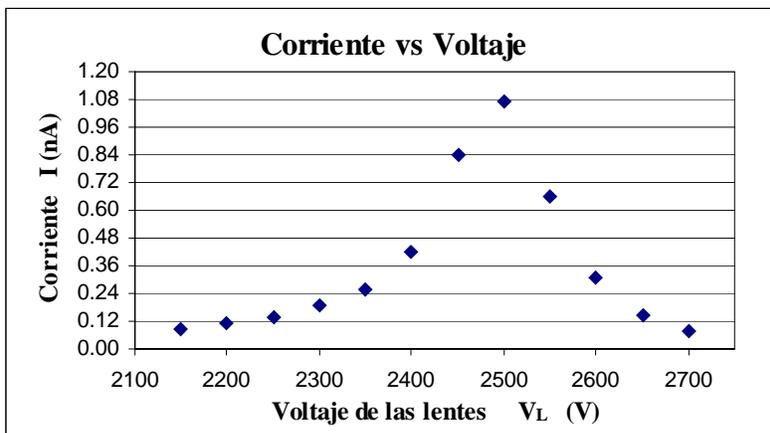
Tabla 3.41 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.41 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2150	0.09
2200	0.11
2250	0.14
2300	0.19
2350	0.26
2400	0.42
2450	0.84
2500	1.07
2550	0.66
2600	0.31
2650	0.15
2700	0.08
$E = 3.5 \pm 0.01$ keV	

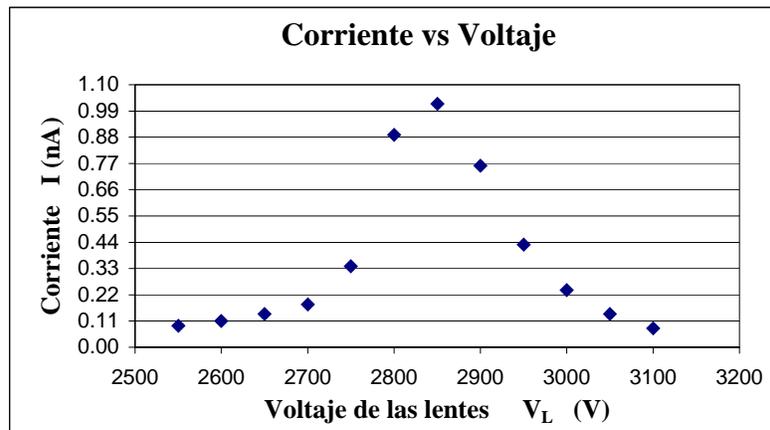
Tabla 3.42 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.42 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2550	0.09
2600	0.11
2650	0.14
2700	0.18
2750	0.34
2800	0.89
2850	1.02
2900	0.76
2950	0.43
3000	0.24
3050	0.14
3100	0.08
$E = 4.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.43 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).

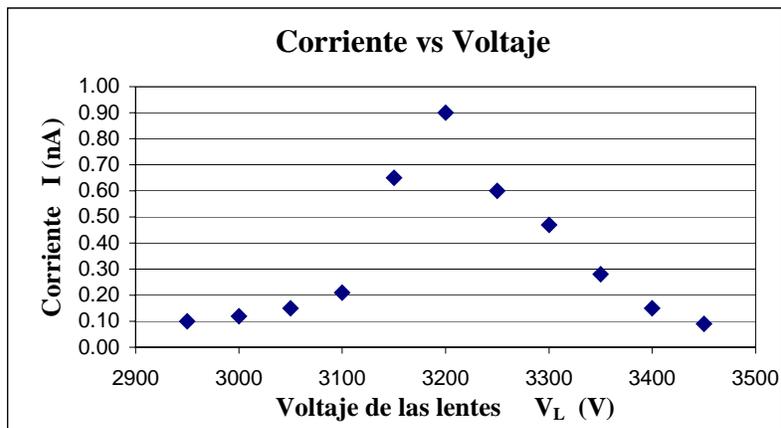


Gráfica 3.43 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
2950	0.10
3000	0.12
3050	0.15
3100	0.21
3150	0.65
3200	0.90
3250	0.60
3300	0.47
3350	0.28
3400	0.15
3450	0.09

$E = 4.5 \pm 0.01$ keV

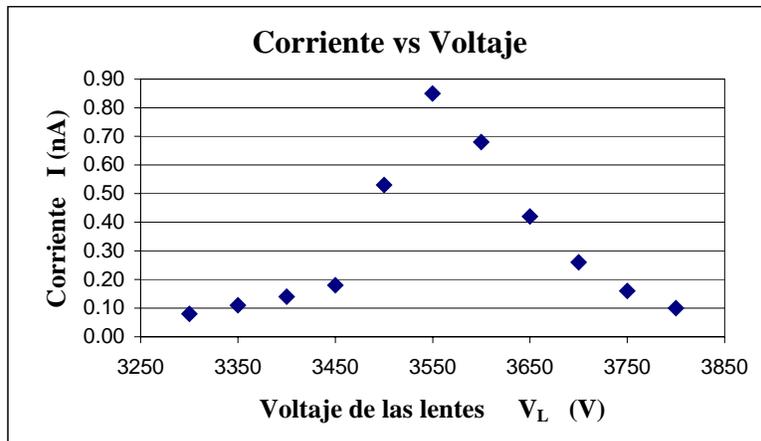
Tabla 3.44 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.44 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV.

$V_L \pm 1$ (V)	$I \pm 0.005$ (nA)
3300	0.08
3350	0.11
3400	0.14
3450	0.18
3500	0.53
3550	0.85
3600	0.68
3650	0.42
3700	0.26
3750	0.16
3800	0.10
$E = 5.0 \pm 0.01$ keV	

Tabla 3.45 Corriente iónica (I) en función del voltaje de las lentes Einzel (V_L).



Gráfica 3.45 Corriente de iones I en función del voltaje V_L aplicado a las lentes Einzel para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV.

3.4 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES

La optimización del haz de iones consiste en determinar experimentalmente, todos los parámetros para los cuales la corriente iónica I es máxima u óptima, la cual se denotará como I_{opt} . Estos parámetros son la energía E de aceleración de los iones, el voltaje V_{exp} que se aplica a las lentes Einzel (una vez que éstas se han optimizado) y la corriente del imán I_m en el filtro de velocidades.

Para la optimización del haz de iones, se utilizaron las relaciones de optimización de las lentes Einzel (capítulo 4), para calcular los valores del voltaje V_{Lmax} para los cuales la corriente iónica I es máxima, para cada valor de la energía E y para todas las presiones del gas. Fue a partir de estos valores obtenidos experimentalmente, y que se utilizaron como valores de referencia, que se ajustaron en la electrónica del sistema experimental, los valores del voltaje aplicado a las lentes, los cuales se representan ahora por V_{exp2} . Después de fijar el valor de la energía E y del voltaje V_{exp2} , se midieron los valores de la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , en un intervalo de 0 a 2.2 A. La corriente iónica óptima I_{opt} es aquella que tiene un valor máximo para un valor dado de la energía E , del voltaje V_{exp} aplicado a las lentes Einzel, y de la corriente del imán I_m .

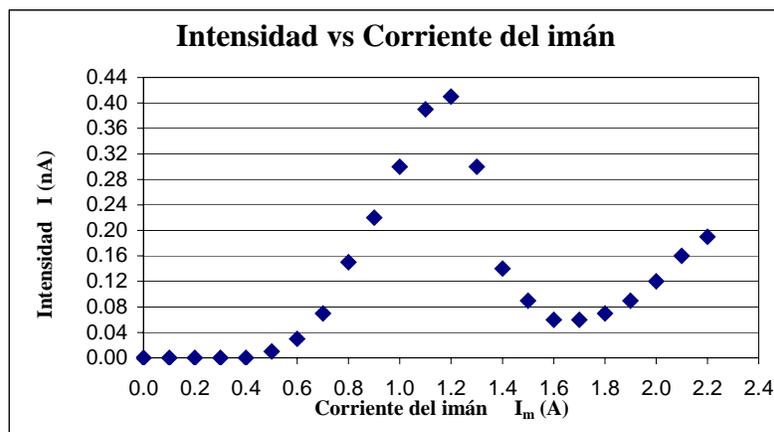
Todos estos datos se registraron en cinco tablas (una para cada presión de trabajo), y también se realizaron las gráficas correspondientes.

3.4.1 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

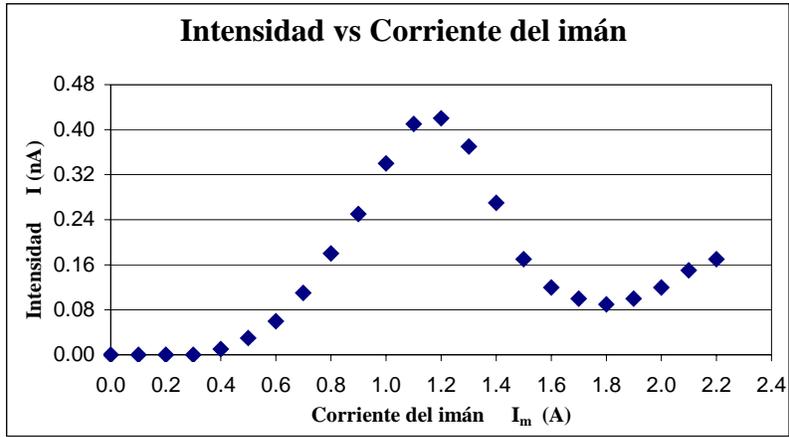
Se presenta la tabla de datos en la que se registraron los valores medidos de la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , para cada uno de los valores de la energía E de aceleración, así como los correspondientes valores del voltaje V_{exp2} aplicado a las lentes para el enfoque del haz, a una presión de $65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

$I_m \pm 0.05$ (A)	$I \pm 0.005$ (nA)								
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
0.2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
0.3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05
0.4	0.00	0.01	0.02	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.08
0.5	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.12
0.6	0.03	0.06	0.08	0.11	0.13	0.12	0.17	0.17	0.18
0.7	0.07	0.11	0.13	0.17	0.18	0.17	0.22	0.24	0.24
0.8	0.15	0.18	0.20	0.24	0.25	0.22	0.31	0.31	0.35
0.9	0.22	0.25	0.27	0.32	0.33	0.34	0.40	0.39	0.43
1.0	0.30	0.34	0.37	0.42	0.41	0.41	0.49	0.48	0.53
1.1	0.39	0.41	0.43	0.50	0.53	0.49	0.59	0.55	0.65
1.2	0.41	0.42	0.45	0.51	0.57	0.57	0.65	0.63	0.75
1.3	0.30	0.37	0.40	0.48	0.54	0.60	0.64	0.67	0.80
1.4	0.14	0.27	0.33	0.40	0.47	0.57	0.58	0.63	0.79
1.5	0.09	0.17	0.21	0.29	0.43	0.50	0.51	0.57	0.75
1.6	0.06	0.12	0.16	0.20	0.33	0.43	0.39	0.49	0.66
1.7	0.06	0.10	0.13	0.17	0.25	0.32	0.31	0.38	0.56
1.8	0.07	0.09	0.12	0.15	0.21	0.26	0.26	0.32	0.46
1.9	0.09	0.10	0.12	0.15	0.19	0.22	0.23	0.28	0.39
2.0	0.12	0.12	0.14	0.16	0.19	0.21	0.21	0.25	0.34
2.1	0.16	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.24	0.31
2.2	0.19	0.17	0.17	0.19	0.20	0.20	0.22	0.24	0.29
$V_{exp2} \pm 1$ (V)	735	1100	1500	1850	2160	2540	2900	3250	3620
$E \pm 0.01$ (keV)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

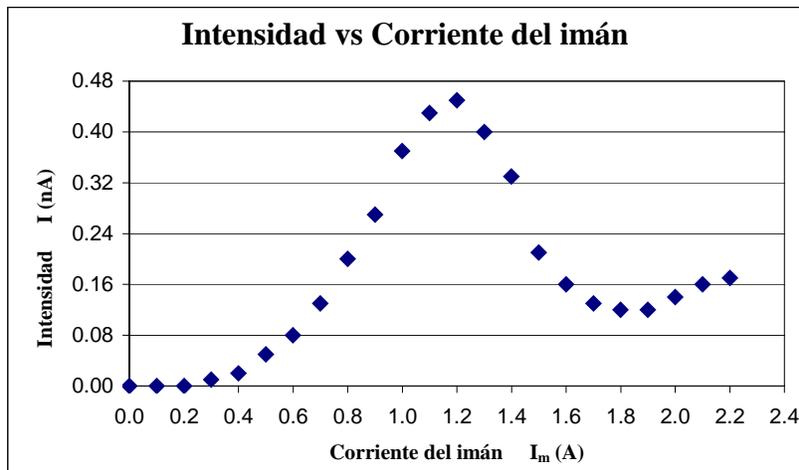
Tabla 3.46 Corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y los correspondiente valores del voltaje V_{exp2} para el enfoque del haz, a una presión de $65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.



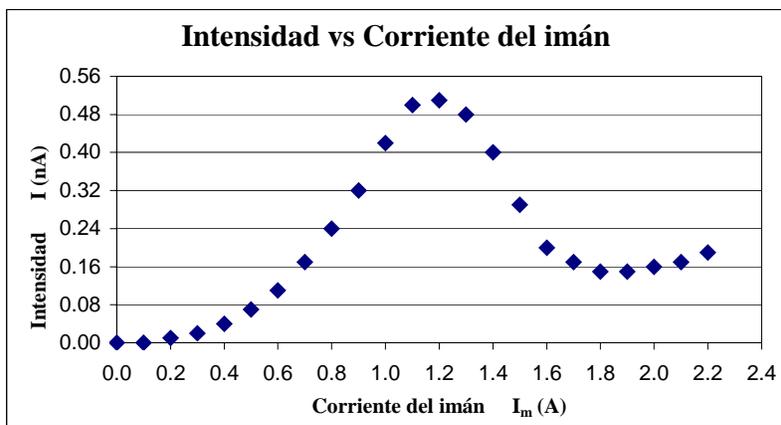
Gráfica 3.46 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV y $V_{exp2} = 740 \pm 1$ V.



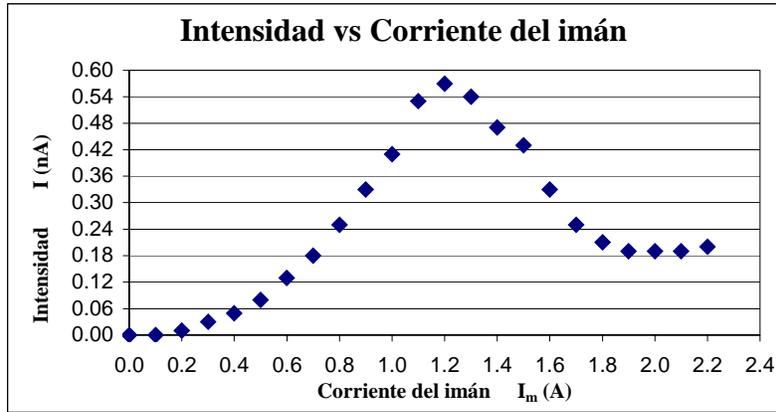
Gráfica 3.47 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1100 \pm 1$ V.



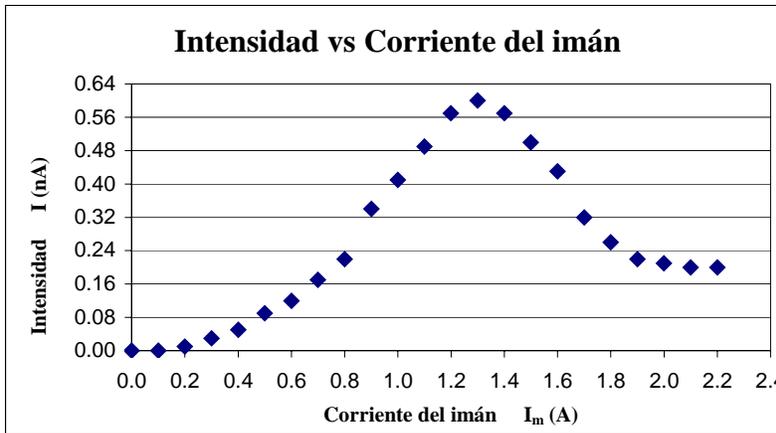
Gráfica 3.48 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1500 \pm 1$ V.



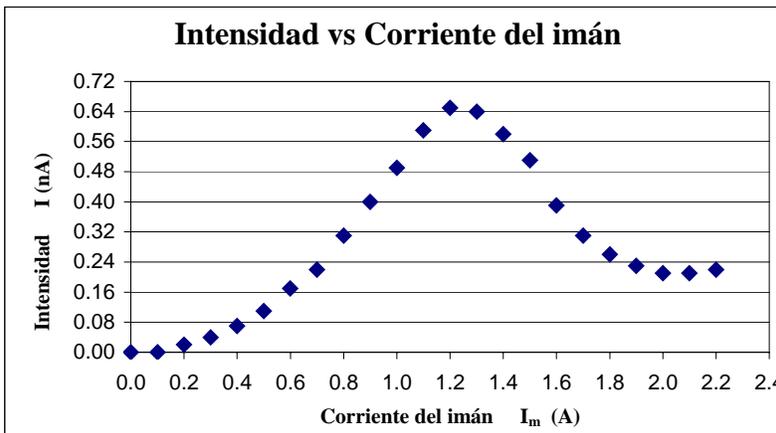
Gráfica 3.49 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1850 \pm 1$ V.



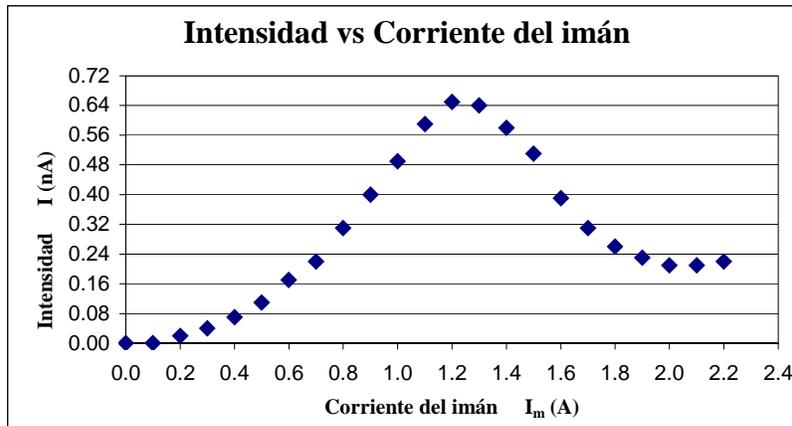
Gráfica 3.50 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2160 \pm 1$ V.



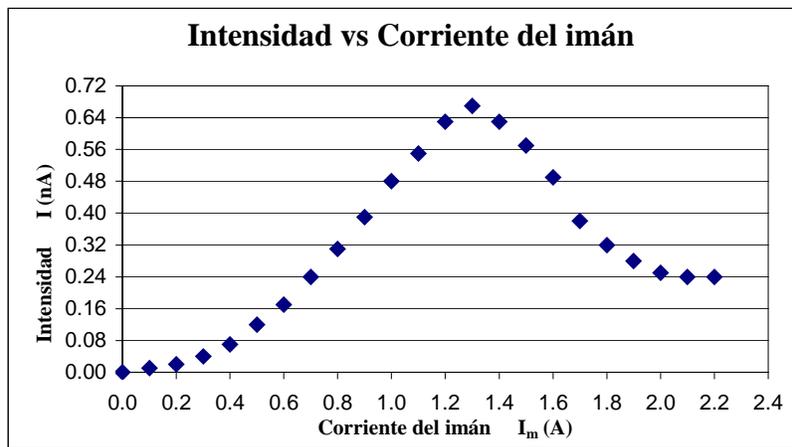
Gráfica 3.51 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2540 \pm 1$ V.



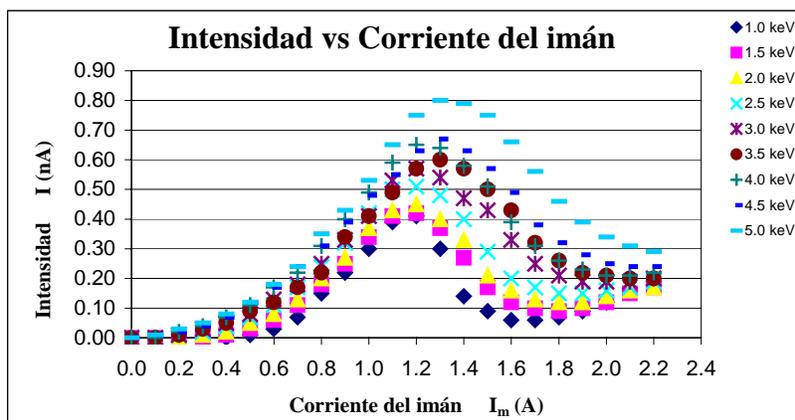
Gráfica 3.52 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2900 \pm 1$ V.



Gráfica 3.53 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3250 \pm 1$ V.



Gráfica 3.54 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3620 \pm 1$ V.



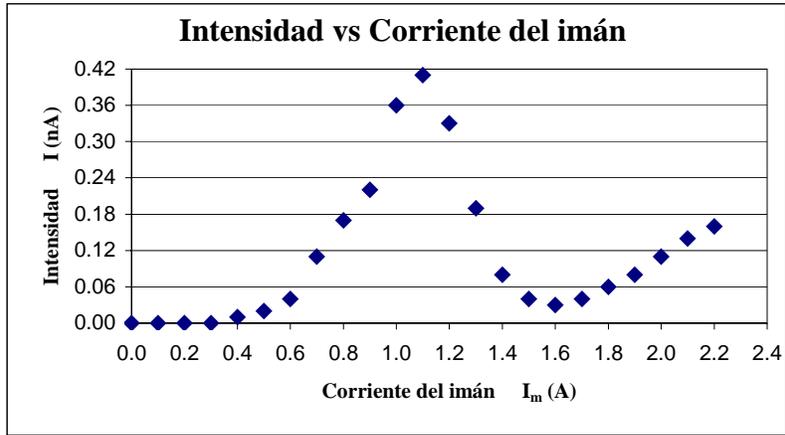
Gráfica 3.55 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y del voltaje de las lentes $V_{\text{exp}2}$ de la tabla 3.46. Resumen de todas las energías estudiadas para $P = 65 \pm 2.5$ μHg .

3.4.2 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

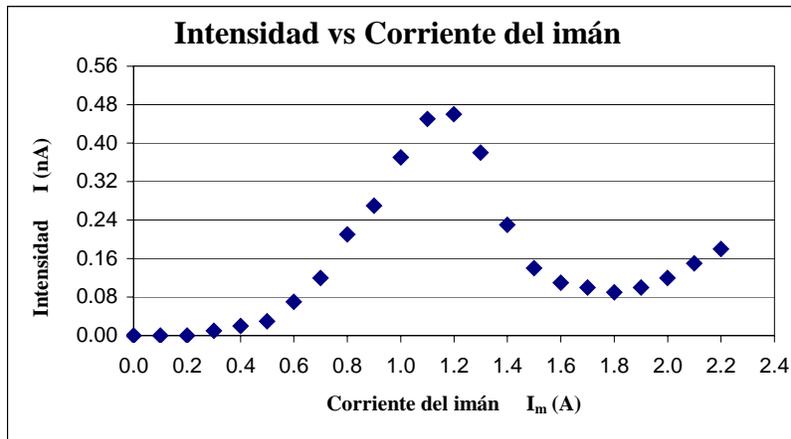
Se presenta la tabla de datos en la que se registraron los valores medidos de la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , para cada uno de los valores de la energía E de aceleración, así como los correspondientes valores del voltaje V_{exp2} aplicado a las lentes para el enfoque del haz, a una presión de $70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

$I_m \pm 0.05$ (A)	$I \pm 0.005$ (nA)								
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
0.3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04
0.4	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07
0.5	0.02	0.03	0.05	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.13
0.6	0.04	0.07	0.08	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.18
0.7	0.11	0.12	0.14	0.23	0.19	0.21	0.22	0.23	0.27
0.8	0.17	0.21	0.23	0.31	0.29	0.31	0.31	0.32	0.37
0.9	0.22	0.27	0.30	0.38	0.37	0.37	0.42	0.44	0.49
1.0	0.36	0.37	0.42	0.50	0.45	0.50	0.50	0.54	0.61
1.1	0.41	0.45	0.49	0.53	0.56	0.58	0.59	0.66	0.70
1.2	0.33	0.46	0.51	0.48	0.60	0.64	0.68	0.73	0.77
1.3	0.19	0.38	0.47	0.41	0.57	0.63	0.68	0.74	0.78
1.4	0.08	0.23	0.38	0.29	0.51	0.58	0.63	0.70	0.71
1.5	0.04	0.14	0.24	0.21	0.42	0.51	0.57	0.61	0.63
1.6	0.03	0.11	0.17	0.16	0.31	0.40	0.45	0.53	0.55
1.7	0.04	0.10	0.13	0.14	0.23	0.29	0.34	0.41	0.44
1.8	0.06	0.09	0.12	0.14	0.19	0.23	0.28	0.33	0.37
1.9	0.08	0.10	0.12	0.15	0.18	0.21	0.26	0.29	0.32
2.0	0.11	0.12	0.14	0.18	0.19	0.21	0.24	0.27	0.30
2.1	0.14	0.15	0.16	0.20	0.20	0.22	0.24	0.27	0.27
2.2	0.16	0.18	0.18	0.22	0.21	0.23	0.25	0.27	0.27
$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	800	1200	1600	1950	2350	2750	3130	3520	3900
$E \pm 0.01$ (keV)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

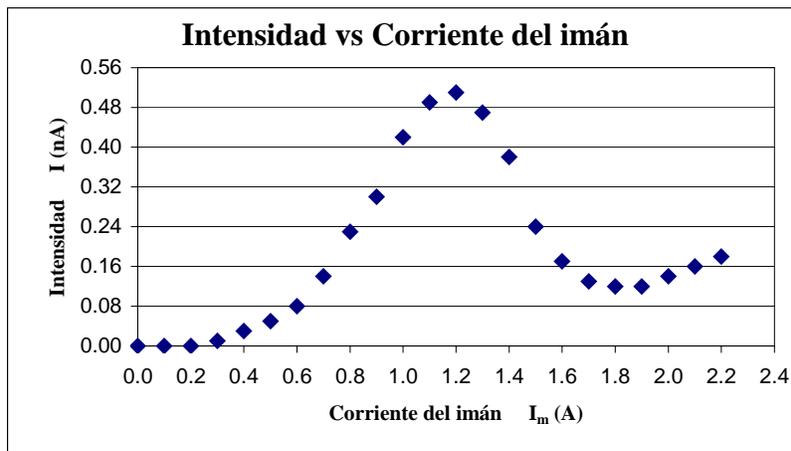
Tabla 3.47 Corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y los correspondiente valores del voltaje V_{exp2} para el enfoque del haz, a una presión de $70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.



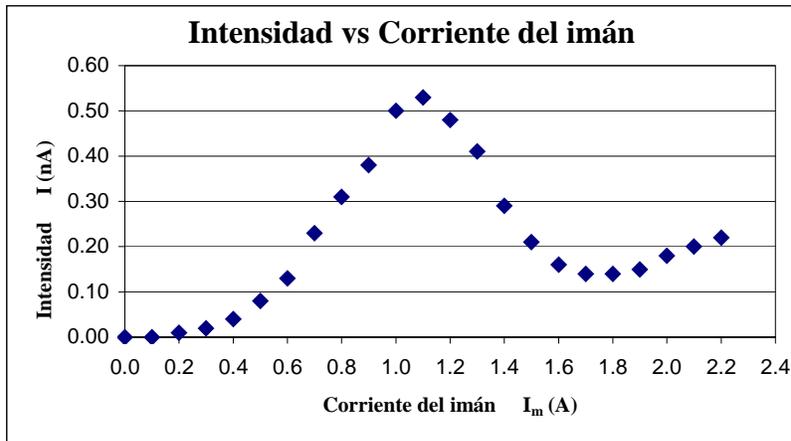
Gráfica 3.56 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 800 \pm 1$ V.



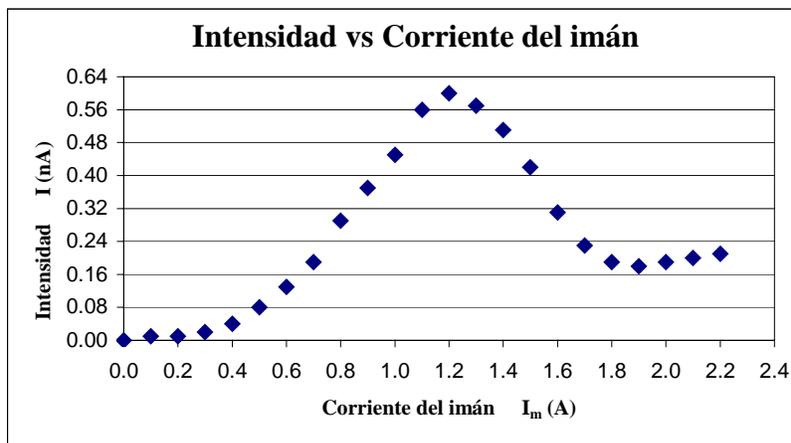
Gráfica 3.57 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1200 \pm 1$ V.



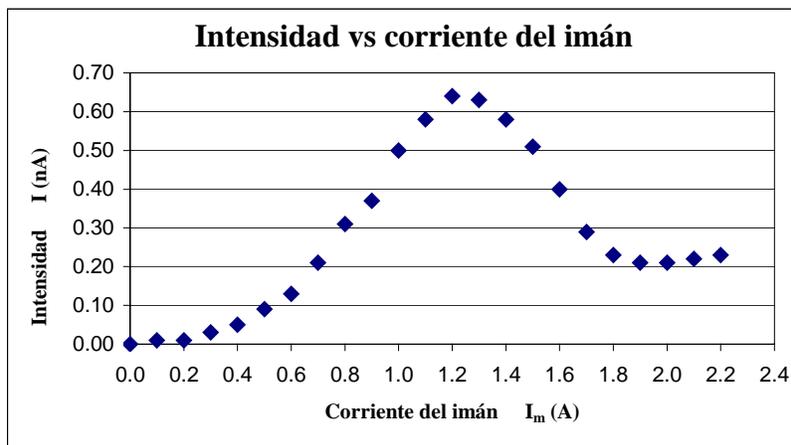
Gráfica 3.58 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1600 \pm 1$ V.



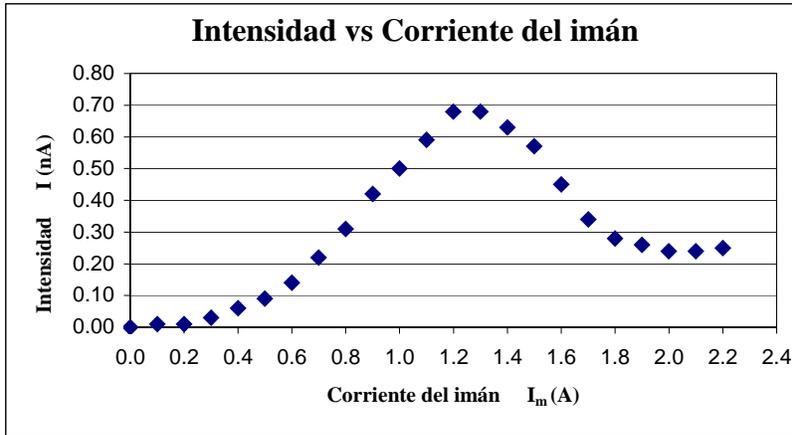
Gráfica 3.59 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1950 \pm 1$ V.



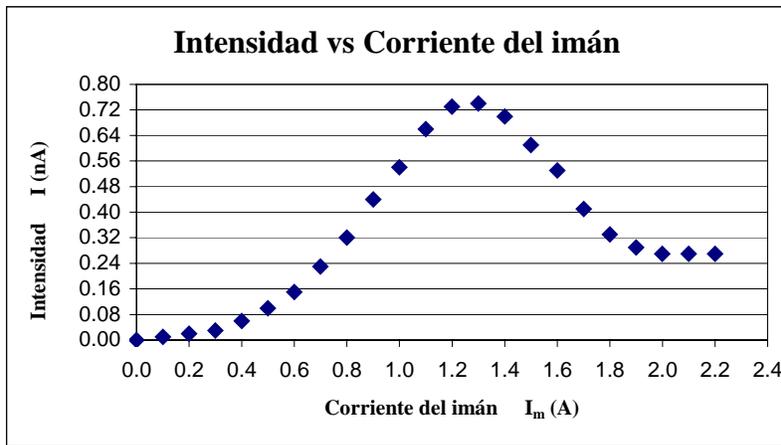
Gráfica 3.60 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2350 \pm 1$ V.



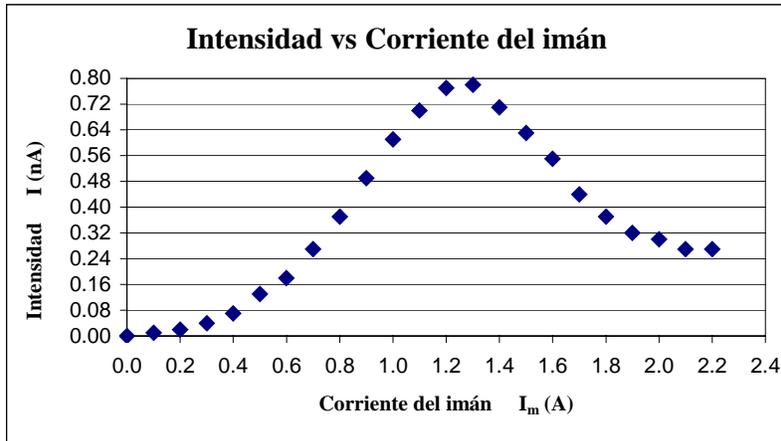
Gráfica 3.61 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2750 \pm 1$ V.



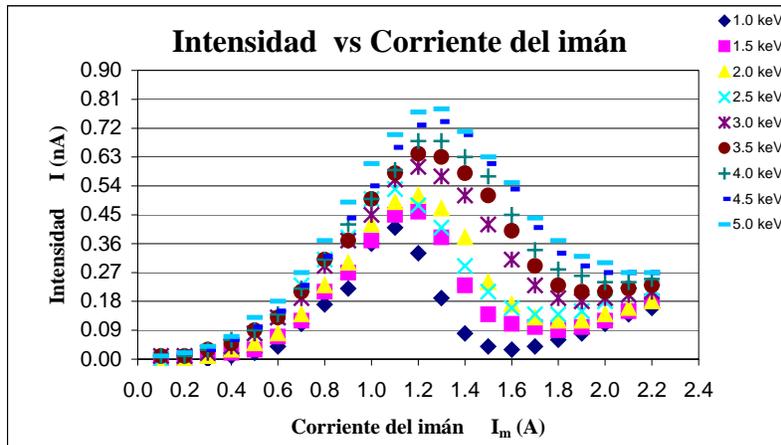
Gráfica 3.62 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3130 \pm 1$ V.



Gráfica 3.63 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3520 \pm 1$ V.



Gráfica 3.64 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3900 \pm 1$ V.



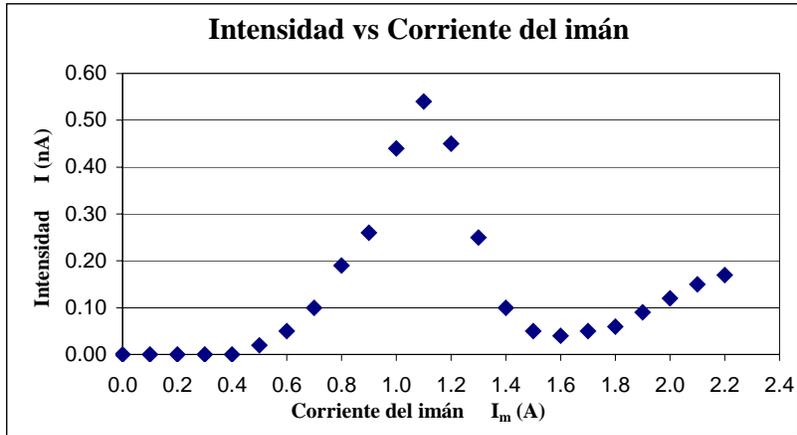
Gráfica 3.65 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y del voltaje de las lentes V_{exp2} de la tabla 3.47. Resumen de todas las energías estudiadas para $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

3.4.3 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

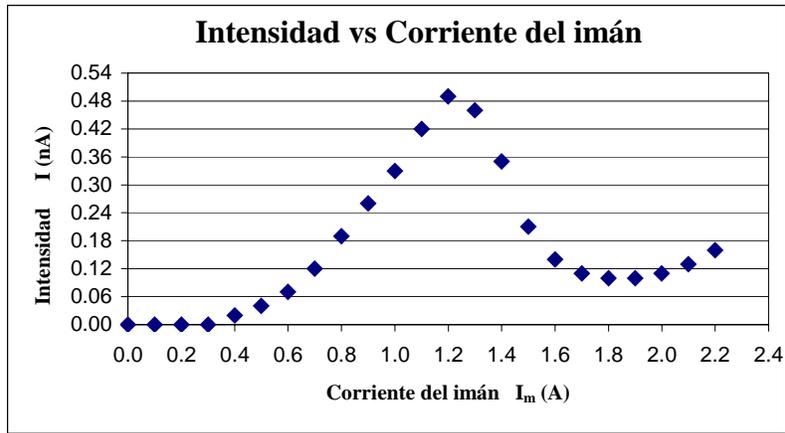
Se presenta la tabla de datos en la que se registraron los valores medidos de la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , para cada uno de los valores de la energía E de aceleración, así como los correspondientes valores del voltaje V_{exp2} aplicado a las lentes para el enfoque del haz, a una presión de $75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

$I_m \pm 0.05$ (A)	$I \pm 0.005$ (nA)								
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
0.2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
0.3	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
0.4	0.00	0.02	0.04	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.10
0.5	0.02	0.04	0.07	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.16
0.6	0.05	0.07	0.12	0.15	0.17	0.19	0.20	0.23	0.24
0.7	0.10	0.12	0.19	0.21	0.25	0.27	0.29	0.33	0.36
0.8	0.19	0.19	0.27	0.33	0.33	0.39	0.39	0.45	0.47
0.9	0.26	0.26	0.35	0.42	0.44	0.49	0.52	0.57	0.59
1.0	0.44	0.33	0.48	0.56	0.56	0.61	0.65	0.59	0.73
1.1	0.54	0.42	0.58	0.65	0.67	0.73	0.75	0.67	0.85
1.2	0.45	0.49	0.59	0.65	0.71	0.78	0.84	0.76	0.96
1.3	0.25	0.46	0.52	0.57	0.67	0.75	0.82	0.79	1.01
1.4	0.10	0.35	0.39	0.46	0.59	0.65	0.76	0.76	0.97
1.5	0.05	0.21	0.27	0.36	0.46	0.57	0.65	0.71	0.87
1.6	0.04	0.14	0.19	0.26	0.36	0.44	0.54	0.63	0.75
1.7	0.05	0.11	0.16	0.20	0.27	0.35	0.40	0.52	0.61
1.8	0.06	0.10	0.14	0.19	0.24	0.30	0.33	0.43	0.53
1.9	0.09	0.10	0.15	0.19	0.22	0.27	0.31	0.37	0.45
2.0	0.12	0.11	0.16	0.20	0.23	0.26	0.30	0.33	0.39
2.1	0.15	0.13	0.19	0.22	0.24	0.27	0.30	0.31	0.38
2.2	0.17	0.16	0.21	0.24	0.25	0.28	0.30	0.30	0.37
$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	715	1050	1400	1750	2150	2500	2850	3200	3550
$E \pm 0.01$ (KeV)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

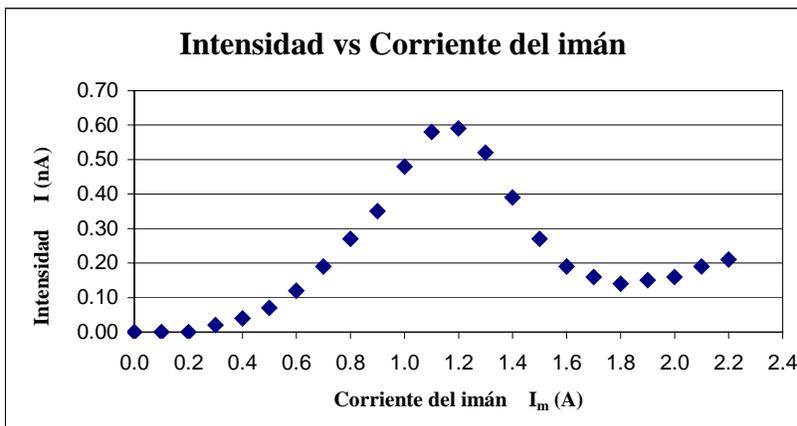
Tabla 3.48 Corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y los correspondiente valores del voltaje V_{exp2} para el enfoque del haz, a una presión de $75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.



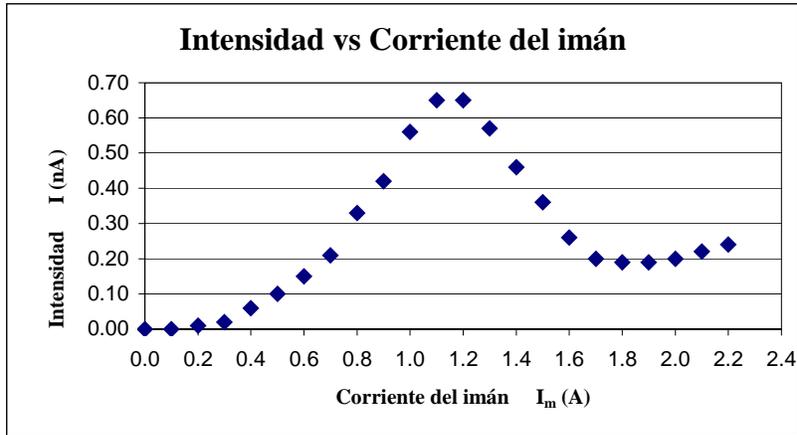
Gráfica 3.66 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 715 \pm 1$ V.



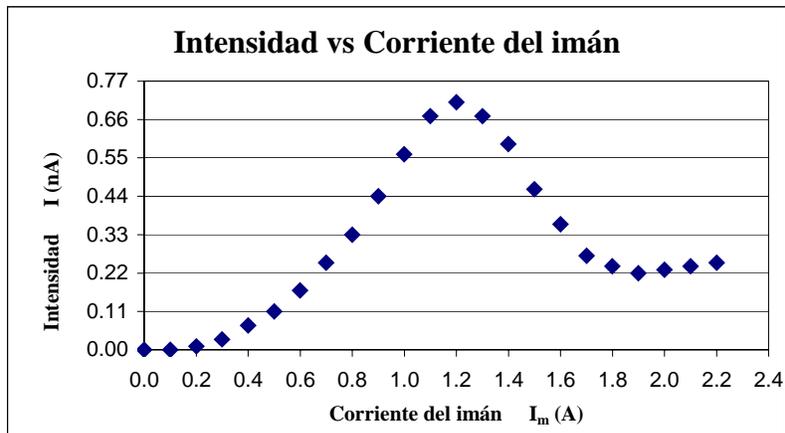
Gráfica 3.67 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 1050 \pm 1$ V.



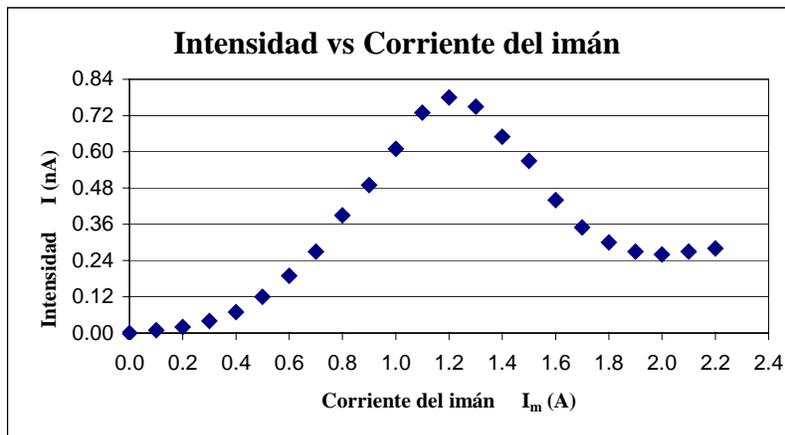
Gráfica 3.68 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 1400 \pm 1$ V.



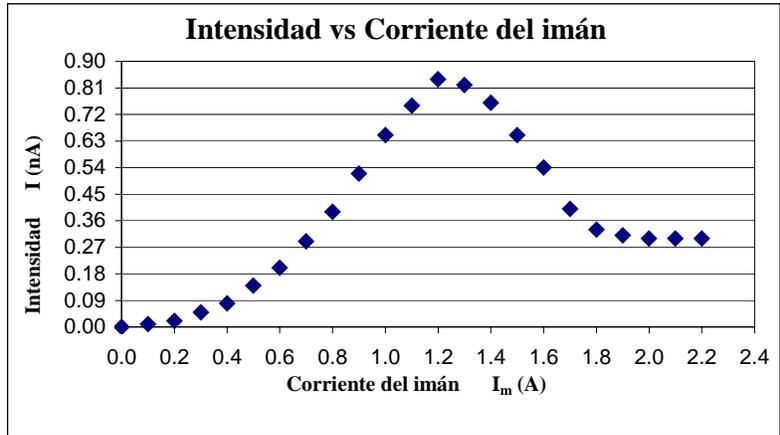
Gráfica 3.69 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1750 \pm 1$ V.



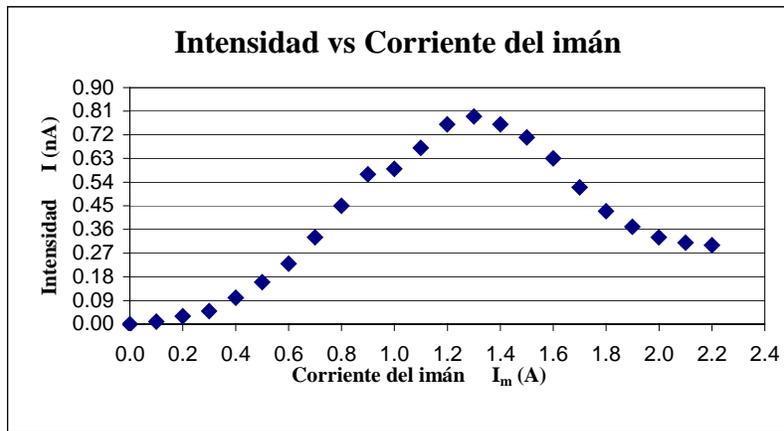
Gráfica 3.70 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2150 \pm 1$ V.



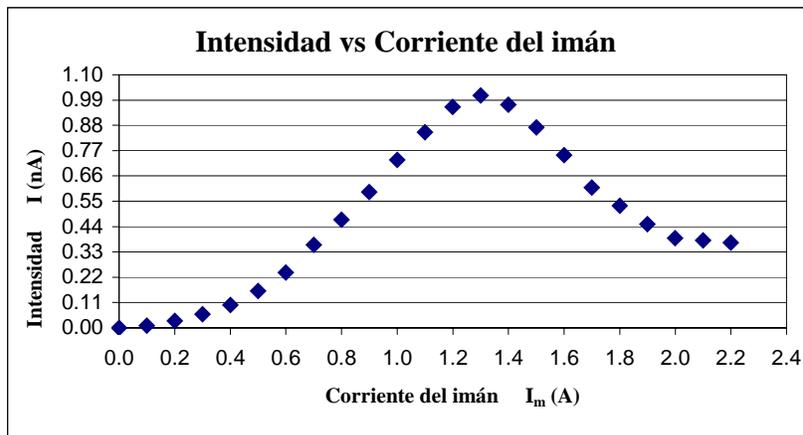
Gráfica 3.71 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2500 \pm 1$ V.



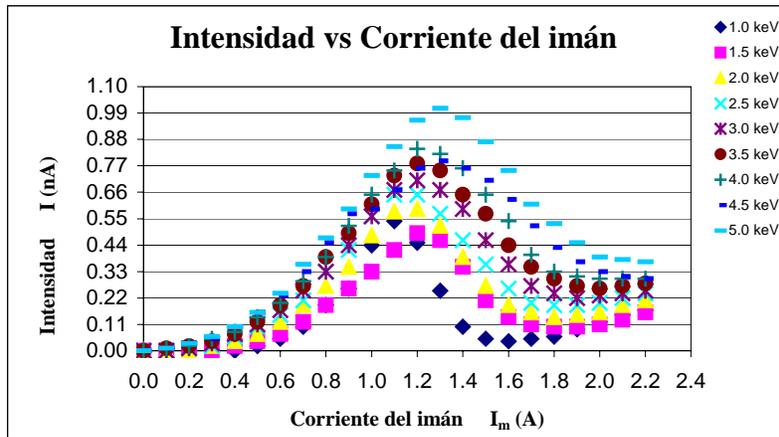
Gráfica 3.72 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2850 \pm 1$ V.



Gráfica 3.73 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3200 \pm 1$ V.



Gráfica 3.74 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3550 \pm 1$ V.



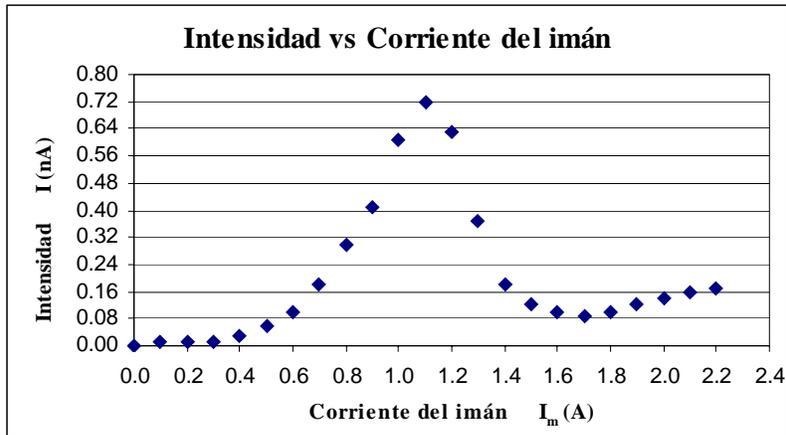
Gráfica 3.75 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y del voltaje de las lentes V_{exp2} de la tabla 3.48. Resumen de todas las energías estudiadas para $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

3.4.4 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

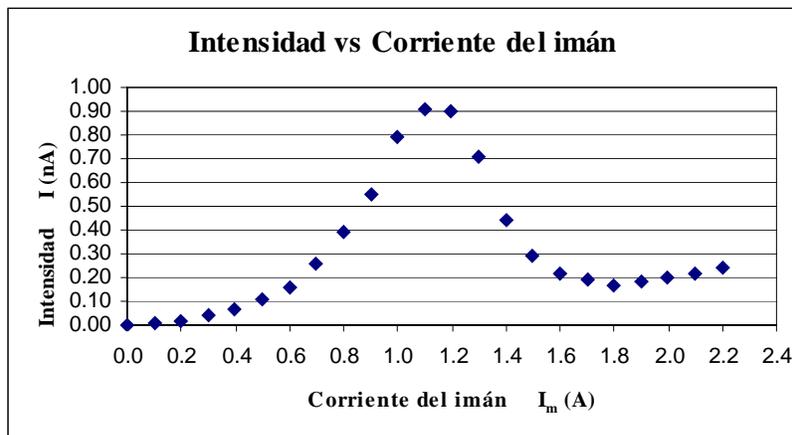
Se presenta la tabla de datos en la que se registraron los valores medidos de la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , para cada uno de los valores de la energía E de aceleración, así como los correspondientes valores del voltaje V_{exp2} aplicado a las lentes para el enfoque del haz, a una presión de $80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

$I_m \pm 0.05$ (A)	$I \pm 0.005$ (nA)								
0.0	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
0.1	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03
0.2	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.06
0.3	0.01	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	0.03	0.07	0.09	0.08	0.09	0.11	0.10	0.12	0.12
0.5	0.06	0.11	0.15	0.11	0.14	0.15	0.15	0.16	0.18
0.6	0.10	0.16	0.21	0.16	0.20	0.22	0.20	0.21	0.24
0.7	0.18	0.26	0.32	0.23	0.29	0.30	0.26	0.29	0.31
0.8	0.30	0.39	0.48	0.33	0.42	0.41	0.37	0.37	0.42
0.9	0.41	0.55	0.65	0.44	0.50	0.53	0.47	0.51	0.51
1.0	0.61	0.79	0.89	0.64	0.66	0.69	0.59	0.63	0.68
1.1	0.72	0.91	0.95	0.78	0.83	0.81	0.75	0.79	0.81
1.2	0.63	0.90	0.87	0.84	0.86	0.89	0.88	0.92	0.97
1.3	0.37	0.71	0.68	0.81	0.77	0.89	0.94	0.99	1.07
1.4	0.18	0.44	0.45	0.70	0.64	0.76	0.91	0.97	1.06
1.5	0.12	0.29	0.31	0.54	0.45	0.64	0.83	0.90	1.01
1.6	0.10	0.22	0.26	0.39	0.32	0.50	0.72	0.76	0.88
1.7	0.09	0.19	0.23	0.29	0.26	0.36	0.57	0.61	0.81
1.8	0.10	0.17	0.22	0.24	0.23	0.30	0.42	0.48	0.68
1.9	0.12	0.18	0.23	0.23	0.21	0.27	0.34	0.40	0.53
2.0	0.14	0.20	0.25	0.22	0.23	0.26	0.31	0.35	0.44
2.1	0.16	0.22	0.27	0.22	0.24	0.26	0.30	0.33	0.40
2.2	0.17	0.24	0.29	0.24	0.26	0.27	0.29	0.32	0.37
$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	760	1200	1550	1950	2340	2750	3110	3500	3900
$E \pm 0.01$ (KeV)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

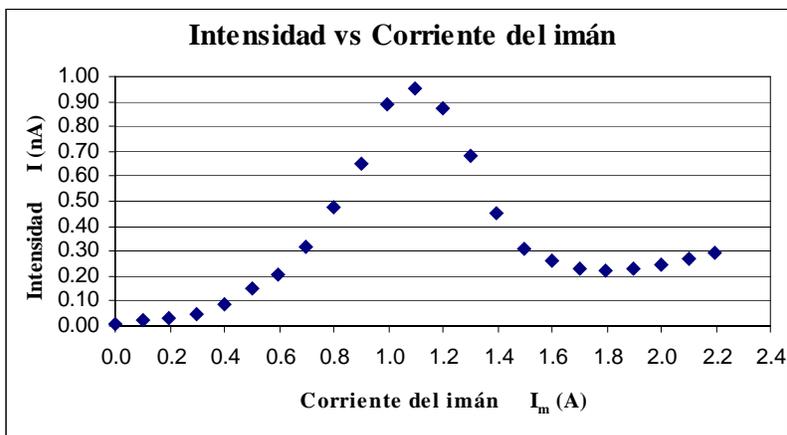
Tabla 3.49 Corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y los correspondiente valores del voltaje V_{exp2} para el enfoque del haz, a una presión de $80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.



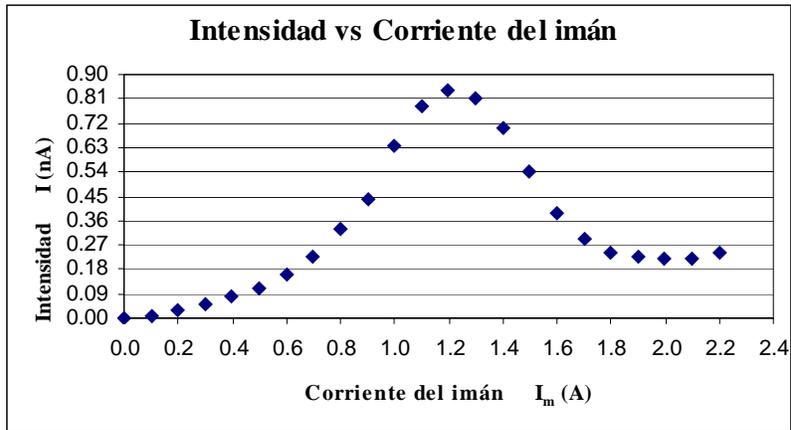
Gráfica 3.76 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 760 \pm 1$ V.



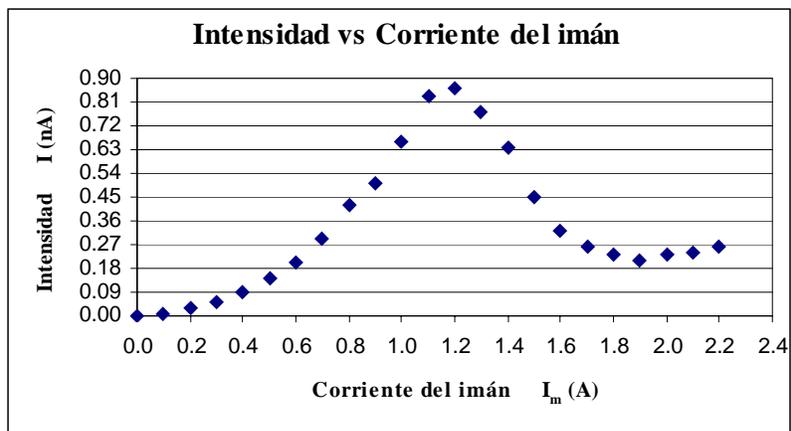
Gráfica 3.77 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1200 \pm 1$ V.



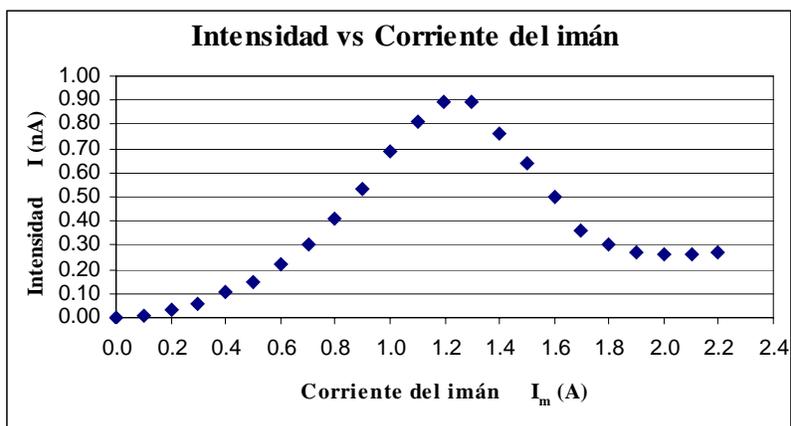
Gráfica 3.78 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1550 \pm 1$ V.



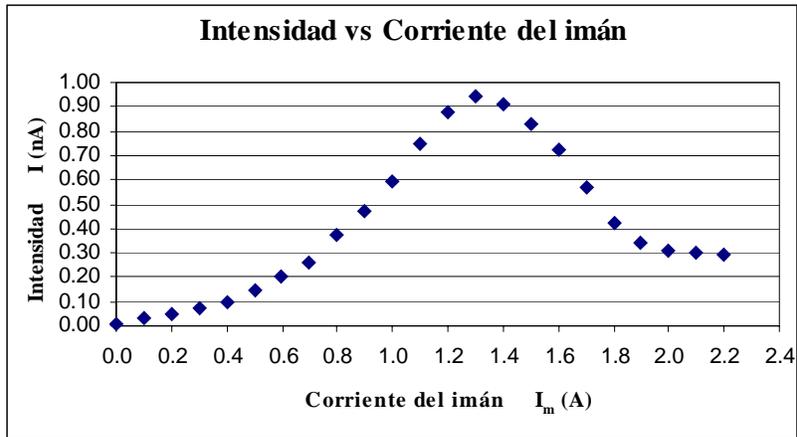
Gráfica 3.79 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 1950 \pm 1$ V.



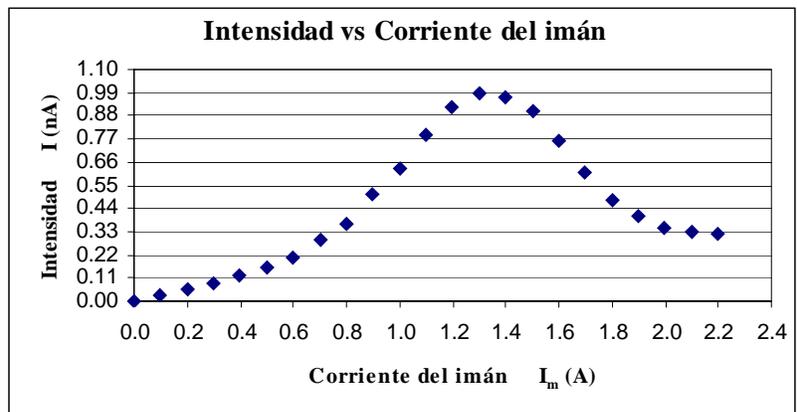
Gráfica 3.80 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2340 \pm 1$ V.



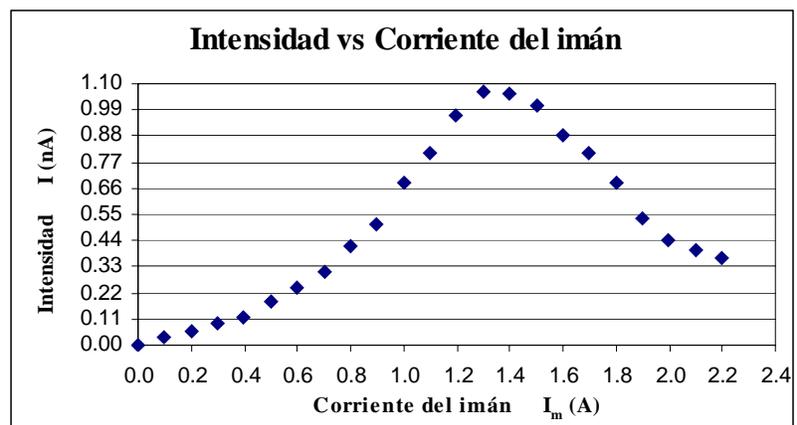
Gráfica 3.81 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 2750 \pm 1$ V.



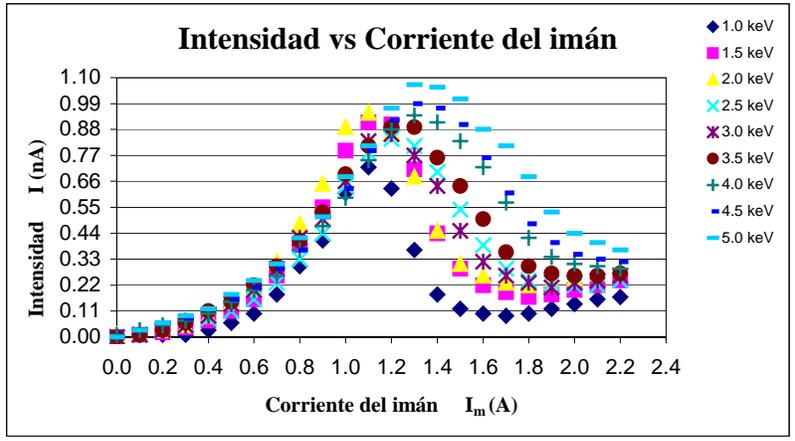
Gráfica 3.82 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3110 \pm 1$ V.



Gráfica 3.83 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3500 \pm 1$ V.



Gráfica 3.84 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp}2} = 3900 \pm 1$ V.



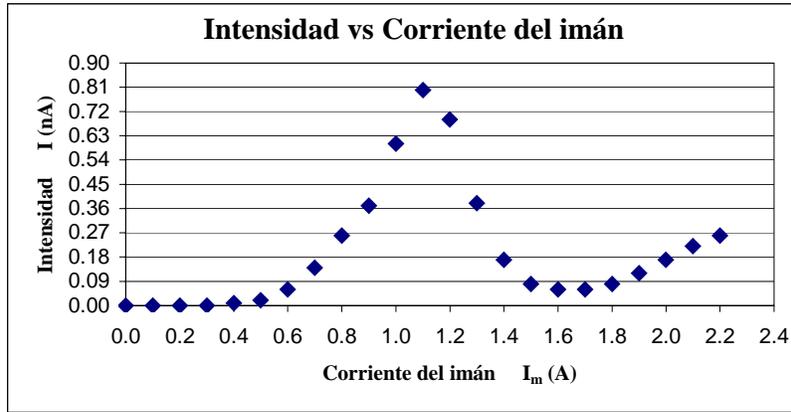
Gráfica 3.85 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y del voltaje de las lentes V_{exp2} de la tabla 3.49. Resumen de todas las energías estudiadas para $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

3.4.5 DATOS EXPERIMENTALES PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

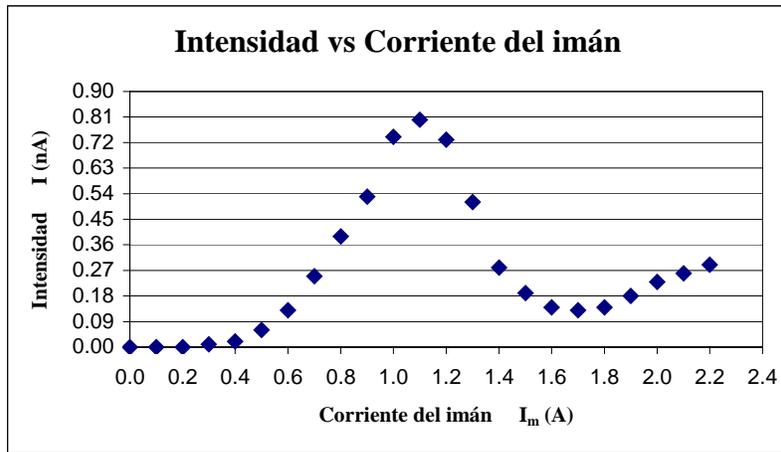
Se presenta la tabla de datos en la que se registraron los valores medidos de la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , para cada uno de los valores de la energía E de aceleración, así como los correspondientes valores del voltaje V_{exp2} aplicado a las lentes para el enfoque del haz, a una presión de $85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

$I_m \pm 0.05$ (A)	$I \pm 0.005$ (nA)								
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
0.2	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
0.3	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.07	0.08
0.4	0.01	0.02	0.04	0.07	0.08	0.09	0.12	0.12	0.14
0.5	0.02	0.06	0.09	0.13	0.15	0.16	0.20	0.20	0.23
0.6	0.06	0.13	0.17	0.22	0.24	0.26	0.30	0.30	0.36
0.7	0.14	0.25	0.27	0.36	0.36	0.36	0.46	0.43	0.48
0.8	0.26	0.39	0.43	0.49	0.51	0.50	0.59	0.60	0.68
0.9	0.37	0.53	0.59	0.68	0.67	0.65	0.77	0.77	0.86
1.0	0.60	0.74	0.76	0.83	0.89	0.82	0.93	0.95	1.01
1.1	0.80	0.80	0.83	0.91	0.97	0.90	1.09	1.12	1.18
1.2	0.69	0.73	0.79	0.87	0.97	0.95	1.16	1.24	1.31
1.3	0.38	0.51	0.66	0.73	0.88	0.89	1.11	1.25	1.37
1.4	0.17	0.28	0.44	0.48	0.69	0.85	1.00	1.17	1.30
1.5	0.08	0.19	0.28	0.36	0.52	0.67	0.82	1.05	1.19
1.6	0.06	0.14	0.22	0.30	0.40	0.54	0.70	0.88	1.04
1.7	0.06	0.13	0.20	0.25	0.33	0.42	0.56	0.72	0.89
1.8	0.08	0.14	0.20	0.24	0.29	0.37	0.51	0.61	0.72
1.9	0.12	0.18	0.22	0.25	0.29	0.35	0.44	0.53	0.58
2.0	0.17	0.23	0.26	0.28	0.30	0.34	0.42	0.48	0.52
2.1	0.22	0.26	0.29	0.31	0.32	0.35	0.41	0.45	0.50
2.2	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.36	0.41	0.49	0.49
$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	700	1100	1400	1750	2110	2450	2850	3200	3550
$E \pm 0.01$ (KeV)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

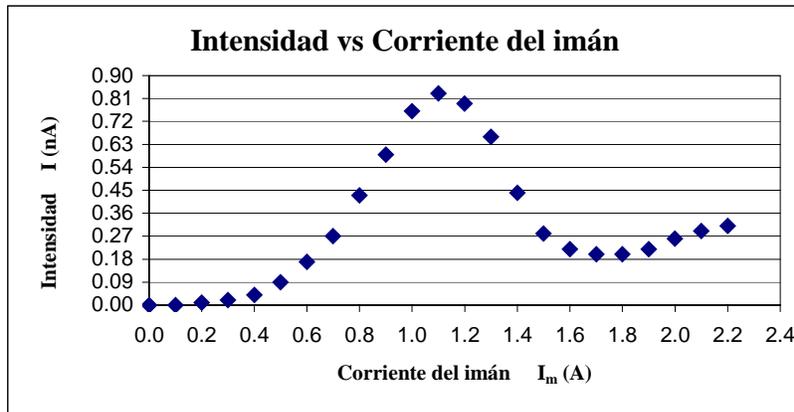
Tabla 3.50 Corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y los correspondiente valores del voltaje V_{exp2} para el enfoque del haz, a una presión de $85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.



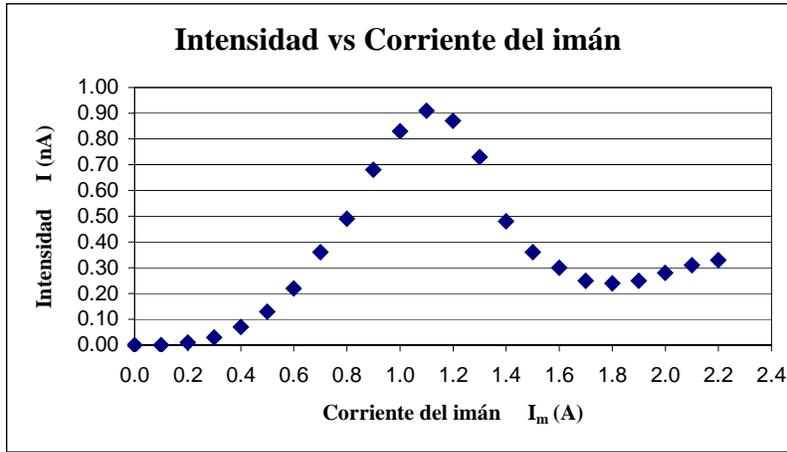
Gráfica 3.86 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 700 \pm 1$ V.



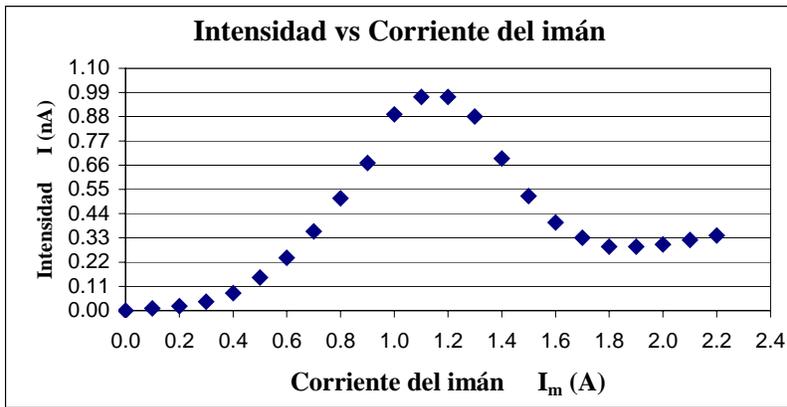
Gráfica 3.87 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 1.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 1100 \pm 1$ V.



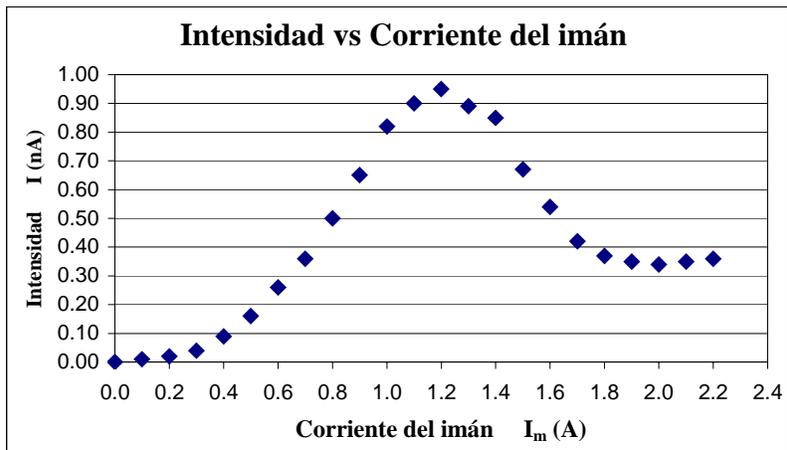
Gráfica 3.88 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 1400 \pm 1$ V.



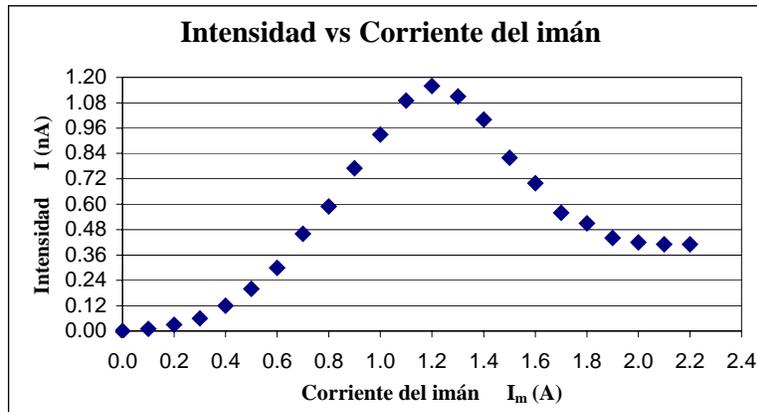
Gráfica 3.89 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 2.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 1750 \pm 1$ V.



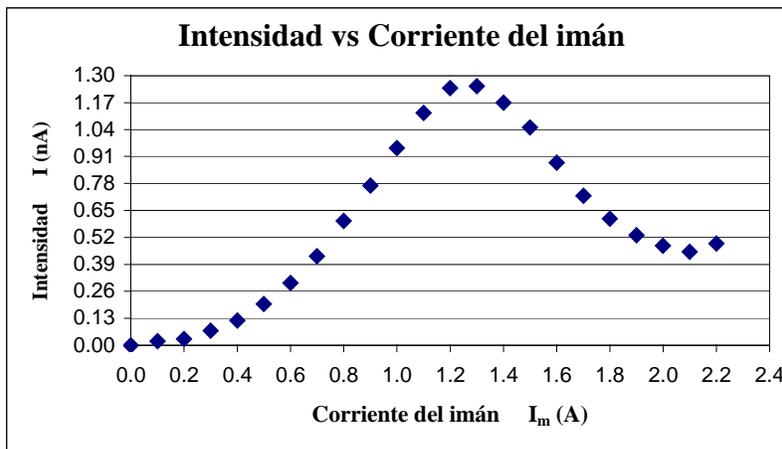
Gráfica 3.90 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 2110 \pm 1$ V.



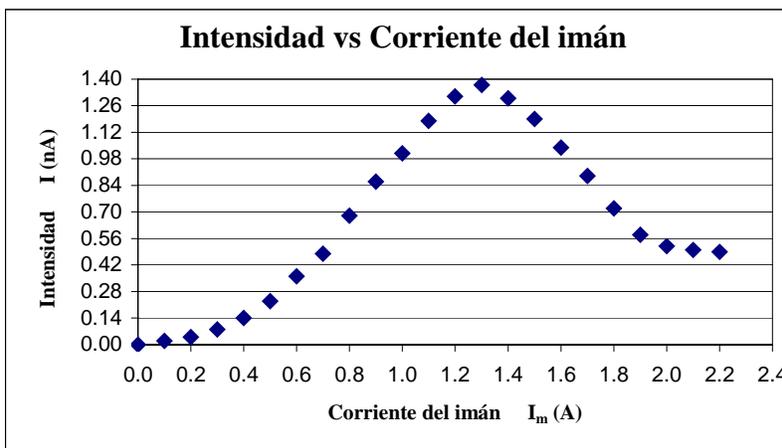
Gráfica 3.91 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 3.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 2450 \pm 1$ V.



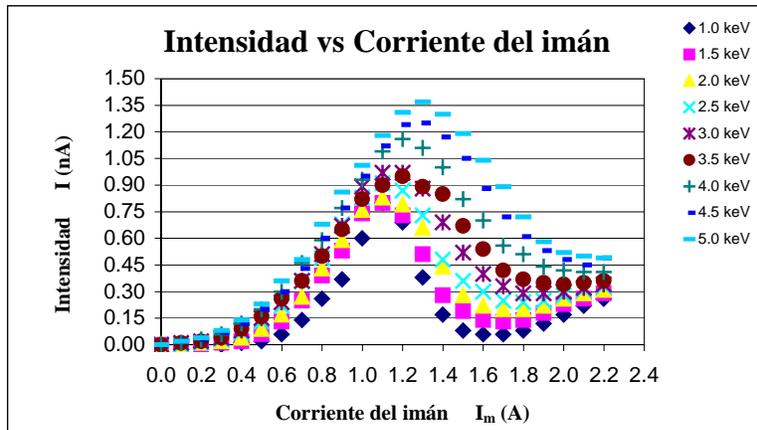
Gráfica 3.92 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 2850 \pm 1$ V.



Gráfica 3.93 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 4.5 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 3200 \pm 1$ V.



Gráfica 3.94 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para $E = 5.0 \pm 0.01$ keV y $V_{\text{exp2}} = 3550 \pm 1$ V.



Gráfica 3.95 Intensidad del haz de iones I en función de la corriente del imán I_m para todos los valores de la energía E y del voltaje de las lentes V_{exp2} de la tabla 3.50. Resumen de todas las energías estudiadas para $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la optimización de las lentes Einzel y para la optimización del haz de iones. En primer lugar, se describen las relaciones entre el voltaje V_{Lmax} aplicado al segundo electrodo de las lentes (voltaje para el cual la corriente iónica I es máxima) y la energía E de aceleración de los iones, para cada presión del gas dentro de la fuente de iones. Se obtiene el promedio de estas relaciones de optimización, el cual se puede utilizar, para calcular los valores iniciales del voltaje aplicado a las lentes por cada keV de energía, siempre que se desee producir un haz de iones en el sistema experimental. En segundo lugar, se muestran en tablas los valores de todos los parámetros, para los cuales la corriente iónica I es máxima, lo que optimiza el haz de iones. Estos valores son la energía E de aceleración de los iones, el voltaje V_{exp1} calculado a partir de las relaciones de optimización, el voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente después de la optimización, la corriente del imán I_m para la cual se observó la máxima corriente iónica, y el valor I_{opt} de la corriente óptima (máxima). Por último, se presenta una comparación del comportamiento de las curvas de distribución de energía para las cinco presiones de trabajo, y para valores fijos de la energía. Esto se hace para los valores de 1.0, 3.0 y 5.0 ± 0.01 keV.

4.1 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DE LAS LENTES EINZEL

Se optimizaron las lentes Einzel a partir de los valores del voltaje V_L , para los cuales la corriente iónica I fue máxima en las distribuciones de energía. Estos datos se encuentran registrados en las tablas del capítulo anterior (apartado 3.3). A los valores del voltaje a la máxima corriente se les denota como V_{Lmax} .

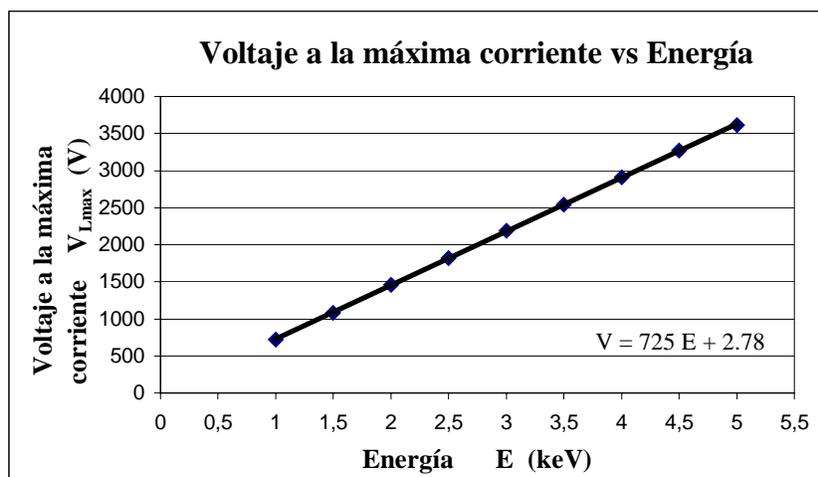
Ajustando estos valores por el método de mínimos cuadrados, se encontraron las relaciones entre el voltaje V_{Lmax} aplicado a las lentes Einzel y la energía E de los iones. A continuación se muestran las tablas y las gráficas de dichos valores para cada una de las presiones.

4.1.1 RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.1 muestra los valores del voltaje V_{Lmax} para los cuales la corriente iónica I fue máxima, para cada valor de la energía E y a una presión de $65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$. En la gráfica 4.1 se observan los puntos experimentales y la recta ajustada.

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{Lmax} \pm 1$ (V)
1.0	720
1.5	1080
2.0	1460
2.5	1820
3.0	2190
3.5	2540
4.0	2910
4.5	3270
5.0	3610
$P = 65 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	

Tabla 4.1 Voltaje de las lentes Einzel (V_L) en función de la energía (E).



Gráfica 4.1 Recta ajustada para los valores del voltaje V_{Lmax} a la máxima corriente iónica I vs energía E de aceleración para $P = 65 \pm \mu\text{Hg}$.

La relación entre el voltaje a la máxima corriente V_{Lmax} y la energía E de los iones está dada por:

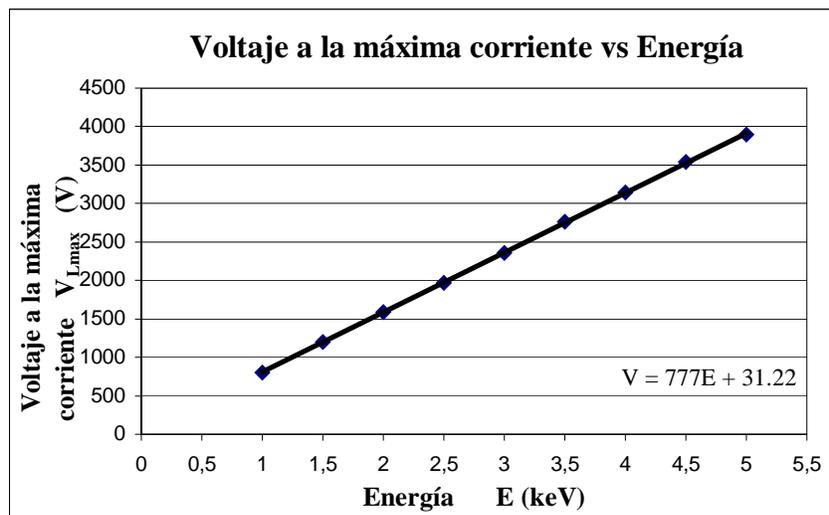
$$V_{Lmax} = [(725 \pm 2.72)V] E / \text{keV} + (2.78 \pm 8.90) V \quad (4.1)$$

4.1.2 RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.2 muestra los valores del voltaje V_{Lmax} para los cuales la corriente iónica I fue máxima, para cada valor de la energía E y a una presión de $70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$. En la gráfica 4.2 se observan los puntos experimentales y la recta ajustada.

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{L_{\max}} \pm 1$ (V)
1.0	800
1.5	1200
2.0	1590
2.5	1970
3.0	2360
3.5	2760
4.0	3140
4.5	3540
5.0	3900
$P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	

Tabla 4.2 Voltaje de las lentes Einzel (V_L) en función de la energía (E).



Gráfica 4.2 Recta ajustada para los valores del voltaje $V_{L_{\max}}$ a la máxima corriente iónica I vs energía E de aceleración para $P = 70 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

La relación entre el voltaje a la máxima corriente $V_{L_{\max}}$ y la energía E de los iones está dada por:

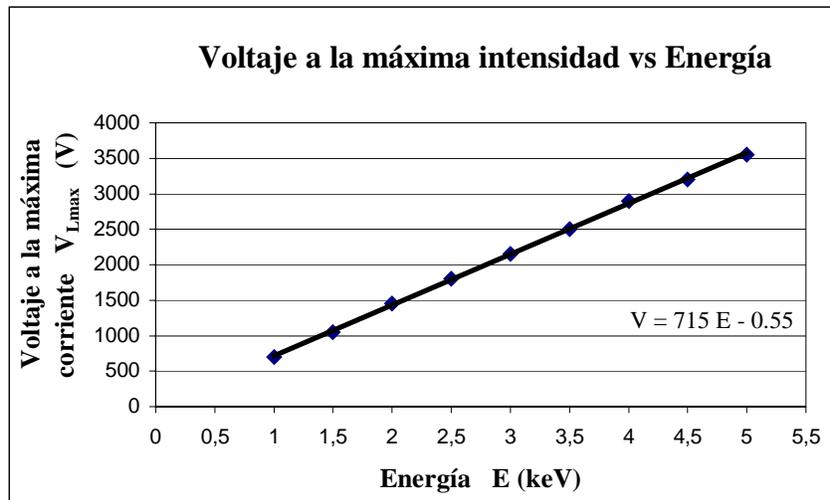
$$V_{L_{\max}} = [(777 \pm 2.43)V] E / \text{keV} + (31.22 \pm 7.94) V \quad (4.2)$$

4.1.3 RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.3 muestra los valores del voltaje $V_{L_{\max}}$ para los cuales la corriente iónica I fue máxima, para cada valor de la energía E y a una presión de $75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$. En la gráfica 4.3 se observan los puntos experimentales y la recta ajustada.

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{L_{max}} \pm 1$ (V)
1.0	700
1.5	1050
2.0	1450
2.5	1800
3.0	2150
3.5	2500
4.0	2900
4.5	3200
5.0	3550
$P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	

Tabla 4.3 Voltaje de las lentes Einzel (V_L) en función de la energía (E).



Gráfica 4.3 Recta ajustada para los valores del voltaje $V_{L_{max}}$ a la máxima corriente iónica I vs energía E de aceleración para $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

La relación entre el voltaje a la máxima corriente V_L y la energía E de los iones está dada por:

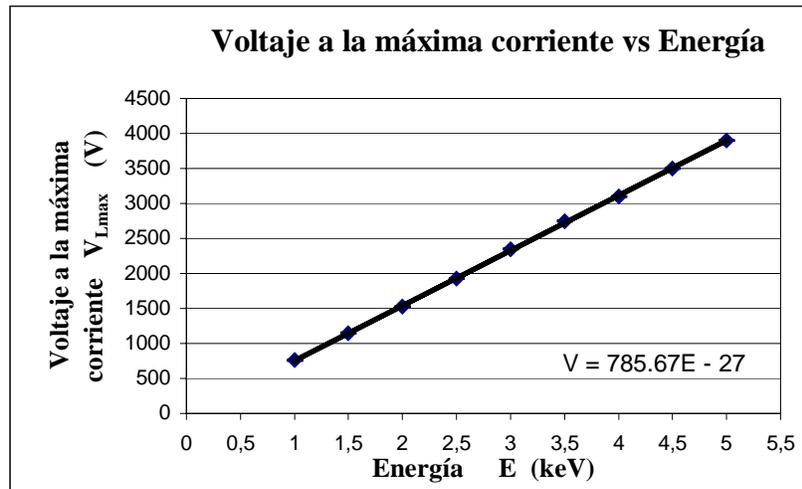
$$V_{L_{max}} = [(715 \pm 6.05)V] E / \text{keV} - (0.55 \pm 19.77) V \quad (4.3)$$

4.1.4 RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.4 muestra los valores del voltaje $V_{L_{max}}$ para los cuales la corriente iónica I fue máxima, para cada valor de la energía E y a una presión de $65 \mu\text{Hg}$. En la gráfica 4.4 se observan los puntos experimentales y la recta ajustada.

$E \pm 0.5$ (keV)	$V_{L_{max}} \pm 1$ (V)
1.0	760
1.5	1150
2.0	1530
2.5	1930
3.0	2350
3.5	2750
4.0	3100
4.5	3500
5.0	3900
$P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	

Tabla 4.4 Voltaje de las lentes Einzel (V_L) en función de la energía (E).



Gráfica 4.4 Recta ajustada para los valores del voltaje $V_{L_{max}}$ a la máxima corriente iónica I vs energía E de aceleración para $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

La relación entre el voltaje a la máxima corriente V_L y la energía E de los iones está dada por:

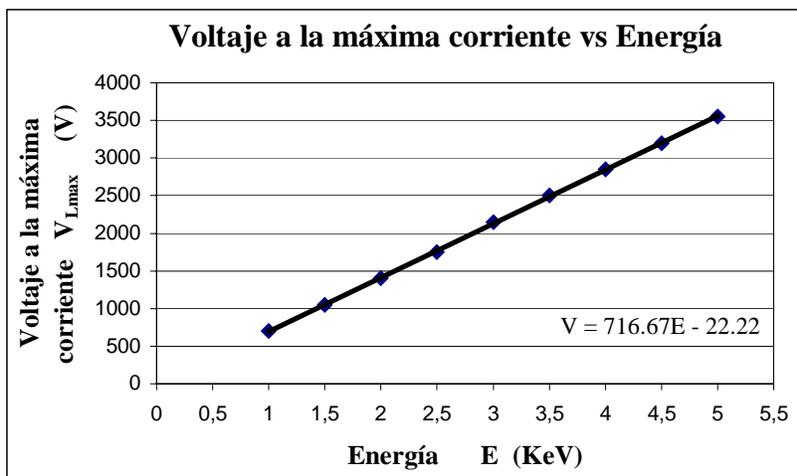
$$V_{L_{max}} = [(785.67 \pm 4.04)V] E / \text{keV} - (27 \pm 13.21) V \quad (4.4)$$

4.1.5 RELACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.5 muestra los valores del voltaje $V_{L_{max}}$ para los cuales la corriente iónica I fue máxima para cada valor de la energía E y a una presión de $80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$. En la gráfica 4.5 se observan los puntos experimentales y la recta ajustada.

$E \pm 0.5$ (keV)	$V_{L_{max}} \pm 1$ (V)
1.0	700
1.5	1050
2.0	1400
2.5	1750
3.0	2150
3.5	2500
4.0	2850
4.5	3200
5.0	3550
$P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$	

Tabla 4.5 Voltaje de las lentes Einzel (V_L) en función de la energía (E).



Gráfica 4.5 Recta ajustada para los valores del voltaje $V_{L_{max}}$ a la máxima corriente iónica I vs energía E de aceleración para $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$.

La relación entre el voltaje a la máxima corriente $V_{L_{max}}$ y la energía E de los iones está dada por:

$$V_{L_{max}} = [(716.67 \pm 3.64)\text{V}] E / \text{keV} - (22.22 \pm 11.87)\text{V} \quad (4.5)$$

De estas cinco relaciones de optimización, obtenemos el valor promedio del voltaje $V_{L_{max}}$ en función de la energía E , el cual está dado por:

$$V_{L_{max}} = [(743.86 \pm 3.78)\text{V}] E / \text{keV} - (3.15 \pm 12.34)\text{V} \quad (4.6)$$

La relación (4.6) se puede utilizar como referencia para calcular los valores iniciales del voltaje aplicado a las lentes Einzel por cada keV de energía.

4.2 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES

Utilizando las relaciones de optimización entre el voltaje V_{Lmax} aplicado a las lentes y la energía E de aceleración (ecs. 4.1 - 4.5), se calcularon los valores del voltaje V_{Lmax} para los cuales se tiene un haz de iones enfocado, para todas las energías y las presiones del presente trabajo. A partir de estos valores de referencia obtenidos experimentalmente, se ajustaron nuevamente en el sistema experimental, los valores del voltaje correspondientes a cada energía y cada presión, para comenzar a medir la corriente iónica I en función de la corriente del imán I_m , en un intervalo de 0 a 2.2 ± 0.05 A. A los valores experimentales del voltaje obtenidos de las relaciones de optimización, se les denota ahora como V_{exp1} , y a los valores experimentales del voltaje que se ajustan a partir de los primeros se les indica como V_{exp2} . Se presentan las tablas que muestran el valor de la corriente del imán I_m , para la cual la corriente iónica I es máxima, esto es, la optimización del haz de iones.

4.2.1 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 65 \pm 2.5$ μ Hg

La tabla 4.6 muestra los valores de la energía E de aceleración, del voltaje V_{exp1} que se obtuvo de la relación de optimización (4.1), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente para el enfoque del haz, de la corriente I_m del imán para la cual se maximiza la corriente iónica, y de la corriente óptima I_{opt} .

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{exp1} \pm 11.6$ (V)	$V_{exp2} \pm 1$ (V)	$I_m \pm 0.05$ (A)	$I_{opt} \pm 0.005$ (nA)
1.0	727.78	735	1.2	0.41
1.5	1090.28	1100	1.2	0.42
2.0	1452.78	1500	1.2	0.45
2.5	1815.28	1850	1.2	0.51
3.0	2177.78	2160	1.2	0.57
3.5	2540.28	2540	1.3	0.60
4.0	2902.78	2900	1.3	0.65
4.5	3262.28	3250	1.3	0.67
5.0	3627.78	3620	1.3	0.80

$P = 65 \pm 2.5$ μ Hg

Tabla 4.6 Se muestran los valores de la energía E , del voltaje V_{exp1} obtenido de la relación de optimización (4.1), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente, de la corriente del imán I_m para la cual la corriente iónica fue máxima, y de la corriente óptima I_{opt} .

De la tabla 4.6 se observa que para el intervalo de 1.0 a 3.0 ± 0.01 keV, la corriente iónica se optimiza si la corriente del imán I_m es igual a 1.2 ± 0.05 A. Mientras que para el intervalo de 3.5 a 5.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.3 ± 0.05 A.

4.2.2 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 70 \pm 2.5$ μ Hg

La tabla 4.7 muestra los valores de la energía E de aceleración, del voltaje V_{exp1} que se obtuvo de la relación de optimización (4.2), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente para el enfoque del haz, de la corriente I_m del imán para la cual se maximiza la corriente iónica, y de la corriente óptima I_{opt} .

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{exp1} \pm 10.3$ (V)	$V_{exp2} \pm 1$ (V)	$I_m \pm 0.05$ (A)	$I_{opt} \pm 0.005$ (nA)
1.0	808.22	800	1.1	0.41
1.5	1196.72	1200	1.2	0.46
2.0	1585.22	1600	1.2	0.51
2.5	1973.72	1950	1.2	0.48
3.0	2362.22	2350	1.2	0.60
3.5	2750.72	2750	1.2	0.64
4.0	3139.22	3130	1.2	0.68
4.5	3527.72	3520	1.3	0.74
5.0	3916.22	3900	1.3	0.78
$P = 70 \pm 2.5 \mu$ Hg				

Tabla 4.7 Se muestran los valores de la energía E , del voltaje V_{exp1} obtenido de la relación de optimización (4.2), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente, de la corriente del imán I_m para la cual la corriente iónica fue máxima, y de la corriente óptima I_{opt}

De la tabla 4.7 se observa que para el valor de 1.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.1 ± 0.05 A. Para los valores de 1.5 a 4.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.2 ± 0.05 A. Por último, para los valores de 4.5 y 5.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si I_m es igual a 1.3 ± 0.05 A.

4.2.3 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.8 muestra los valores de la energía E de aceleración, del voltaje V_{exp1} que se obtuvo de la relación de optimización (4.3), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente para el enfoque del haz, de la corriente I_m del imán para la cual se maximiza la corriente iónica, y de la corriente óptima I_{opt}

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{\text{exp1}} \pm 13.7$ (V)	$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	$I_m \pm 0.05$ (A)	$I_{\text{opt}} \pm 0.005$ (nA)
1.0	714.44	715	1.2	0.45
1.5	1071.94	1050	1.2	0.49
2.0	1429.44	1400	1.2	0.59
2.5	1786.94	1750	1.2	0.65
3.0	2144.44	2150	1.2	0.71
3.5	2501.94	2500	1.2	0.78
4.0	2859.44	2850	1.2	0.84
4.5	3216.94	3200	1.3	0.79
5.0	3574.44	3550	1.3	1.01

$P = 75 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

Tabla 4.8 Se muestran los valores de la energía E , del voltaje V_{exp1} obtenido de la relación de optimización (4.3), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente, de la corriente del imán I_m para la cual la corriente iónica fue máxima, y de la corriente óptima I_{opt}

De la tabla 4.8 se observa que para el rango de 1.0 a 4.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.2 ± 0.05 A. Para los valores de 4.5 y 5.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.3 ± 0.05 A.

4.2.4 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.9 muestra los valores de la energía E de aceleración, del voltaje V_{exp1} que se obtuvo de la relación de optimización (4.4), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente para el enfoque del haz, de la corriente I_m del imán para la cual se maximiza la corriente iónica, y de la corriente óptima I_{opt}

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{\text{exp1}} \pm 9.1$ (V)	$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	$I_m \pm 0.05$ (A)	$I_{\text{opt}} \pm 0.005$ (nA)
1.0	758.66	760	1.1	0.72
1.5	1151.50	1200	1.1	0.91
2.0	1544.33	1550	1.1	0.95
2.5	1937.16	1950	1.2	0.84
3.0	2330.00	2340	1.2	0.86
3.5	2722.83	2750	1.2	0.89
4.0	3115.66	3110	1.3	0.94
4.5	3508.50	3500	1.3	0.99
5.0	3901.33	3900	1.3	1.07
$P = 80 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$				

Tabla 4.9 Se muestran los valores de la energía E , del voltaje V_{exp1} obtenido de la relación de optimización (4.4), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente, de la corriente del imán I_m para la cual la corriente iónica fue máxima, y de la corriente óptima I_{opt}

De la tabla 4.9 se observa que para los valores de 1.0 a 2.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.1 ± 0.05 A. Para los valores de 2.5 a 3.5 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.2 ± 0.05 A. Por último, para los valores de 4.0 a 5.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si I_m es igual a 1.3 ± 0.05 A.

4.2.5 OPTIMIZACIÓN DEL HAZ DE IONES PARA $P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

La tabla 4.10 muestra los valores de la energía E de aceleración, del voltaje V_{exp1} que se obtuvo de la relación de optimización (4.5), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente para el enfoque del haz, de la corriente I_m del imán para la cual se maximiza la corriente iónica, y de la corriente óptima I_{opt}

$E \pm 0.01$ (keV)	$V_{\text{exp1}} \pm 8.2$ (V)	$V_{\text{exp2}} \pm 1$ (V)	$I_m \pm 0.05$ (A)	$I_{\text{opt}} \pm 0.005$ (nA)
1.0	694.44	700	1.2	0.69
1.5	1052.77	1100	1.2	0.73
2.0	1411.11	1400	1.2	0.79
2.5	1769.44	1750	1.2	0.87
3.0	2127.77	2110	1.2	0.97
3.5	2486.11	2450	1.2	0.95
4.0	2844.44	2850	1.2	1.16
4.5	3202.77	3200	1.3	1.25
5.0	3561.11	3550	1.3	1.37

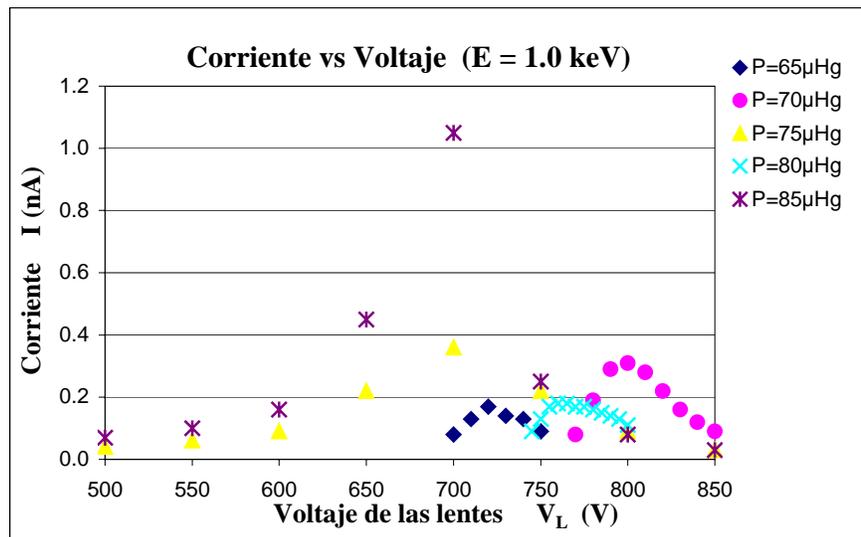
$P = 85 \pm 2.5 \mu\text{Hg}$

Tabla 4.10 Se muestran los valores de la energía E , del voltaje V_{exp1} obtenido de la relación de optimización (4.5), del voltaje V_{exp2} que se ajustó experimentalmente, de la corriente del imán I_m para la cual la corriente iónica fue máxima, y de la corriente óptima I_{opt}

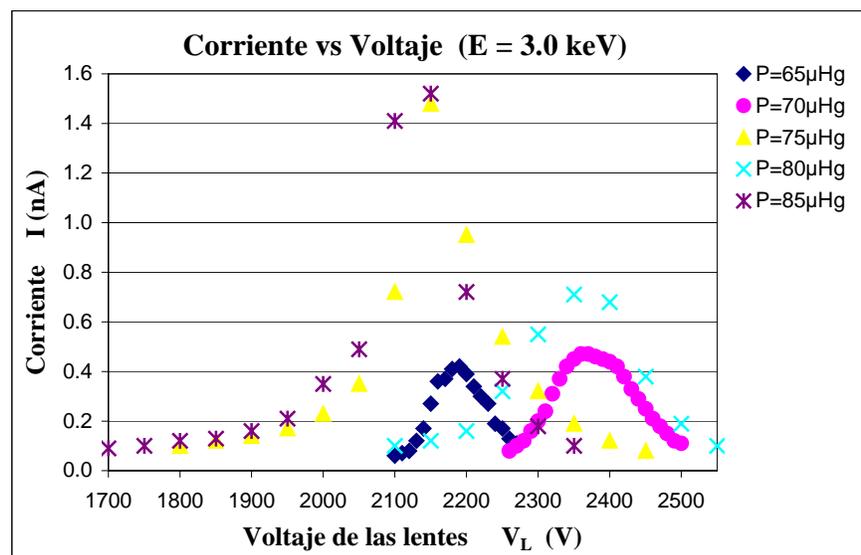
De la tabla 4.10 se observa que para el rango de 1.0 a 4.0 ± 0.01 keV, la corriente iónica se optimiza si la corriente del imán I_m es igual a 1.2 ± 0.05 A. Mientras que para los valores de 4.5 y 5.0 ± 0.01 keV, la corriente es óptima si la corriente del imán I_m es igual a 1.3 ± 0.05 A.

4.3 COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE ENERGÍA PARA PARA $E = 1.0, 3.0$ y 5.0 ± 0.01 keV

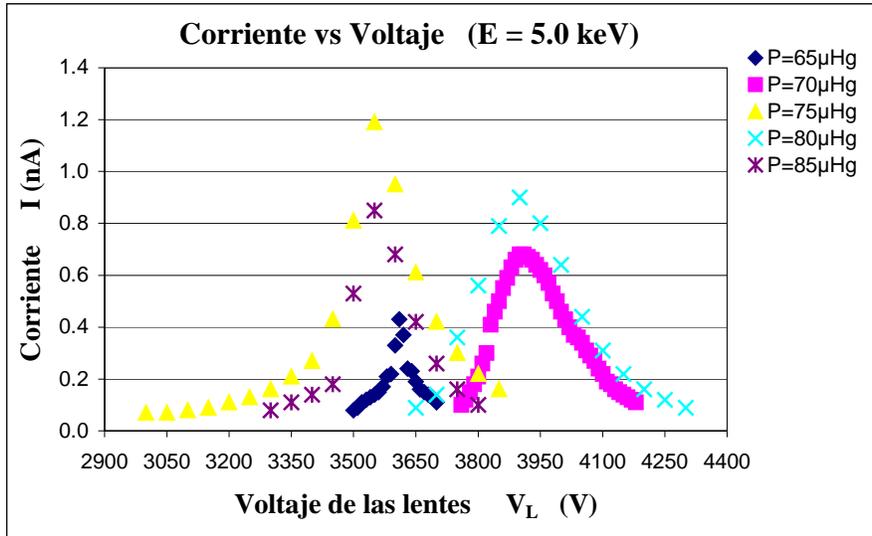
Se presentan las gráficas de las curvas de distribución de energía, para un valor fijo de la energía E ($1.0, 3.0$ y 5.0 ± 0.01 keV) y para los valores de $P = 65, 70, 75, 80$ y 85 ± 2.5 μHg .



Gráfica 4.6 Corriente de iones I en función del voltaje V_L para una energía $E = 1.0 \pm 0.01$ keV y para los valores de presión $P = 65, 70, 75, 80$ y 85 ± 2.5 μHg .



Gráfica 4.7 Corriente de iones I en función del voltaje V_L para una energía $E = 3.0 \pm 0.01$ keV y para los valores de presión $P = 65, 70, 75, 80$ y 85 ± 2.5 μHg .



Gráfica 4.8 Corriente de iones I en función del voltaje V_L para una energía $E = 5.0 \pm 0.01$ keV y para los valores de presión $P = 65, 70, 75, 80$ y 85 ± 2.5 μHg .

En cada caso, se observa que los máximos de cada curva para una energía dada no coinciden, aún cuando se esperaría que esto fuera así, ya que el enfoque del haz de iones, en principio, sólo depende de los valores de la energía E de aceleración y de los valores del voltaje V_L aplicado a las lentes, y no de la presión del gas dentro de la fuente.

Sin embargo, puede observarse que el desplazamiento de los máximos a lo largo del eje del voltaje V_L , presenta una regularidad para los tres valores de la energía. Esto es, para las curvas con $P = 75$ y 85 ± 2.5 μHg , sus valores máximos coinciden para el valor del voltaje V_L , aún cuando la intensidad de la corriente de iones es diferente.

Después, el máximo que se desplaza más a la derecha corresponde a la curva para $P = 65 \pm 2.5$ μHg . Siguiendo a lo largo del eje V_L , se tiene que el siguiente máximo corresponde a la curva para $P = 80 \pm 2.5$ μHg , y finalmente, el máximo que está más a la derecha es para la curva con $P = 70 \pm 2.5$ μHg .

CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones acerca de los resultados obtenidos para la optimización de las lentes Einzel y para la optimización del haz de iones. Estas conclusiones se resumen de la siguiente manera:

1. Existe una relación lineal entre la energía E de aceleración de los iones y el voltaje V_{Lmax} que se aplica al segundo electrodo de las lentes Einzel, para cualquiera de los valores de la presión del gas O_2 dentro de la fuente de iones, en el intervalo de 65 a 85 ± 2.5 μHg . De las cinco relaciones de optimización para las lentes Einzel que se obtuvieron, el valor promedio del voltaje es $V_{Lmax} = [(743.86 \pm 3.78) V] E / \text{keV} - (3.15 \pm 12.34) V$ por cada keV de energía E de aceleración. Esto nos indica que los resultados obtenidos no dependen de la presión del gas dentro de la fuente de iones. Aun cuando este resultado se obtuvo para un haz de iones O^+ , se puede utilizar como valor de referencia para enfocar otro tipo de iones.
2. La corriente óptima I_{opt} (la de mayor intensidad) depende tanto de los valores de la energía E de aceleración de los iones, del voltaje V_{Lmax} aplicado a las lentes Einzel y de la corriente del imán I_m en el filtro de velocidades. Para todos los casos estudiados, la corriente del imán que optimiza el haz está en el intervalo de 1.1 a 1.3 ± 0.05 A . Por lo tanto, la optimización del sistema experimental (fuente de iones, lentes Einzel y filtro de velocidades) requiere del ajuste de los tres parámetros anteriores.
3. Las variaciones que se observan en el comportamiento de las curvas de distribución de energía se deben en parte al desgaste físico del filamento, y a los errores inherentes al proceso de medición de los parámetros involucrados. Pero finalmente, los resultados obtenidos permiten tener una idea clara del proceso de optimización y de los valores que deben esperarse según la experiencia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Nasser, **Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics**, John Wiley & Sons, 1971
- [2] H. V. Boening, **Plasma Science and Technology**, Cornell University Press, 1982
- [3] A. Von Engel, **Ionized Gases**, American Institute of Physics, 1994
- [4] L. Vályi, **Atom and ion sources**, John Wiley & Sons, 1977
- [5] A. Guthrie, **Vacuum Technology**, John Wiley & Sons, 1963
- [6] J. F. O'Hanlon, **A User's Guide to Vacuum Technology**, John Wiley & Sons, 1980
- [7] L. Artsimóvich y S. Lukiánov, **Movimiento de las partículas cargadas en los campos eléctricos y magnéticos**, Ed. Mir, 1974
- [8] V.E. Cosslett, **Introduction to electron optics (The production, propagation and focusing of electron beams)**, Oxford, 1950
- [9] E. Harting and F.H. Read, **Electrostatic lenses**, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976
- [10] L. Wahlin, *Nuclear Instruments and Methods*, 27(1), 1964
- [11] H. Cherkani-Hassani, Ds Belic, J Jureta y P De France, *Journal of Physics B*, 39(24), 2006
- [12] Colutron Research Corporation, **Manual Técnico del cañón de iones Colutron**, 2006
- [13] E. Pérez, **Un estudio de fuentes de iones para gases y sólidos (Tesis de Licenciatura)**, Facultad de Ciencias, UNAM, 1975
- [14] H. Martínez Valencia, **Formación de H^- mediante doble captura electrónica del H_2^+ en vapores de magnesio (Tesis de Licenciatura)**, Facultad de Ciencias, UNAM,

[15] R. C. Weast (ed), **CRC Handbook of Chemistry and Physics**, Cleaveland, CRC, 1977

[16] A. Beiser, **Concepts of Modern Physics**, Mc Graw-Hill, 2002

[17] B.H. Bransden, **Charge Exchange and the theory of ion-atom collisions**, Oxford, 1992