



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE
UN ACELERADOR DE PARTÍCULAS TIPO
“MICROTRÓN”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

HECTOR DIEGO ESTRADA LUGO

DIRECTOR DE TESIS:

LIC. SAÚL AGUILAR SALAZAR

MÉXICO D.F. 2014





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.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Estrada

Lugo

Hector Diego

55 38 79 35 54

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

408099642

2. Datos del tutor

Lic

Saúl

Aguilar

Salazar

3. Datos del sinodal 1

Dr

Arturo Alejandro

Menchaca

Rocha

4. Datos del sinodal 2

M en C

José Guadalupe

Bañuelos

Muñetón

5. Datos del sinodal 3

Fís

Luis

Flores

Morales

6. Datos del sinodal 4

Fís

René

Ortega

Alvarado

7. Datos del trabajo escrito

Diseño y construcción de prototipo de un acelerador de partículas tipo "Microtrón"

88p

2014

Agradezco...

A mis padres, Felipe Estrada y Verónica Lugo. A quienes debo todo lo que soy y agradezco a la vida por tenerlos.

A mis hermanas. Que siempre están conmigo en las buenas y en las malas y sé que siempre puedo contar con ellas.

A Leyla, mi musa, mi todo...

Porque su cariño, comprensión y apoyo han detonado en mí, la fortaleza y el coraje para luchar por mis sueños y objetivos.

A mis amigos y compañeros de la carrera, con quienes he compartido momentos que de alguna u otra forma me han alentado a seguir adelante.

A mi tutor de tesis, el Lic. Saúl Aguilar Salazar, por su apoyo incondicional para llevar a cabo mis inquietudes académicas, que han surgido al darme la oportunidad de entrecruzar el fascinante mundo de la investigación en el Instituto de Física.

Al Dr. Arturo Alejandro Menchaca Rocha, por aceptar ser parte de mi jurado y de este proyecto. Su invaluable apoyo hizo posible la realización de este trabajo. Por darme un lugar dentro de su grupo de trabajo, el cual, me ha permitido vislumbrar y aspirar al que hacer de un investigador científico. Mi más sincera admiración y gratitud.

Al Fís. Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez, por su disponibilidad y su generosa ayuda. Por la enseñanza de Técnicas de Vacío. Por darme el soporte para operar instrumentos que se volvieron necesarios durante el proceso de construcción, experimentación y medición. Por abrirme las puertas del Laboratorio de Alto Vacío en el Instituto de Física, para realizar las caracterizaciones de filamentos, corrientes termiónicas y campos magnéticos. Por los consejos brindados a lo largo de todo el tiempo que ha llevado la realización de esta Tesis.

Al Dr. Vartlen Grabsky cuyo ingenio y conocimiento dio la pauta para la realización de este trabajo.

A los sinodales asignados para la revisión de este trabajo, sus observaciones y consejos fueron de gran importancia para el mejoramiento del mismo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias por ser las instituciones que han marcado mi vida académica y personal. Sus valores y principios porto con orgullo.

Gracias.

Si la montaña no se encorva, vamos a construir un camino a su alrededor. Si el camino no tuerce, cambiaremos la ruta. En caso de no poder transformar a otros alteraremos la mentalidad.

Aforismos de Sabiduría.

RESUMEN.	I
OBJETIVOS.	II
INTRODUCCIÓN.	III
CAPÍTULO 1. COMPORTAMIENTO DE PARTÍCULAS CARGADAS EN UN CAMPO DE FUERZAS.	1
Campo de Fuerzas.	1
1.1. Cargas Eléctricas y Partículas Cargadas.....	2
1.2. Campo Eléctrico.	3
1.3. Campo Magnético.	8
1.4. La Fuerza de Lorentz.	10
1.5. Interacción de las Partículas Cargadas con Campo Eléctrico y Campo Magnético.....	12
1.6. El Microtrón, una Aplicación Directa de los Campos de Fuerzas.	12
CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL ACCELERADOR DE ELECTRONES TIPO MICROTRÓN.	15
2.1. Disposición del Campo Magnético.	17
2.2. Sistema de Vacío.	18
2.2.1. Niveles y Tipos de Vacío.	18
2.2.2. Bombas de Vacío.	19
2.2.3. Evaporación y Desgasificación de Materiales.	21
2.2.4. Limpieza de Materiales.	22
2.2.5. Camino Libre Medio.	23
2.3. Cañón de Electrones.....	24
2.3.1. Electrodo y Otros Componentes.	24
2.3.2. Emisión Termoiónica.	25
2.4. Control del Voltaje.	28
2.4.1. Descargas Eléctricas.	28
2.4.2. Ley de Paschen.	29
2.5. Sistema de Aceleración.	30
2.5.1. Ganancia de Energía por Órbita.	32
2.6. Receptor de Electrones (Canal de Extracción).	34
CAPÍTULO 3. TRABAJO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE MICROTRÓN.	35
3.1. Distribución de Campo Magnético en Imanes Permanentes.....	35
3.1.1. Sensor de Efecto Hall.....	35
3.1.2. Caracterización de Campo Magnético de Diferentes Arreglos Experimentales.	37

3.2. Vacío.....	37
3.2.1. Bombas de Vacío.....	37
3.2.2. Cámaras de Vacío.....	38
3.3. Cañón de Electrones.....	41
3.3.1. Tubo de Acrílico.....	41
3.3.2. Cinescopio.....	42
3.3.3. Cañón de Electrones en Cámara de Aluminio.....	44
3.4. Obtención y Caracterización de Corriente de Electrones Termoiónicos en Cámara de 10 cm de Diámetro.....	45
3.5. Prototipo de Acelerador de Electrones con Cámara de Vacío de Acrílico.....	47
CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
4.1. Campo Magnético.....	55
4.1.1. Medición Directa Sobre Imán.....	55
4.1.2. Medición del Campo en un Solo Imán con Placa de Acrílico.....	56
4.1.3. Medición del Campo en el Gap de 2 Imanes sin Placa de Acrílico.....	57
4.1.4. Medición del Campo magnético en el Gap de 2 Imanes con Placa de Acrílico.....	58
4.1.5. Análisis y Discusión de los Datos.....	58
4.3. Cañón de Electrones.....	59
4.3.1. Tubo de Acrílico.....	59
4.3.2. Tubo de Rayos Catódicos (Cinescopio).....	60
4.4. Cañón de Electrones en Cámara de Aluminio.....	60
4.5. Obtención y Caracterización de Corriente de Electrones Termoiónicos en Cámara de 10 cm de Diámetro.....	61
4.5.1. Medición de la Corriente en Cubo de Cobre.....	61
4.5.2. Mediciones de Corriente en Cilindro de Cobre sin Tapa Trasera.....	62
4.5.3. Mediciones de Haz Corriente Colimado Sobre Placa de Cobre.....	62
4.5.4. Mediciones de Corriente con Cilindro Cerrado.....	64
4.5.5. Análisis y Discusión de los Datos.....	66
4.6. Prototipo de Acelerador de Electrones.....	67
4.6.1. Análisis y Discusión de los Datos.....	69
4.2. Vacío.....	71
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA MEJORAR EL DISEÑO.....	73
REFERENCIAS.....	77

En el presente trabajo de tesis se describe el funcionamiento de un acelerador de partículas tipo Microtrón, se analizan los principios físicos con los cuales se pueden describir las trayectorias que siguen los electrones dentro del acelerador. A partir de la aplicación de las ecuaciones que provienen de dichos principios, se realizaron pruebas a los distintos componentes del Microtrón en cámaras de vacío de distintos tamaños y configuraciones, construidas en el laboratorio. También se utilizaron sistemas de vacío de distintas capacidades, para asegurar un camino libre medio adecuado para permitir el movimiento de los electrones dentro del mismo. Para utilizar la corriente de electrones termoiónicos más alta, se trabajó sobre el desempeño de diversos filamentos de tungsteno construidos igualmente en el laboratorio, los cuales fungen como fuente de electrones dentro del acelerador. Se analizó teóricamente el campo magnético necesario para curvar las trayectorias de los electrones. También se caracterizó experimentalmente el campo que proveían los imanes de ferrita, para saber su magnitud y encontrar si la región donde el éste era uniforme era adecuada para acelerar a los electrones. La construcción del sensor de efecto Hall necesario para realizar éste análisis también se describe en ésta Tesis. Se examinó el comportamiento del alto voltaje dentro de los diversos sistemas de vacío para hacer una comparación con las curvas de Paschen. Esto, para saber en qué condiciones aparecen las descargas disruptivas que ionizan el gas residual dentro de la cámara de vacío, pues interfieren con las mediciones de corriente termoiónica registradas en el canal de extracción.

Se reportan los resultados obtenidos en las caracterizaciones de cada uno de estos componentes del Microtrón y, por último, se proponen mejoras en el diseño del acelerador, basadas en los datos obtenidos a partir de la caracterización de los equipos y materiales disponibles. Las mediciones del voltaje para extraer electrones térmicos de un filamento, el alto voltaje suministrado por la fuente y las mediciones del campo magnético de los imanes, permiten ahora predecir: la velocidad inicial de los electrones, la ganancia de energía por órbita y los radios en cada una de ellas. Con esta información es posible tener una estimación realista de las condiciones que se requieren para garantizar el mínimo camino libre medio que permita a los electrones llegar al canal de extracción. Todo ello, permitirá en un futuro construir un prototipo funcional del Microtrón con dispositivos que no necesariamente deben tener un alto costo.

OBJETIVOS.

-Mostrar y justificar la teoría que rige el movimiento de partículas cargadas dentro de campos electromagnéticos, como principio de funcionamiento de un acelerador de partículas tipo Microtrón.

-Diseñar los instrumentos necesarios para construir un prototipo de un acelerador de electrones.

-Exponer el funcionamiento de cada uno de los componentes del Microtrón por separado y experimentar variaciones que permitan tener una mayor eficiencia en los parámetros medidos.

-Proporcionar una aproximación de un diseño funcional de un Microtrón, tomando como base la teoría analizada y los resultados obtenidos en los experimentos realizados. Los resultados ayudarán a tener una forma más didáctica de comprender los principios de funcionamiento de los aceleradores de partículas como el Microtrón o el Ciclotrón, los cuales también son usados para acelerar diversos tipos de partículas cargadas mediante trayectorias cíclicas.

-Ser la pauta para continuar con este tipo de experimentos que permitan involucrar a investigadores y alumnos en la construcción de aceleradores de partículas para múltiples experimentos.

Con el paso del tiempo y de los avances en la Física, ha surgido la necesidad de obtener partículas atómicas o subatómicas con mayor cantidad de energía cinética para estudiar las interacciones entre este tipo de corpúsculos a muy altas energías, y así poder entender los efectos que tienen sobre la estructura de la materia, y después, aprovechar estos conocimientos para el desarrollo de nuevas tecnologías. Es por esto, que la implementación de aceleradores de partículas, tanto lineales como cíclicos, al avance de la investigación científica ha sido de suma importancia. Esto, en función de las aplicaciones que tenga dicho acelerador y la energía que se necesite imprimir a las partículas, que puede ir desde cientos hasta millones de electrón-volts (eV).

El diseño de los aceleradores como el Microtrón, tiene sus fundamentos en la teoría dada por las leyes de Newton, campos electromagnéticos y movimiento circular. Lo anterior, permite clarificar los conceptos que rigen a estos aparatos, abriendo la posibilidad a que estudiantes de diversos grados académicos participen en su elaboración y operación, para que, posteriormente, los resultados sean estudiados más a fondo con teorías más complejas que impulsen su desarrollo.

CAPÍTULO 1. COMPORTAMIENTO DE PARTÍCULAS CARGADAS EN UN CAMPO DE FUERZAS.

Campo de Fuerzas.

Una magnitud física da lugar a un *Campo* cuando está definida en todo el espacio, es decir, si a cada magnitud en cualquier punto del espacio en que está determinado el campo se le puede asociar un valor. Para facilitar su interpretación se utilizan líneas imaginarias llamadas *líneas de campo*, que pueden expresar la intensidad, dirección y distribución del campo. Por otro lado, dicho campo se puede catalogar dependiendo del tipo de magnitud que se esté tratando. De acuerdo a esto, se tiene la siguiente clasificación:

Campo escalar: Es aquél que está definido por una magnitud escalar (un número) en cualquier parte del espacio. La representación gráfica de este campo se hace por medio de *superficies de nivel* o *superficies equipotenciales* que, como su nombre lo dice, corresponden a una misma cantidad llamada potencial, y así se puede vislumbrar el comportamiento de este campo. Los campos de temperatura, de presión, de altura respecto al nivel del mar, entre otros ejemplos, son considerados campos escalares, y su descripción se hace por medio de superficies equipotenciales.

Campo vectorial: Está definido por una magnitud vectorial (cantidad con un módulo, dirección y sentido asociado) y se representa por medio de *líneas de fuerza*, que son líneas trazadas de acuerdo a vectores que representan el campo y tienen las siguientes propiedades: son tangentes a la dirección del campo y no pueden cortarse en ningún punto, de lo contrario, significaría que para el punto de intersección existen 2 valores del mismo campo; el número de líneas por unidad de área a través de una superficie perpendicular a dichas líneas es proporcional a la magnitud del campo en esa región, por lo tanto si la densidad de líneas es mayor, significa que el campo en esa región es más intenso que donde la densidad de líneas es menor. Algunos ejemplos de campos vectoriales son los campos eléctrico, magnético y gravitatorio, velocidad de un fluido. (Resnick, 1999)

La interacción que existe entre partículas separadas una cierta distancia y que físicamente no se tocan para poder interactuar, se puede describir mediante el concepto de *Campo de Fuerzas*. Es decir, cada partícula tiene asociado un campo distribuido en el espacio de tal forma que las líneas de fuerza la rodean completamente y existe cierta fuerza que actúa sobre cada una de las otras

partículas que se encuentren dentro de ese campo dando lugar a la interacción entre las mismas. El campo de fuerzas además puede ser un campo del tipo conservativo o no conservativo. Será conservativo cuando el trabajo que se requiere para desplazar una partícula de un punto a otro dentro del campo, sea independiente de la trayectoria que ésta siga, debido al principio de conservación de la energía. Cuando no se cumple la condición y el trabajo dependa de la trayectoria de la partícula se tratará de un campo no conservativo. Entonces, de acuerdo a esto, el campo eléctrico es un campo conservativo, mientras que el campo magnético es un campo no conservativo. Por otra parte los campos también pueden ser clasificados de acuerdo a su variación en el tiempo como estáticos o variables en el tiempo y cuya representación matemática está dada por una función $F(x,y,z)$ o $F(x,y,z,t)$ respectivamente.

Los campos de fuerzas, surgen conceptualmente para poder explicar la interacción entre cuerpos donde no existe ningún contacto físico, si no que se dan como acciones a distancia de tal forma que los campos de fuerzas actúan como intermediarios en tales interacciones. Lo anterior ha sido aprovechado para manipular, por ejemplo, partículas cargadas por medio de los campos eléctricos y magnéticos, y ha permitido el desarrollo de los aceleradores de partículas como aplicación de los mismos.

1.1. Cargas Eléctricas y Partículas Cargadas.

Una carga eléctrica es una cualidad de ciertas partículas que les permite crear campos de fuerza para poder interactuar con otras que posean las mismas características. Una partícula cargada siempre tiene asociada una carga eléctrica, sin embargo una carga eléctrica puede estar asociada a diferentes tipos de partículas cargadas. Una propiedad fundamental de las cargas es *la conservación de la carga*, pues una carga eléctrica no puede ser creada o destruida, únicamente puede ser separada o combinada positiva o negativamente siempre en cantidades iguales de cargas. (Jefimenko, 1966).

Las interacciones causantes de la estructura tanto de átomos como de moléculas, y por consiguiente de toda la materia, son primordialmente las interacciones entre partículas con carga eléctrica, que fundamentalmente tiene 2 tipos de partículas cargadas las cuales son el electrón, y el protón; cuyas cargas eléctricas son negativa y positiva respectivamente. La carga negativa ($-e$) del electrón expresada en Coulombs (unidad que define la cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un conductor eléctrico, cuando la corriente eléctrica es constante y con magnitud de

1 Ampere [1 A] durante 1 segundo) corresponde a $e = 1.602 \times 10^{-19} C$. El protón tiene una carga de $+e$ con la misma magnitud que el electrón. (Resnick, 1999)

Cada partícula cargada (sean q_1 y q_2) está inmersa en un campo de fuerza como se mencionó en la sección anterior. Para que cuerpos de cualquier material cargado se atraigan o repelan, es necesario que actúen ciertas fuerzas cuya naturaleza fue estudiada por Charles Augustin Coulomb, quien midió con ayuda de su balanza de torsión, las atracciones y repulsiones eléctricas deduciendo la ley que las rige.

Tal como lo establece la tercera ley de Newton, la fuerza ejercida por q_1 sobre q_2 tiene la misma magnitud pero dirección opuesta a la fuerza ejercida por q_2 sobre q_1 , a pesar de que la magnitud de las cargas puede ser distinta. A partir de los experimentos realizados por Coulomb y por otros colegas de su época, se llegó a la conclusión de que la fuerza entre cargas está determinada de la siguiente forma:

$$\vec{F}_{12} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \hat{r}_{12} \quad (1.1)$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Coulomb, en la cual existe una constante $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, llamada la constante de Coulomb cuyo valor es igual a $8.99 \times 10^9 N \cdot \frac{m^2}{C^2}$, por la constante de permitividad eléctrica ϵ_0 que es igual a $8.8541878 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N} \cdot m^2$. La ecuación 1.1 corresponde a una magnitud vectorial por lo que la fuerza está representada como un vector en la dirección del vector unitario \hat{r} que va de la carga q_1 a la carga q_2 . Al ser esta fuerza una magnitud vectorial quiere decir que actúa dentro de un campo de fuerza vectorial que, de hecho, surge como resultado de la interacción de cada carga en el campo de fuerza de la otra. Este campo de fuerza vectorial es el Campo eléctrico. (Griffiths, 1999)

1.2. Campo Eléctrico.

Un campo eléctrico está definido como una región del espacio que envuelve completamente a una partícula cargada, y que en cada punto de tal campo actúa una fuerza de origen eléctrico.

Como se mencionó en la sección anterior, toda partícula cargada tiene asociado un campo eléctrico que la rodea completamente. Si se tiene una carga positiva y de magnitud q_0 (llamada carga prueba) que entra en contacto con dicho campo, el enunciado anterior establece que habrá una fuerza eléctrica que actuará sobre tal carga, y la magnitud resultante del campo eléctrico de la

primera partícula q es el cociente de la magnitud de la fuerza eléctrica entre la de la carga q_0 . Debido a que la fuerza es un vector, entonces el campo eléctrico también es un vector y se puede expresar de la forma siguiente:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_0} \quad (1.2)$$

Como se puede observar en la ecuación 1.2, los vectores del campo y la fuerza eléctricos tienen la misma dirección, pues q_0 es un escalar positivo. Y las unidades del campo eléctrico serán: un Newton (debido a que son las unidades de fuerza) sobre coulomb (por ser las unidades de la carga eléctrica) [N/C]. Cabe aclarar que la fuerza que actúa sobre la carga de prueba q_0 cuando se encuentra dentro del campo eléctrico proveniente de la partícula q es la fuerza de Coulomb, por lo tanto, si la carga q_0 es lo suficientemente pequeña para no afectar la distribución uniforme del campo de q , éste será igual a:

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (1.3)$$

La polaridad de q establece la dirección de \vec{E} , es decir, que si q es positiva el campo está dirigido hacia afuera de ella. Por el contrario si q es negativa el campo está dirigido en dirección a ella. Una forma de saber la distribución del campo de la carga es colocando un grupo de cargas de prueba alrededor de la misma de tal forma que el vector \vec{E} es tangente y a partir de éste vector las líneas de campo pueden ser dibujadas con las siguientes propiedades:

- Deben ir en la dirección del campo en cualquier punto donde éste esté definido.
- Se originan en cargas positivas y terminan en cargas negativas.
- El número de líneas por unidad de área de sección transversal sea proporcional a la magnitud del campo eléctrico.
- Ningún par de líneas debe cruzarse en ningún punto.

Con esto en mente, las líneas de campo eléctrico se verían como en las figuras 1.1a y 1.1b que corresponden a interacciones entre cargas. Es importante remarcar la consideración de que en estas imágenes sólo se muestra la distribución bidimensional, pero en realidad se trata de una distribución tridimensional. La interacción entre cargas puntuales también puede ser analizada cualitativamente a través de las líneas de campo. Supóngase que se tienen 2 cargas de la misma magnitud, si las 2 cargas tienen la misma polaridad, las líneas de campo se curvarán hacia un punto donde ninguna de las líneas de una carga se toque con la de la otra, esto se puede observar en la figura 1.1a. En el caso de que las cargas tengan polaridad opuesta, sus líneas de campo se juntarán y

su distribución será como se muestra en la figura 1.1b. Cabe mencionar que el número de líneas representa la magnitud del campo.

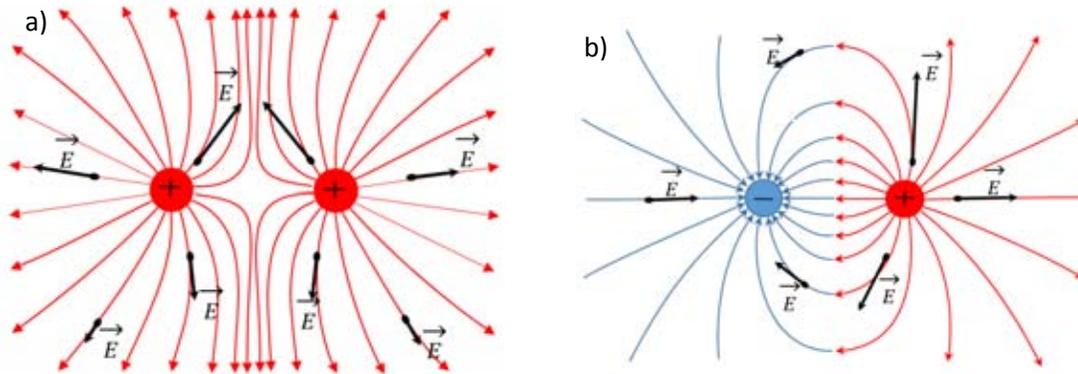


Figura 1.1. a) Líneas de campo eléctrico de cargas iguales. b) cargas diferentes. Las cargas positivas se representan en rojo y las negativas en azul, primeras siempre apuntan hacia afuera de la carga, mientras que las de la segunda siempre apuntan hacia la carga.

Así pues, es posible visualizar la distribución del campo eléctrico mediante las líneas de campo, pero es importante tomar en cuenta que estas líneas no indican las trayectorias que partículas cargadas podrían tener al interactuar con este campo ya que su movimiento estará regido por el trabajo que el campo imprime sobre tal partícula debido a la fuerza eléctrica (esta fuerza es tangencial a las líneas de campo), en otras palabras, el potencial eléctrico (V) asociado a la partícula dentro del campo eléctrico. El potencial eléctrico se define en cualquier punto del campo eléctrico como el trabajo (cantidad de fuerza realizada por la distancia recorrida [W]) que debe realizar, para desplazar a una carga (q), todas son cantidades escalares cuya expresión matemática es:

$$V = \frac{W}{q} \quad (1.4)$$

y sus unidades son $J/C=V$ y conforman un campo escalar cuya distribución puede ser descrita por las llamadas *superficies equipotenciales*. Una superficie equipotencial es una superficie tridimensional en la cual todos los puntos están a un mismo potencial eléctrico, de tal manera que si una carga prueba se moviera de un punto a otro sobre dicha superficie, su energía potencial permanecerá constante, por lo que el campo eléctrico no realizará ningún trabajo sobre tal carga. Entonces \vec{E} debe estar en dirección perpendicular a la superficie en cada punto para que la fuerza eléctrica permanezca siempre perpendicular al desplazamiento de la carga.

Las superficies equipotenciales también están regidas por ciertas reglas similares a las líneas de campo haciendo hincapié en que las líneas de campo son curvas, mientras que las equipotenciales son superficies tridimensionales, dichas reglas se mencionan a continuación:

- Las superficies equipotenciales son siempre perpendiculares a las líneas de campo en todo punto.
- Son dibujadas de manera tal, que las diferencias de potencial entre superficies adyacentes sean iguales.
- La separación entre las superficies depende de la intensidad del campo, si el campo es más intenso las equipotenciales están más cerca entre sí.
- Ningún punto puede estar en dos potenciales diferentes, por lo que las equipotenciales correspondientes a distintos potenciales, no se tocan ni intersectan. (Sears, Zemansky, & Young, 1989)

A continuación se muestran las distribuciones en dos dimensiones de las equipotenciales para el caso de un campo eléctrico alrededor de una partícula cargada donde se exponen como círculos concéntricos (figura 1.2a); así como para el caso de 2 partículas con cargas iguales donde en el centro parece que las superficies se cortan pero en realidad se trata de una sola superficie en forma de 8 (figura 1.2b); para partículas con cargas diferentes se puede ver que en el centro donde se juntan las líneas de campo de las 2 cargas existe una línea que representa una sola superficie equipotencial (con potencial $V=0$) debido a la configuración de las líneas de campo en ese punto, ya que justo aquí se anulan (figura 1.2c) y por último para el caso de 2 planos con un campo uniforme entre ellos, donde las equipotenciales son planos paralelos entre sí y perpendiculares a las líneas de campo (figura 1.2d).

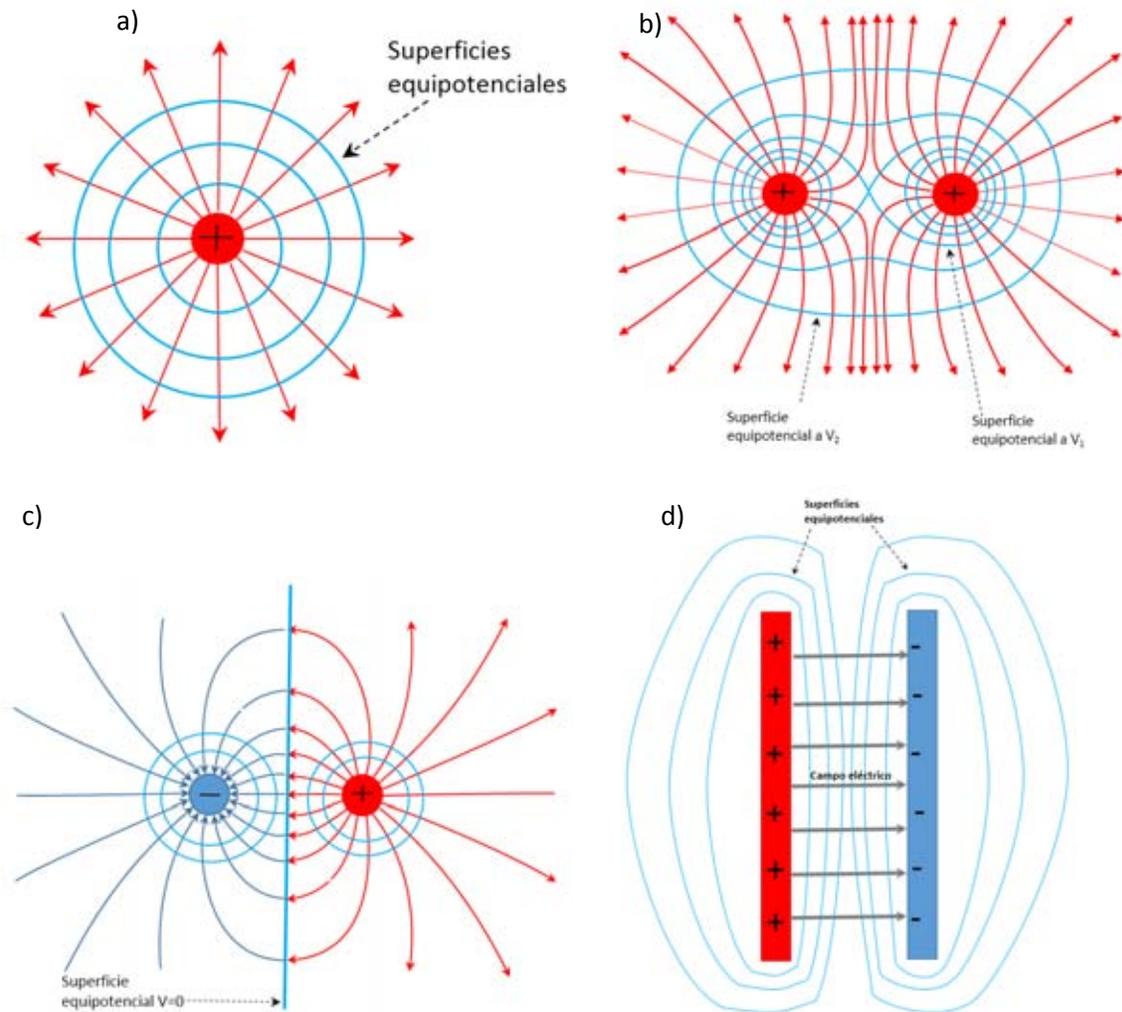


Figura 1.2. Superficies equipotenciales: a) de una carga puntual, b) de partículas con la misma carga, c) de partículas con cargas diferentes (justo en medio de ellas la equipotencial es cero), d) de placas paralelas con cargas diferentes. Nótese que en todos los casos las superficies equipotenciales que se encuentran más cerca de la partícula tienen una magnitud mayor que las que se encuentran más lejos de la misma. (Sears, Zemansky, & Young, 1989)

Es así que el campo eléctrico mediante la fuerza eléctrica permite mover partículas cargadas imprimiendo un cierto trabajo en ellas y se mueven de una superficie equipotencial a otra para poderse acelerar. Pero esta fuerza no es la única que permite tal movimiento de partículas, también existe la llamada fuerza magnética debido al campo magnético que a continuación se define.

1.3. Campo Magnético.

Existen piedras compuestas de ferrita conocidas como imanes permanentes y su comportamiento de atracción de metales se debe a que alrededor de éstos existe el llamado campo magnético (\vec{B}), que como \vec{E} , también es un campo vectorial que puede ser generado por sustancias magnéticas y también por cargas eléctricas en movimiento y puede interactuar con otras sustancias con propiedades magnéticas mediante la fuerza magnética. Debido a que \vec{B} es un campo vectorial, su distribución también puede ser representada por líneas de campo que se trazan de acuerdo a los siguientes criterios:

- Se trazan de modo que la tangente a cualquier línea determina la dirección de \vec{B} en ese punto.
- El número de líneas que cruzan perpendicularmente una región transversal es proporcional a la magnitud del campo.
- Siempre forman anillos cerrados, es decir, comienzan y terminan en el mismo cuerpo magnético, lo que implica que todo cuerpo magnético tiene al menos 2 polos que dan el origen y termino de las líneas de campo, como se puede observar en la figura 1.3. Esta es una prueba de que la existencia de los llamados monopolos magnéticos es nula.
- Debido a que la dirección de \vec{B} es única en cada punto, las líneas de campo nunca se cruzan.

La fuerza eléctrica sobre una partícula cargada es siempre paralela a las líneas de \vec{E} y apunta siempre en la dirección de las líneas de campo. Por otro lado, debido a que la fuerza magnética sobre tal partícula es siempre perpendicular a las líneas de \vec{B} , éstas nunca apuntan en la dirección de dicha fuerza por lo que no son líneas de fuerza como en el caso de \vec{E} . La figura 1.3 muestra que, las líneas de campo, mientras más en el centro de la fuente se encuentren, más rectas y paralelas son. Esto que denota que el campo es más uniforme en esa región que en la parte donde las líneas son más curvas e irregulares. Es en esa región, donde se producen los llamados efectos de borde, que después se abordarán debido a su importancia de la interacción con las partículas cargadas.

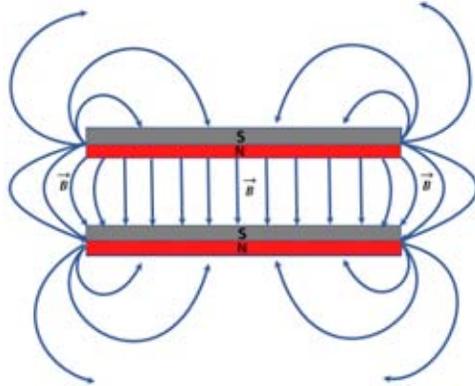


Figura 1.3. Distribución del campo magnético en imanes con los polos opuestos enfrentados. Nótese que las líneas de campo son uniformes entre los imanes, pero desordenadas fuera de los mismos.

Para definir a la fuerza magnética en un imán se utiliza, como en el caso de \vec{E} , una carga de prueba q que se moverá con una velocidad \vec{v} en la región donde \vec{B} esté determinado. Entonces la fuerza magnética dependerá de la dirección de \vec{v} con respecto a \vec{B} y de la magnitud y polarización (positiva o negativa) de la carga q . En consecuencia, la definición de la fuerza magnética se expresa como:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.5)$$

Con ésta ecuación se hacen las siguientes observaciones que, para entenderlas mejor, se sugiere observar la figura 1.4:

- Cuando una carga se mueve paralela a \vec{B} , la fuerza magnética que actúa sobre la carga es cero.
- Debido a la propiedad matemática que establece que la magnitud del producto entre dos vectores está dada como: $\vec{X} \times \vec{Y} = XY\text{sen}\phi$. Entonces la magnitud de la fuerza magnética ejercida sobre la partícula en movimiento es proporcional al seno del ángulo (ϕ) que forman el vector velocidad de la partícula y la dirección de \vec{B} y se expresa de la siguiente forma:

$$F_B = qvB\text{sen}\phi \quad (1.6)$$

- Cuando el vector velocidad forma un ángulo distinto de cero ($\phi \neq 0$) con el vector de campo magnético, la fuerza actúa en una dirección perpendicular al plano formado por los vectores \vec{v} y \vec{B} y es máxima cuando éstos vectores son ortogonales entre sí.

- La fuerza magnética ejercida sobre una carga positiva está en sentido opuesto al sentido de la fuerza magnética ejercida sobre una carga negativa que se mueve en la misma dirección y es posible predecir la dirección de la fuerza si se aplica “la regla de la mano derecha”, en caso de ser una carga negativa se utiliza la mano izquierda, debido a que, matemáticamente, el signo de la carga afecta directamente el signo de la fuerza.
- Las unidades del campo magnético en el Sistema Internacional (SI) deben ser las de $\frac{F}{q \cdot v} = [\frac{N}{C \cdot m/s}] = [T]$ donde T significa Tesla y equivale a 1000 Gauss (G) .
- A diferencia del campo eléctrico, el magnético no realiza ningún trabajo sobre la carga, \vec{B} solo puede alterar la dirección de \vec{v} pero no puede cambiar la rapidez ni la energía cinética de la carga.

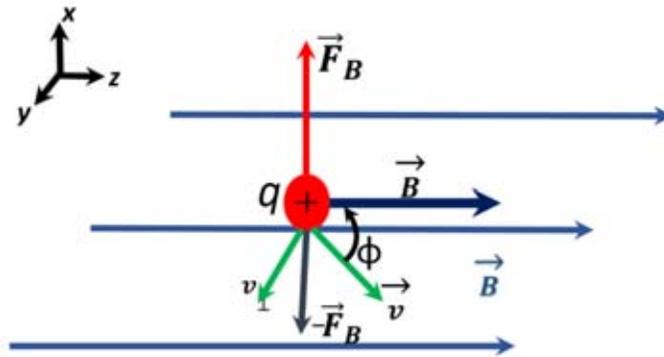


Figura 1.4. Una partícula cargada positivamente q inmersa en un campo \vec{B} , la fuerza \vec{F}_B afecta solo perpendicularmente a q que se mueve con una velocidad \vec{v} .

1.4. La Fuerza de Lorentz.

Las cargas expuestas a campos electromagnéticos se verán afectadas por las fuerzas eléctricas y magnéticas expresadas en las ecuaciones 1.2 y 1.5, respectivamente. Éstas conforman la fuerza total actuante sobre ellas es conocida como la *Fuerza de Lorentz*, la cual, se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.7)$$

De la estructura de las ecuaciones 1.2 y 1.5, se infiere que la fuerza eléctrica se trata de la misma Fuerza de Lorentz para el caso en el que $\vec{B} = 0$. Por otro lado, si $\vec{E} = 0$ se obtiene la fuerza magnética. Lo anterior, advierte que la ecuación 1.7 no describe a una clase de fuerza diferente, sino

que solo es la suma de las anteriores. Estas pueden actuar al mismo tiempo sobre una partícula cargada que se encuentre en movimiento. Por lo tanto la Fuerza de Lorentz es la relación más importante en la física de los aceleradores de partículas cargadas, ya que permite describir su movimiento en cualquier punto dentro de dicho sistema.

En un arreglo en el que el campo eléctrico se dirige hacia abajo, sobre el plano de la hoja, y el magnético apunta hacia adentro de la misma, como lo muestra la figura 1.5, es evidente que las fuerzas eléctrica y magnética intervienen en direcciones opuestas sobre una partícula cargada. Si dichas fuerzas son de la misma magnitud, la fuerza total sobre la carga será cero. Por esta razón es posible controlar la velocidad de la partícula tan solo variando los campos \vec{E} y \vec{B} de tal forma que la velocidad de la partícula solo depende de los campos mencionados como se muestra a continuación:

$$\text{Si } \vec{F}_E = q\vec{E} \text{ y } \vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Dado que las magnitudes de ambas fuerzas son iguales, se tiene que:

$$qE = qvB \tag{1.9}$$

$$v = \frac{E}{B} \tag{1.8}$$

Las trayectorias de las partículas que viajen a la velocidad que cumpla con la condición de la ecuación 1.9, pueden ser controladas solo por los campos electromagnéticos, sin importar ningún otro parámetro, teniendo así un selector de velocidad. Si la velocidad de la partícula aumenta entonces la fuerza magnética es mayor y la partícula se moverá hacia arriba. Si la velocidad es menor, la partícula se dirigirá hacia abajo debido a la fuerza eléctrica. (Resnick, 1999)

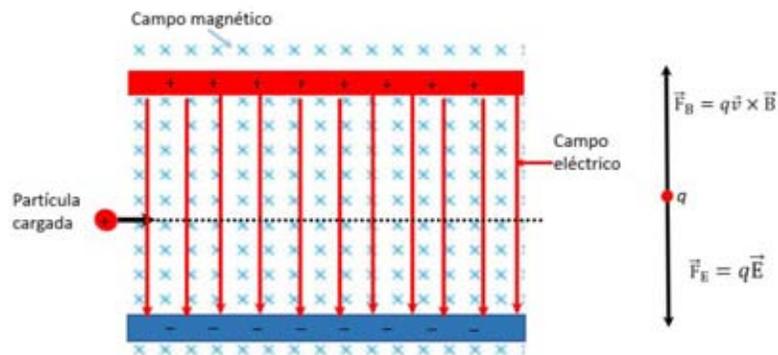


Figura 1.5. Selector de velocidad. Si las fuerzas eléctrica y magnética son iguales la partícula cargada sigue su trayectoria en línea recta.

1.5. Interacción de las Partículas Cargadas con Campo Eléctrico y Campo Magnético.

Anteriormente se definieron las fuerzas eléctrica y magnética como consecuencia de los campos \vec{E} y \vec{B} respectivamente. Ahora se describirán algunas de las características de sus interacciones con las partículas cargadas, para después entender sus aplicaciones. Primeramente la fuerza magnética depende de la magnitud, velocidad de desplazamiento de la carga así como de la intensidad de \vec{B} como se observa en la ecuación 1.6. Es decir, cualquier variación en estos parámetros afectará la acción de la fuerza sobre la partícula que debe estar en movimiento. Por ejemplo, la fuerza en una carga de 1 mC será la mitad de intensa que en una carga de 2 mC . La figura 1.4 muestra que pueden existir dos sentidos opuestos entre sí para el vector fuerza, y siempre son perpendiculares al plano que forman los vectores \vec{v} y \vec{B} . Como se había mencionado anteriormente, la fuerza eléctrica no depende de la velocidad de la carga, sin embargo, si puede alterarla e imprimirle más energía cinética debido al trabajo que realiza sobre ella, provocando que dicha carga se acelere. Sin embargo la fuerza magnética, aunque depende de la velocidad de la partícula, debido a que siempre es perpendicular al plano formado por \vec{v} y \vec{B} , no puede cambiar la magnitud de \vec{v} pero si puede cambiar su dirección y esto se cumple aunque el campo magnético no sea uniforme. Es por esto que actúa como una fuerza deflectora y las partículas inmersas en un campo magnético pueden moverse en círculos.

1.6. El Microtrón, una Aplicación Directa de los Campos de Fuerzas.

El Microtrón es un acelerador de partículas cargadas, en donde se aceleran de forma cíclica debido a la disposición del campo magnético. Como se mencionó en la unidad anterior, la fuerza de Lorentz es de suma importancia pues permite analizar la física detrás de este tipo de dispositivos. En la figura 1.6, se muestra una partícula con carga q , que se mueve con una cierta velocidad dentro de un campo magnético que apunta hacia adentro del plano de la figura. Además, existe un campo eléctrico entre los electrodos que se hallan dentro de las trayectorias que sigue la partícula, que está sometida a una fuerza eléctrica de magnitud $F=qE$. Una vez que pasa por los electrodos que se encuentran a una diferencia de potencial V , esto provoca que su velocidad aumente en cada ciclo.

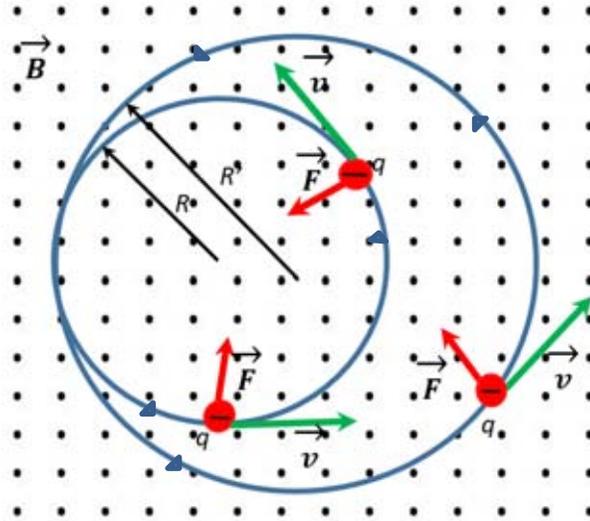


Figura 1.6. Movimiento de una partícula cargada negativamente q , dentro de un campo magnético uniforme perpendicular a sus trayectorias, los vectores de fuerza y velocidad siempre son ortogonales entre sí. R y R' son los radios de las órbitas de la partícula en un Microtrón.

Ahora bien, dado el campo magnético dispuesto como se muestra en la figura 1.6, la fuerza magnética tendrá una magnitud $F_B=qvB$ y siempre será perpendicular al vector \vec{v} , de tal forma que no puede realizar ningún trabajo de desplazamiento sobre la partícula pero curva su trayectoria provocando que viaje en círculos. La fuerza magnética además puede ser vista de la forma $F_B=ma$, donde a se refiere a la aceleración centrípeta: $a=v^2/R$, entonces igualando estas relaciones, se obtiene el radio R de la trayectoria circular descrita por la partícula:

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$

$$\therefore R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad (1.10)$$

Donde v es la velocidad que poseen las cargas, pero éste parámetro cambia dependiendo de la etapa de aceleración en la que se encuentre y vale la pena que sea analizada. En la etapa de extracción de las partículas su energía total (en Joules [J]=[Kg m²/s²]), sólo depende de la energía potencial inicial U_i que poseen antes de que sean expulsadas al sistema, ya que su energía cinética en ese momento K_i dentro del acelerador, es nula. Una vez fuera toda esa energía potencial U_f se convierte en energía cinética K_f , por lo tanto la velocidad con la que entran al sistema se deduce como sigue:

$$U_i = K_f$$

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

$$\therefore v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \quad (1.12)$$

Donde V es el voltaje (en J/C , dado que $1 V=1 J/C$) utilizado por la fuente de iones. Durante la etapa de aceleración la energía total E_T de las cargas será la suma de sus energías potencial y cinética, tomando en cuenta que la primera se refiere a la energía que se le suministra al acelerarla mediante una diferencia de potencial y la segunda representa la que ya posee debido a que está en movimiento. Esto es:

$$E_T = qV + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.11)$$

Conocer E_T permite calcular la nueva velocidad v_n a la que viaja la partícula dentro del acelerador:

$$E_T = \frac{1}{2}mv_n^2$$

$$\therefore v_n = \sqrt{\frac{2E_T}{m}} \quad (1.13)$$

Con esto se obtiene el radio de la nueva trayectoria R_n usando en la ecuación 1.10:

$$R_n = \frac{mv_n}{qB} = \sqrt{\frac{2mE_T}{q^2B^2}} \quad (1.14)$$

Cada que la partícula sea acelerada por la fuerza eléctrica ganará más velocidad y si se mantiene el campo magnético con la misma magnitud, entonces la fuerza magnética será constante. Por lo anterior, el radio de la órbita será mayor, formándose trayectorias espirales, en las que el radio de cada espira será el de la ecuación 1.14. Todas las cantidades que tienen que ver con el movimiento de la partícula dentro del acelerador se determinan con base a parámetros que se conocen por el diseño de dicho aparato. (Sears, Zemansky, & Young, 1989)

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL ACELERADOR DE ELECTRONES TIPO MICROTRÓN.

Anteriormente se ha mencionado que el acelerador de partículas tipo Microtrón, es un dispositivo en el que tales cuerpos se mueven en trayectorias circulares dentro de una cámara de vacío. Ésta se encuentra dentro de un campo magnético uniforme provisto por electroimanes cuyos polos están colocados de tal forma que uno de ellos está por encima de la cámara y el otro por debajo de la misma. Pero es importante notar que la región de vacío por la que se mueven evita que pierdan energía y se produzcan fenómenos de dispersión por las colisiones con las moléculas de aire remanente. Así mismo, como se observa en la figura 2.1, en un extremo de la cámara de vacío se encuentran tanto la fuente de iones como la cavidad aceleradora. Ésta última se encuentra a un potencial eléctrico V (*en volts*).

Inicialmente la fuente de iones inyecta las partículas a una velocidad relativamente baja. Así, estas se mueven circularmente debido al campo magnético hasta que llegan a la cavidad aceleradora, donde son aceleradas por el campo eléctrico existente dentro de la cavidad y adquieren energía igual a la carga q de la partícula por el potencial eléctrico V . Puesto que han adquirido energía cinética, las partículas siguen trayectorias circulares más grandes y regresan al punto donde se encuentra la cavidad. Cada vez que pasan por éste punto son aceleradas y ganan energía adicional qV (*si esta carga es expresada en unidades enteras de la carga elemental entonces la energía estará dada en eV*). Entonces las partículas se mueven en trayectorias más grandes hasta que eventualmente, chocan con un blanco receptor que se encuentra en otro extremo de la cámara de vacío.

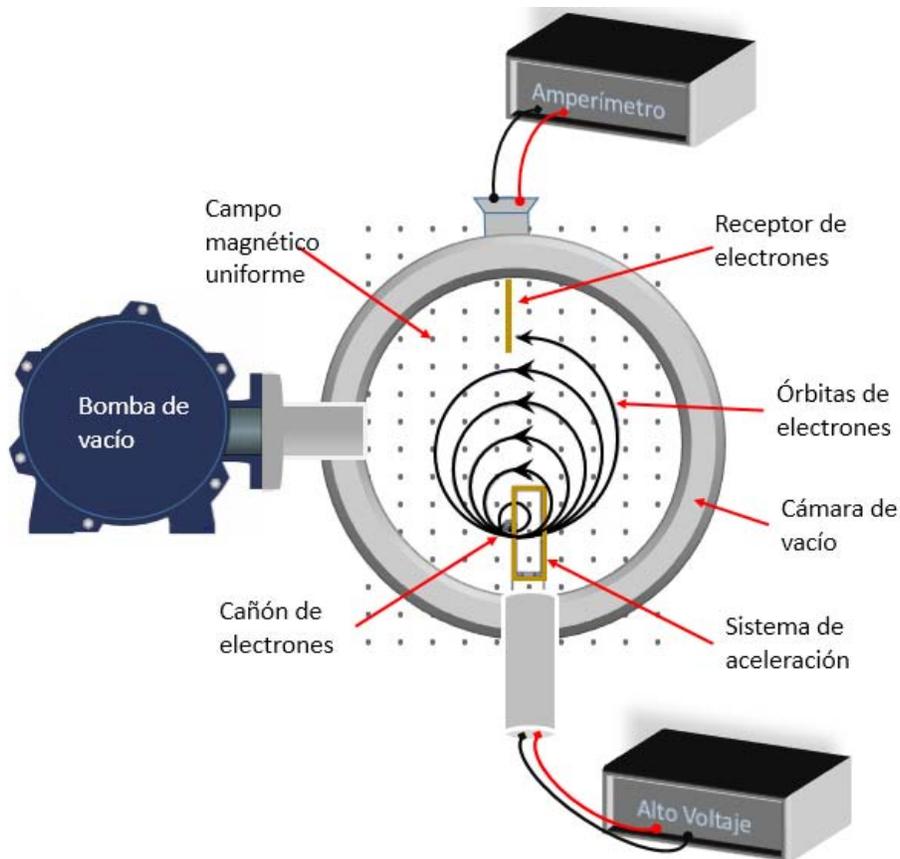


Figura 2.1. Microtrón. El campo magnético apunta hacia afuera del plano de la figura y representa la zona en la que se encuentra distribuido en el acelerador. La dirección de las trayectorias corresponden a partículas cargas negativamente como los electrones.

El diseño del Microtrón en este trabajo se hace tomando como referencia el funcionamiento de aceleradores cíclicos profesionales, pero haciendo simplificaciones en las etapas de emisión, aceleración y recolección de las partículas cargadas, que por su facilidad de obtención, se usan electrones. En este capítulo se explica el funcionamiento de cada uno de los componentes del Microtrón como son: la cámara y la bomba, que conforman el sistema de vacío, los imanes permanentes usados como fuente de campo magnético, el cañón de electrones, la cavidad aceleradora y su campo eléctrico asociado y el blanco receptor.

2.1. Disposición del Campo Magnético.

Una ventaja muy importante de los aceleradores como el Ciclotrón y el Microtrón respecto a los demás es el arreglo del campo magnético en ellos, pues es posible usar imanes permanentes o electroimanes que mantienen una sola posición. Es de suma relevancia que las trayectorias de los electrones dentro del acelerador se encuentren lo suficientemente alejadas de las orillas de los imanes, pues como se comentó en el capítulo anterior, los efectos de borde distorsionan tales trayectorias, provocando que los electrones acelerados se pierdan. Por esta razón deben realizarse pruebas que permitan saber en qué zonas del *gap* (*distancia de separación que existe entre dos componentes eléctricos o magnéticos o de algún otro tipo*) de los imanes, el campo magnético es uniforme.

Cuando se sabe la zona donde el campo magnético es uniforme, es posible conocer, mediante la utilización de la ecuación 1.14, cuál debe ser la magnitud de dicho campo para que las órbitas de los electrones tengan radios R que se encuentren dentro de tal región. En el laboratorio donde se realiza este trabajo de tesis, se cuenta con 2 imanes permanentes de ferrita de dimensiones: 10.1 cm de ancho, 15.1 cm de largo, y 1.1 cm de grosor. Por lo tanto se puede suponer que el diámetro máximo de la última trayectoria de los electrones (que salen del cañón con una energía de 6 eV) debería ser de 9 cm aproximadamente para evitar efectos de borde. Más adelante se mostrarán las mediciones de las regiones en donde el campo magnético es más uniforme, pues dichos efectos se minimizan. También se posee una fuente de alto voltaje cuyo máximo es de 3000 V (supóngase que éste es el voltaje máximo con el que se aceleran los electrones). Usando estos parámetros en la ecuación 1.12, tendremos que $E_T=4.8 \times 10^{-16}\text{ J}$. Despejando a B de la ecuación 1.14, y sustituyendo E_T , se tiene:

$$B = \sqrt{\frac{2m_e E_T}{q_e^2 R^2}} = 4.1 \times 10^{-3}\text{ T} \quad (2.1)$$

q_e es el valor absoluto de la carga del electrón ($1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$), y m_e su masa ($9.1 \times 10^{-31}\text{ Kg}$). Nótese que la magnitud de B es bastante pequeña y está muy por debajo del valor promedio del campo existente en el *gap* de los imanes del laboratorio, por el momento estos cálculos sirven para mostrar una primera aproximación del uso de los parámetros físicos en el Microtrón, más adelante se retomará éste tópico.

2.2. Sistema de Vacío.

2.2.1. Niveles y Tipos de Vacío.

Los electrones a acelerar se obtienen por medio de un fenómeno llamado emisión termiónica. Cuando están libres dentro del sistema, su desplazamiento se ve muy afectado por las partículas de aire que se encuentran en el ambiente, y que al ser ionizadas, los electrones van perdiendo la energía con que fueron emitidos. Es por esto que necesitan estar en condiciones de vacío para poder desplazarse y viajar libremente para llegar al ánodo o al blanco con el que se desea que impacten.

De acuerdo con la Sociedad Americana de Vacío en 1958 definió el término “vacío” como un espacio dado lleno con gas a presiones por debajo de la presión atmosférica, es decir, que tenga una densidad de moléculas menor a $2.5 \times 10^{19} \text{ mol/cm}^3$. Existen dos tipos de vacío, el artificial y el natural y el primero es más común encontrarlo en la superficie terrestre a magnitudes grandes y se obtiene utilizando diferentes tipos de bombas de vacío que extraen el gas existente de dentro de recipientes cerrados llamados cámaras de vacío, y en consecuencia, la *densidad molecular* (número promedio de moléculas por unidad de volumen) del gas decrece conforme el vacío aumenta.

Dentro de la clasificación del vacío artificial existen distintos niveles del mismo, de acuerdo a la presión alcanzada. Como se puede ver en la figura 2.2, tales niveles van desde bajo, medio, alto y ultra alto vacío. Para cada uno de ellos existen equipos específicos de bombeo y de medición, cuyos principios de funcionamiento están basados en las distintas condiciones físicas que adquiere el sistema debido a la presión.

Bajo y medio vacío: la densidad molecular del gas es muy grande para nuestro propósito, ya que comprende gases con una presión que va desde la atmosférica hasta presiones del orden de 10^{-2} Torr .

Alto vacío: Su rango esta entre los órdenes de 10^{-3} y 10^{-7} Torr . Las moléculas del gas se encuentran principalmente en las paredes internas de la cámara, por lo que el bombeo debe consistir en la evacuación de tales moléculas de tal forma que se despeguen de la cámara y lleguen a la bomba de vacío para ser expulsadas hacia el exterior de dicha cámara.

Ultra alto vacío: La densidad de moléculas es tan baja que les toma mucho tiempo formar capas delgadas de residuos sobre la superficie interna de la cámara, por lo que al hacer mediciones del vacío esta capa de residuos es casi inexistente. Su rango de presiones se

encuentra entre 10^{-7} y 10^{-19} Torr . Esta última magnitud es cada vez más pequeña conforme la tecnología del vacío avanza.

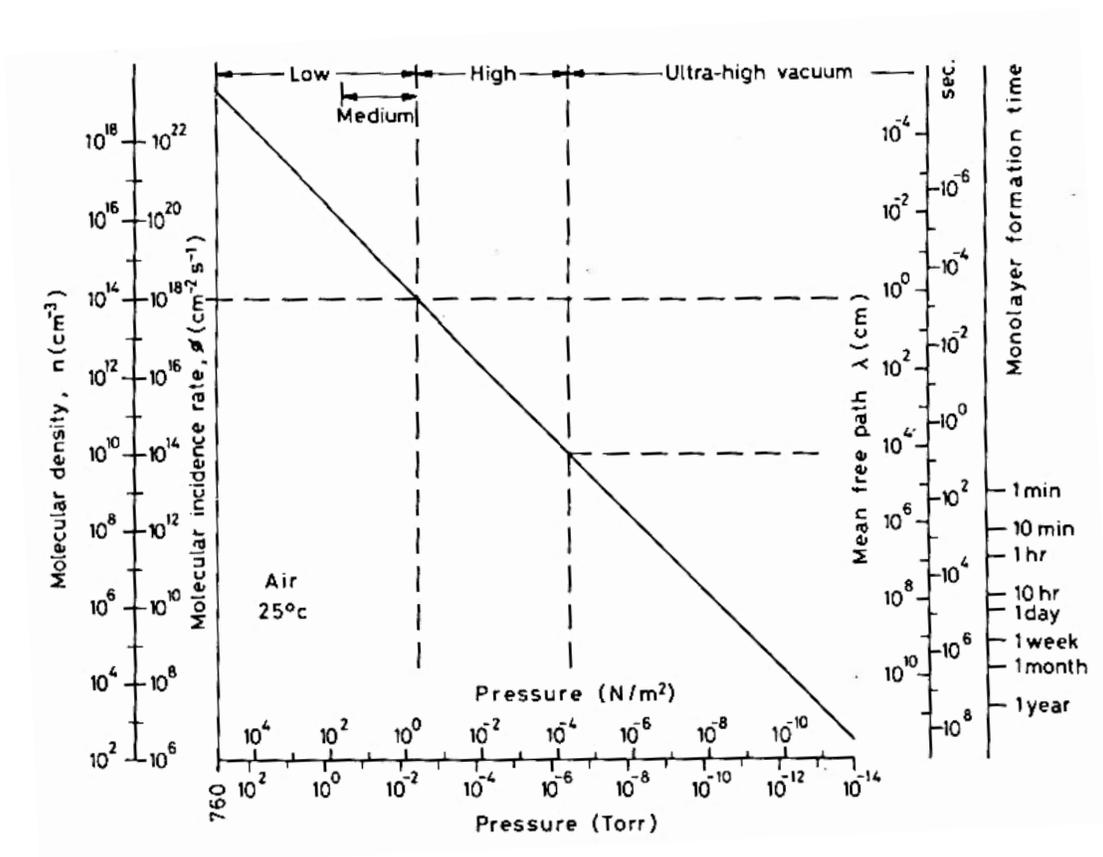


Figura 2.2. Gráfica de niveles de vacío dependiendo de la densidad molecular y presión. El camino libre medio depende inversamente de la presión en el sistema. (Roth, 1990)

2.2.2. Bombas de Vacío.

Dependiendo del rango de presión en el que se desee trabajar, existirá un tipo específico de bomba que permitirá a llegar al nivel de vacío necesario, como lo muestra la figura 2.3. Todas las bombas de vacío trabajan con el mismo principio básico: bajar la densidad molecular del gas dentro de la cámara de vacío al nivel más bajo.

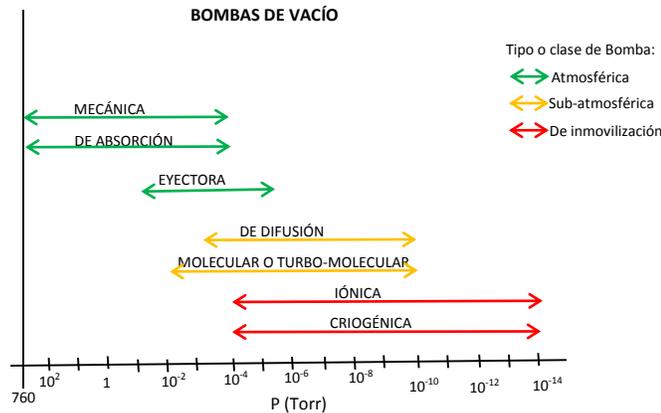


Figura 2.3. La presión deseada en el sistema determina el tipo de bomba de vacío que se debe utilizar.

Tomando en cuenta la presión a la que trabajan, existen principalmente 3 clases de bombas de vacío: primeramente se encuentran las que hacen la extracción a presión atmosférica, después las que hacen extracción sólo a presiones por debajo de la atmosférica (presiones sub-atmosféricas) y por último las que inmovilizan los gases o vapores expulsados por los materiales que hay dentro del sistema. Las primeras usualmente son llamadas bombas de respaldo. Como su nombre lo dice, remueven del sistema los gases que se encuentran a presión atmosférica hasta que llegan a una presión lo suficientemente baja. En este rango se encuentran los pistones, las de absorción pero principalmente las bombas mecánicas y eyectoras son usadas como respaldo para que, a su entrada, se conecten bombas que trabajen a presiones más bajas. Como se puede observar en la figura 2.3, trabajan a presiones que van desde la atmosférica hasta 10^{-5} Torr, dependiendo de las características de operación. En la segunda clase de bombas se encuentran las de difusión y las de arrastre molecular o turbo-moleculares. Estas requieren estar conectadas en serie a una bomba de respaldo y trabajan a presiones que van desde los 10^{-2} Torr hasta 10^{-10} Torr en algunos casos. Dentro de la tercera clase se encuentran las bombas iónicas y criogénicas las cuales, ya no necesitan un ducto de salida, ni tampoco de una bomba de respaldo. Las bajas temperaturas a las que trabajan provocan un gradiente de temperatura que atrapa a las escasas moléculas restantes dentro del sistema. Estas bombas pueden llegar a presiones de hasta 10^{-14} Torr o menos. En el laboratorio donde se realizará la construcción de la cámara de vacío del Microtrón se cuenta con 2 bombas mecánicas, por lo que sólo se podría llegar a un vacío cercano a los 10^{-4} Torr, que es muy aproximado a la presión calculada en la sección anterior.

2.2.3. Evaporación y Desgasificación de Materiales.

Los gases residuales dentro del sistema de vacío pueden provocar muchos problemas relacionados con el camino libre medio de los electrones que se desean acelerar. Debido a esto es importante tomar en cuenta el tipo de material que se utiliza para mantener el vacío, ya que existen principalmente dos fenómenos que lo afectan: la *evaporación* y la *desgasificación de los materiales*. Estos consisten en el desprendimiento de partículas desde la superficie de los instrumentos que se hallan dentro de la cámara de vacío y es causado por las bajas presiones a las que se someten y muchas veces dependen de la manera en que fueron contruidos. Por ejemplo, los metales absorben gases como nitrógeno, oxígeno u óxidos de carbono durante su fundición, además de otros que se les adhieren a sus paredes por estar expuestos al aire libre (O'Hanlon, 2003).

Además de estos gases, los sistemas de vacío también contienen vapores que están compuestos de moléculas cuya energía cinética es suficiente para escapar de la superficie del material, dependiendo de la presión y temperatura a las que sean sometidos. Los sistemas de vacío pueden tener tanto vapores saturados como insaturados pues la cantidad de moléculas libres en el sistema estará dada por, la cantidad de moléculas liberadas por las paredes, menos las absorbidas por las mismas paredes. Su estado dependerá puramente de las condiciones de presión, volumen y temperatura. Cualquier superficie con un líquido dentro del sistema de vacío es una fuente de vapor, por lo que se puede decir que: *la mínima presión alcanzable es la presión del vapor de este líquido a la temperatura en que se encuentre dentro del sistema* (Roth, 1990). Para evitar este inconveniente es recomendable implementar una trampa de temperatura en el sistema para así reducir la presión del gas que haya adentro. Tomando en cuenta esta premisa, es muy útil el uso de las bombas criogénicas que minimizan la presión en el sistema atrapando las moléculas remanentes utilizando la diferencia de temperatura entre la cámara y esta bomba. Debe tomarse en cuenta que sólo pueden ser usadas una vez que se han alcanzado las condiciones en las que solamente las moléculas del vapor se encuentran libres (a presiones alrededor de los 10^{-4} Torr), de acuerdo a la gráfica de la figura 2.3.

2.2.4. Limpieza de Materiales.

Puesto que el vacío puede ser afectado tan drásticamente por los materiales que se encuentran dentro, es muy importante que el sistema de vacío quede libre de cualquier líquido o sustancia que desgasifique con facilidad. Es por esto que existen diversos métodos para limpieza del sistema de vacío. Estos consisten en diversos procesos que deben ser seguidos consecutivamente dependiendo del nivel de limpieza que se requiera para no estropear el vacío. Mientras más limpio se requiera el sistema, cada paso se vuelve más meticuloso y especializado. Para los fines de éste trabajo de tesis se describen a continuación los que estuvieron al alcance del realizador.

Primeramente se realiza un proceso de *lavado mecánico*, que consiste en frotar las paredes internas del sistema con paños húmedos o cepillos, que son ideales para quitar en primera instancia los residuos de tierra y polvo en grandes cantidades. Seguido de esto la pintura y adhesivos que pudieran existir deben ser removidos, por lo que se usan solventes como alcohol isopropílico o acetona. Estos además ayudan a deshacerse de la humedad remanente, ya que deshidratan las superficies por su rápido proceso de evaporación a presión atmosférica. También ayudan a disolver en su mayoría las grasas y aceites naturales que existan debido al manejo de los componentes del sistema con las manos sin protección. Por esto también es necesario que dicha manipulación se realice utilizando guantes de látex y en un ambiente libre de polvo. Es importante tener en cuenta que los solventes deben usarse sobre materiales que sean resistentes pues puede llegar a desgastarlos y provocarles daños no deseados que afecten el desempeño del material. Por esto, el alcohol isopropílico puede usarse sin problemas sobre metales, pero debe ser utilizado con cuidado y en muy poca cantidad sobre superficies plásticas como las del acrílico.

El siguiente proceso es el de desengrasado. Este se realiza por medio de la *inmersión en un baño ultrasónico* el cual se efectúa sólo en piezas pequeñas o que puedan ser sumergidas en una tanque especial que contiene agua o un líquido llamado tricloroetileno (Triklone N) (Chambers, 1998). Dichas sustancias deben encontrarse a una temperatura aproximada de 60 °C y las piezas deben dejarse dentro de la tina por alrededor de 15 minutos o hasta que alcancen la misma temperatura que el solvente. En estas condiciones, las piezas y el solvente son sometidas a una agitación ultrasónica para remover los restos de grasas y aceites que pudieran haber quedado después de los tratamientos anteriores. Este procedimiento debe realizarse 2 o 3 veces para lograr mejores resultados. Después, las piezas se enjuagan en un chorro de agua caliente y se secan con corrientes de aire seco en un sitio aislado del polvo y aceites de cualquier tipo. Una vez terminados

todos los procedimientos de limpieza, debe armarse el sistema o envolver cada componente recién lavado con plástico delgado para protegerlos de la contaminación que puedan adquirir por estar en contacto con el ambiente.

2.2.5. Camino Libre Medio.

Cuando la densidad molecular es muy alta, las moléculas del gas se van moviendo por el sistema y colisionan unas contra otras pues el espacio que tienen para moverse es muy reducido. Por esto se vuelve importante un parámetro que mide estadísticamente la distancia recorrida por una molécula entre una colisión y otra. A dicha distancia se le conoce como el *Camino Libre Medio* (λ) (Roth, 1990) y el nivel de vacío que existe dentro del sistema afecta en gran medida su magnitud. Una forma de entender esto es mediante su representación matemática:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P} \quad (2.2)$$

Aquí T representa la temperatura en grados Kelvin (K) del gas dentro del sistema, P es la presión en Torr ($Torr$) a la que se encuentra, d corresponde al diámetro de una molécula del gas en centímetros (cm) y k la constante de Boltzman, que para conservar las unidades se expresa en términos de presión, volumen y temperatura ($2.331 \times 10^{-20} \frac{Torr \text{ cm}^3}{K}$). Entonces el camino libre medio queda como:

$$\lambda = \frac{2.331 \times 10^{-20} \frac{Torr \text{ cm}^3}{K} T}{d^2 P} \quad (2.3)$$

Si se consideran las condiciones que se usaron durante el desarrollo experimental de este trabajo, el gas dentro de la cámara del Microtrón fue aire a temperatura ambiente ($298 K$) y si cada molécula tiene un diámetro aproximado de $3.76 \times 10^{-8} \text{ cm}$ (Roth, 1990). Por lo tanto λ sólo depende de la presión dentro de la cámara como lo sugiere la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{2.331 \times 10^{-20} \frac{Torr \text{ cm}^3}{K} \cdot 298 K}{(3.76 \times 10^{-8} \text{ cm})^2 P} = \frac{4.91 \times 10^{-3} \text{ cm Torr}}{P} \quad (2.4)$$

Ahora bien, volviendo a los valores utilizados para calcular el campo magnético en el Microtrón al inicio de este capítulo, se consideró que el radio máximo de una órbita sea de 4.5 cm . El haz de electrones deberá recorrer el perímetro correspondiente a este radio (28.4 cm) hasta que en promedio, colisione con el blanco establecido, este es su camino libre medio. Para conocer la presión necesaria para alcanzarlo despejamos P de la ecuación 2.4:

$$P = \frac{4.91 \times 10^{-3} \text{ cm Torr}}{28.4 \text{ cm}} = 1.73 \times 10^{-4} \text{ Torr} \quad (2.5)$$

Ésta debe ser la presión máxima (pues puede ser menor si las instalaciones lo permiten) para asegurar el camino libre medio de los electrones dentro del acelerador.

2.3. Cañón de Electrones.

2.3.1. Electrodo y Otros Componentes.

Dentro de los componentes de diferentes dispositivos como un tubo de rayos X, tubo de rayos catódicos y un bulbo tipo tríodo, que en general son tubos al vacío de emisión termoiónica, se encuentran los llamados cañones de electrones que están conformados por 2 o más electrodos, dependiendo del tipo. Básicamente cuentan con los siguientes componentes:

Cátodo: Es el electrodo negativo, por el cual se desprenden los electrones, dependiendo del tipo de funcionamiento.

Ánodo: El electrodo positivo al cual se dirige la corriente de partículas cargadas negativamente provenientes del cátodo debido al campo eléctrico generado entre ambos electrodos.

Rejilla: También se trata de un electrodo que por lo regular se encuentra entre el cátodo y el ánodo y cuya función es controlar, enfocar o acelerar el flujo de electrones que se dirigen hacia el ánodo. La rejilla presenta aberturas para permitir el paso de los electrones a través de sí misma y según la función que desempeñe puede ser rejilla de control o mando, pantalla o supresora.

Estos electrodos son utilizados por los cañones de electrones para generar y posteriormente emitir tales partículas dentro del sistema de aceleración del Microtrón. Por ejemplo un método para conseguir electrones consiste en aplicar una gran diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Entre ellos se produce un campo eléctrico que arranca los electrones del cátodo y hace que viajen perpendicularmente al plano de este electrodo, hasta que llegan al ánodo. Ciertos cañones obtienen los electrones calentando eléctricamente el cátodo aprovechando el fenómeno de emisión termoiónica.

2.3.2. Emisión Termoiónica.

La emisión termoiónica se presenta cuando el aumento de energía calorífica en un material metálico provoca la emisión de electrones. Ésta energía es generada en el metal cuando se hace circular una corriente eléctrica intensa a través del conductor situado en el vacío (como en el caso de los tubos de rayos catódicos y sus semejantes). Debido a la resistividad de dicho conductor, el paso de los electrones aumenta la energía cinética de los átomos con los que van chocando, provocando que vibren y la temperatura del metal aumente hasta llegar al punto en que los átomos se ionizan y liberan sus electrones hacia la llamada nube de electrones (Aldous, 1952).

Antes de formar dicha nube, los electrones de los átomos van aumentando su energía hasta que llegan a los orbitales exteriores. Debido a que no pueden permanecer en dicho estado energético, los electrones liberan el excedente de energía emitiendo fotones para regresar a su estado base, dándole el brillo característico a un filamento incandescente. Al tiempo que otros electrones son liberados y se integran a la nube, permanecen en esa posición hasta que sean sometidos a una fuerza exterior como las generadas por un campo magnético o eléctrico que cambie sus trayectorias.

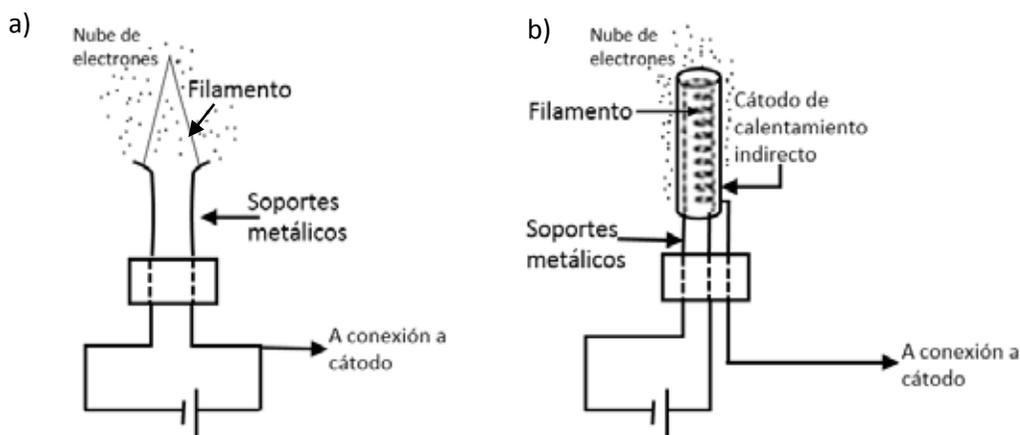
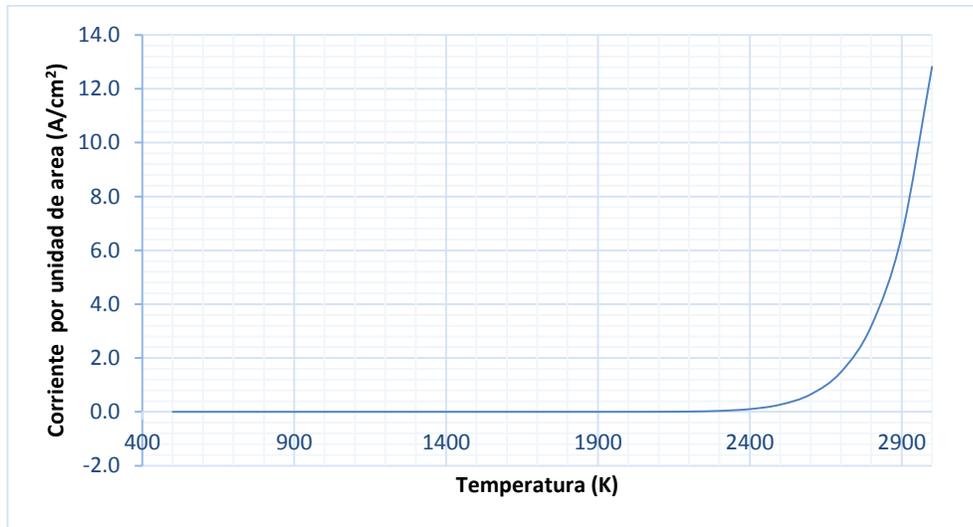


Figura 2.4. Diagramas de composición de cátodos. a) de calentamiento directo, b) de calentamiento indirecto.

El Físico Owen Willians Richardson estudió la emisión termoiónica como la relación que existe entre la corriente por centímetro cuadrado (I) de una superficie calentada eléctricamente y la temperatura absoluta de la superficie (T), obteniendo así en 1901, una expresión similar a la ecuación de Arrhenius para describir dicho fenómeno. Años más tarde los trabajos de Lothar W. Nordheim y Arnold Sommerfeld sobre la representación de la distribución existente en la conducción de electrones en un metal a través de la estadística Fermi-Dirac, confirmaron la llamada ecuación de Richardson:

$$I = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (2.6)$$

Donde k se trata de la constante de Boltzmann equivalente a: $8.62 \times 10^{-5} \frac{eV}{K}$, ϕ es la función de trabajo en electrón-volts (eV) la cual, corresponde a la energía necesaria para llevar a un electrón hasta la superficie del emisor, dependiendo de la naturaleza del mismo y de la contaminación que se tenga en la superficie. Otro valor que varía de acuerdo al material es la constante de emisión o constante de Richardson (A) cuyo valor máximo se encuentra en los $120 \frac{A}{cm^2 K^2}$ y se sabe que los metales recubiertos con ciertos elementos (dopamiento), presentan una mayor emisión que los metales altamente puros, siendo el caso más común el del Tungsteno (Wolframio). Éste es muy usado debido a que es el elemento químico que tiene el punto de fusión mayor a todos los demás (3695K aproximadamente) lo que le permite llegar hasta altas temperaturas sin fundirse. Vale la pena hacer notar que la temperatura es el factor dominante en la ecuación de Richardson, pues una pequeña variación afecta exponencialmente a la emisión. Finalmente, el límite al que se puede llegar con la emisión termoiónica lo dictan el punto de fusión del material y la evaporación de los materiales de los que está hecho el cátodo. En la gráfica 2.1 se aprecia que el comportamiento de la ecuación 2.6 es creciente exponencialmente para temperaturas que se encuentren por arriba de los $1000 K$, pues en caso contrario la curva crece muy lentamente llegando a tener valores de corriente irreales que van del orden de $10^{-70} A$.



Gráfica 2.1. Comportamiento de la corriente por cm^2 respecto a la temperatura del filamento para una constante de Richardson de $60 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2 \text{K}^2}$ y una función de trabajo de 4.54 eV .

Existen diversos tipos de cátodos y de acuerdo a las siguientes características son usados para distintas aplicaciones:

Cátodos de tungsteno puro: Es comúnmente usado para filamentos calentados directamente haciéndoles pasar una corriente eléctrica (figura 2.4a). Mientras se calienta el filamento se tornará al rojo vivo por lo que a este tipo de cátodos se les llama “emisores brillantes”. Sus valores de la constante de Richardson y su función de trabajo se encuentran a: $60 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2 \text{K}^2}$ y 4.54 eV respectivamente, por lo que a una temperatura de operación de 2500 K , tendrá una emisión de $0.265 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$.

Cátodos de tungsteno dopados con torio: Son conectados como el filamento de la figura 2.4a. A este tipo de filamentos se les dopa al 1 o 2 por ciento con dióxido de torio, para reducir el brillo provocado por el calentamiento. La emisión de este tipo de filamentos se puede aumentar llevando a cabo un proceso de activación mediante un precalentamiento del filamento. Se le hace pasar corriente hasta que alcance una temperatura de 2700 K durante 1 o 2 minutos para reducir a una cubierta metálica el dióxido de torio. En este paso del proceso se produce una evaporación que puede reducirse bajando la temperatura a 2100 K aproximadamente para que el torio termine de acumularse en dicha delgada capa metálica en la superficie del filamento. Después de este proceso de precalentamiento se puede trabajar con el filamento a temperaturas ligeramente más bajas. Como es de esperarse, la formación de esta capa de torio en el tungsteno afecta los valores de la

constante de Richardson ($3 \frac{A}{cm^2 K^2}$) y la función de trabajo (2.63 eV) por lo que la emisión también se ve afectada. Por ejemplo para una temperatura de 2000 K la emisión será de $3 \frac{A}{cm^2}$.

Cátodos con cubierta de óxidos: A estos cátodos se les aplica un revestimiento de distintos compuestos químicos como óxido de bario, óxido de estroncio y algunas veces óxido de calcio sobre un núcleo metálico como puede ser de platino, cuya emisión es de $0.2 \frac{A}{cm^2}$. Los núcleos de níquel pueden llegar a tener una emisión de $1 \frac{A}{cm^2}$ que es mejor que la del platino, por lo que ha sido más comúnmente usado para los cátodos con cubierta de óxido. Además la eficiencia de este tipo de cátodos es mucho más alta que la de los cátodos dopados con torio pues pueden tener una alta emisión a mucho más bajas temperaturas, por ejemplo, a 1000 K y con un pequeño cambio a 1100 K sus emisiones serán de 0.45 y $1.6 \frac{A}{cm^2}$ respectivamente, ya que su constante de Richardson es de $0.05 \frac{A}{cm^2 K^2}$ y la función de trabajo corresponde a 1 eV. También es posible hacer cátodos en forma de cilindros o láminas delgadas que pueden ser calentados indirectamente debido a sus bajas temperaturas de operación, en la figura 2.4.b se observa que un filamento se coloca dentro del cátodo y se enciende para llevar a cabo la emisión de iones y con éste proceso calentar solamente con una energía de entre 1 y 12 watts, lo que lo hace más eficiente que los demás cátodos (Aldous, 1952).

2.4. Control del Voltaje.

2.4.1. Descargas Eléctricas.

El hecho de tener el sistema de vacío limpio minimiza fenómenos nocivos como la desgasificación y evaporación de los materiales y aumenta condiciones favorables como el camino libre medio y el aislamiento de los electrodos mediante el vacío. Entonces, ahora se analiza el hecho de saber la separación que deben tener tales electrodos para acelerar a los electrones que pasen entre ellos.

El camino libre medio es un factor importante que debe ser tomado en cuenta pues la distancia que viajen los electrones dentro del Microtrón depende de ello. Por otro lado, el vacío puede ser usado como un aislante del alto voltaje usado para acelerarlos. De otra manera, es posible que se creen *descargas luminosas* o *disruptivas* en el gap que se halla entre los electrodos. Las primeras son descargas eléctricas que se producen con voltajes relativamente pequeños (cientos de volts) dependiendo de la presión y tienen una duración transitoria. Durante ese instante, el medio

gaseoso que existe entre los electrodos no es atravesado completamente por la corriente sino que solo se forma a su alrededor un plasma cuyo color varía de acuerdo al gas (Tabla 2.1). Descargas disruptivas se producen con voltajes del orden de kilovolts o mayores. En ellas, la corriente logra atravesar por completo el gas que separa a los electrodos formando así un arco de corriente entre ellos.

Gas	Color de descarga
Argón	Violeta
Tetracloruro de carbono	Verde blanquecino
Monóxido de carbono	Blanco
Dióxido de carbono	Blanco
C ₂ H ₅ OH	Blanquecino
Cadmio	Azul verdoso
Hidrogeno	Rosa
Mercurio	Verde azulado
Potasio	Verde
Criptón	Amarillo rosado
Aire	Rojizo
Nitrógeno	Rojo-Amarillo
Oxígeno	Amarillo limón con núcleo rosa
Talio	Verde
Xenón	Violeta azulado

Tabla 2.1. Color de las descargas eléctricas en los gases y vapores a bajas presiones. (O'Hanlon, 2003), (Espe, 1968).

2.4.2. Ley de Paschen.

Como se ha visto, el principal problema para el aislamiento eléctrico dentro del vacío es el gas residual. Si la presión local en el gap es tal que la magnitud del camino libre medio de los electrones es menor que la magnitud del gap, se producirá el ambiente necesario para la creación de una descarga eléctrica de algún tipo (Latham, 1981). Esto lo establece la Ley de Paschen que define las condiciones de un voltaje de descarga en función del producto de la separación de los electrodos por la presión en el sistema. Con esto, el Físico Friedrich Paschen realizó experimentalmente las gráficas que se observan en la figura 2.5, donde se muestran tales condiciones para diferentes gases (Wadhwa, 2007).

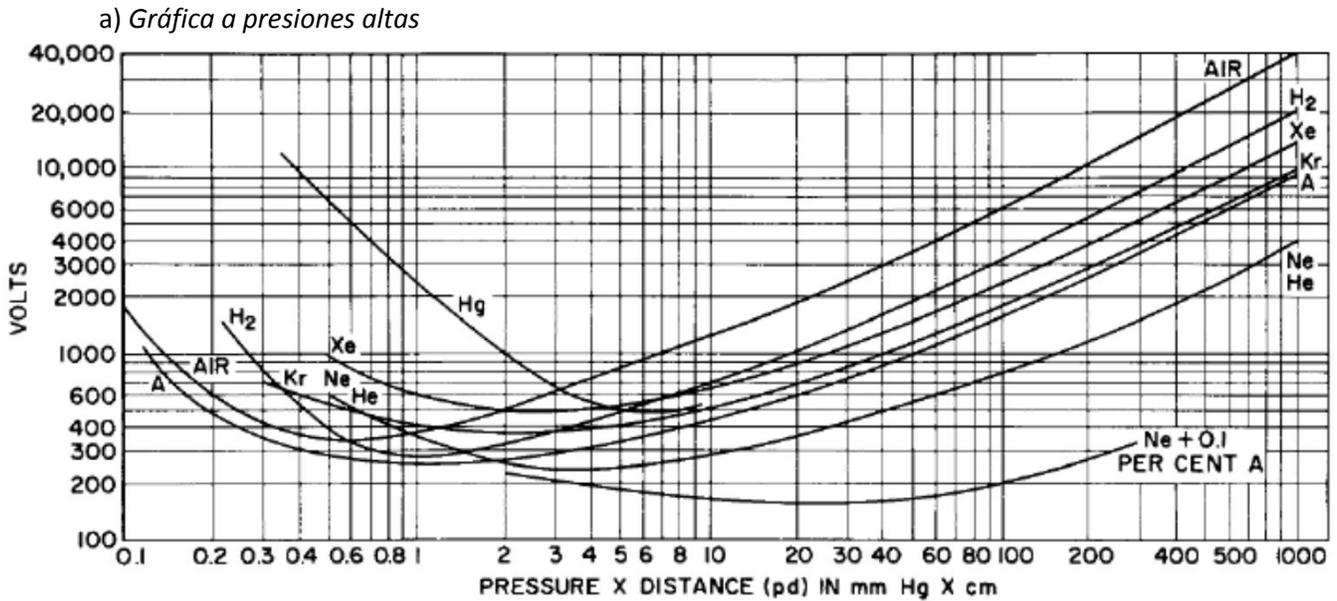


Figura 2.5. Curvas de Paschen para diferentes gases (donde 1 mmHg=1 Torr). Muestra la aparición de descargas para diferentes voltajes con gap de 1 cm. (Wittenberg, 1962)

2.5. Sistema de Aceleración.

Este componente del Microtrón tiene como propósito aumentar la energía cinética de los electrones en cada trayectoria, mediante el uso de campos eléctricos generados entre electrodos con alto voltaje. Existen diferentes geometrías y arreglos que permiten tener una mayor o menor eficiencia de aceleración. El dispositivo conocido como “cavidad aceleradora” utiliza una fuente de radiofrecuencia (magnetrón) que hace oscilar el campo eléctrico de tal manera que cada vez que el electrón pase por el interior de la misma cambie de polaridad y por la fuerza de repulsión, se acelere. También es posible acelerarlos mediante anillos concéntricos sometidos a una gran diferencia de potencial. Tal como sucede con los iones en un acelerador lineal como el Van de Graaff. Como se observa en la figura 2.6, anillos de material aislante se colocan intercaladamente con anillos conductores (en ocasiones el material aislante es el vacío), llamados anillos equipotenciales. Estos son conectados a voltajes cuya polaridad depende de las cargas que se deseen acelerar. Así, si se pretende acelerar iones positivos, se usa voltaje positivo y si se trata de iones negativos, se utiliza voltaje negativo. El voltaje en cada anillo permanece constante pero disminuye de un anillo a otro, conforme estos se encuentran más separados de la fuente de iones creando así, un gradiente de potencial que permite enfocarlos y acelerarlos (Hellborg, 2005). Esta configuración es similar a las superficies equipotenciales explicadas anteriormente, de ahí el nombre de anillos equipotenciales.

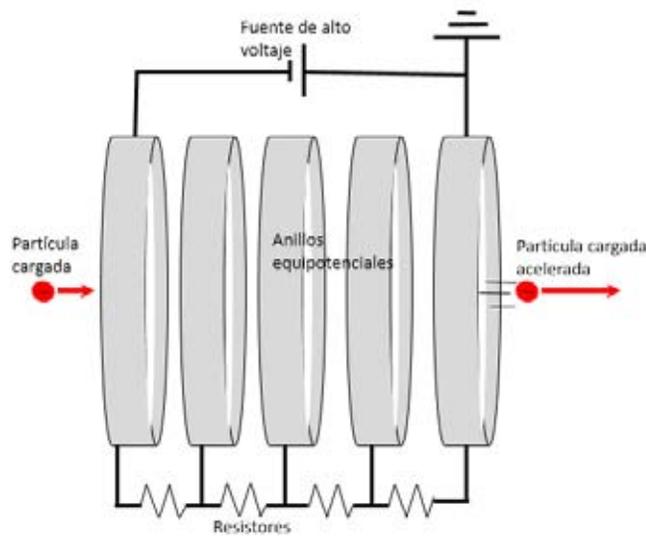


Figura 2.6. Arreglo de anillos equipotenciales, conectados a una fuente de alto voltaje, los anillos intermedios se conectan mediante resistores, con lo cual el voltaje en cada uno de ellos cambia para crear un gradiente de potencial a lo largo del trayecto por el que pasa la partícula cargada. La impedancia de los resistores debe ser calculada de acuerdo al voltaje que se necesite en cada uno de los anillos equipotenciales, no necesariamente deben iguales. Notar que si la partícula fuera positiva la polaridad de la fuente debe estar conectada con polaridad opuesta.

Del mismo modo en que se usan los electrodos en forma de anillos en aceleradores lineales, se pretende experimentar el arreglo que funcione con mayor eficiencia en este prototipo de Microtrón. El primero consiste en utilizar 2 mallas paralelas de cobre conectadas de la forma en que se muestra en la figura 2.7a, de manera tal que el campo eléctrico en cada cuadro de alambre que conforma la malla será, localmente, como el de un anillo equipotencial de un acelerador como el Van de Graaff. Entonces, se utiliza el hecho de que entre mayor sea el área de las mallas mayor será la probabilidad de que los electrones las atraviesen y sean acelerados. Los electrodos dispuestos en dicha geometría paralela pueden ser tratados como dos placas idénticas de cobre. Esto es debido a su buena conducción eléctrica y bajo costo en comparación con otros metales. También es posible que sean de acero inoxidable, que es más recomendable para trabajar en condiciones de vacío. Estas placas son montadas sobre bases que sean aislantes eléctricos junto a la fuente de electrones para que no haga contacto eléctrico con la cámara de vacío en caso de que ésta sea de metal (Latham, 1981). Es importante que la disposición de los electrodos sea tal que permita que los electrones

emitidos sean atraídos por el campo entre los electrodos y a su vez acelerados por los mismos. Como se observa en la figura 2.7a, las líneas de campo van del electrodo más positivo al más negativo.

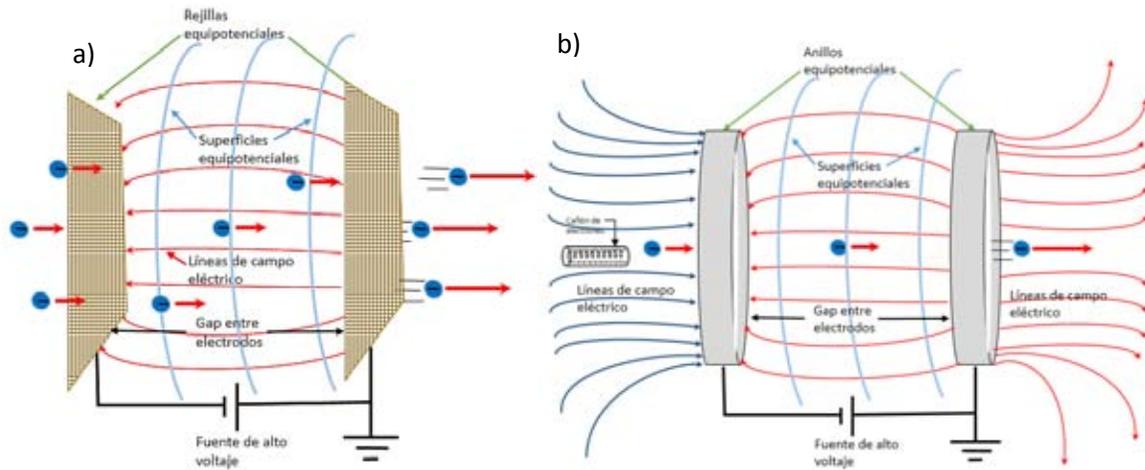


Figura 2.7. a) Arreglo de placas paralelas. Las mallas propician una mayor probabilidad de que electrones entren en el campo generado entre ellas y sean acelerados. b) el arreglo de anillos equipotenciales permite tener un haz de electrones enfocado.

Por otro lado, siguiendo el arreglo del Van de Graaff, se colocan anillos concéntricos junto al cañón de electrones como se muestra en la figura 2.7b. Esto tiene la ventaja de obtener un haz de electrones enfocado y eficiente. Dichos electrodos también deben estar conectados a voltajes diferentes para crear un gradiente de potencial y así acelerar a los electrones. El vacío dentro de la cámara servirá como aislante eléctrico entre los electrodos, evitando generar descargas disruptivas entre ellos. Si se trata de una cámara de vacío hecha de metal, debe tenerse cuidado de aislarla de los electrodos con soportes aislantes que no interfieran con su función. Además dichos electrodos deberán ser discos delgados cuya longitud sea más pequeña en comparación con el gap que exista entre ellos. NATACION

2.5.1. Ganancia de Energía por Órbita.

En cualquiera de las dos configuraciones anteriores, los electrones ganan energía cinética cada que pasan por estos sistemas de aceleración gracias a la diferencia de potencial a la que están conectados. Esto provoca que sus trayectorias sean cada vez más grandes hasta que llegan a la periferia interna del acelerador. Utilizando el análisis hecho en la sección 1.6, es posible predecir el

radio y perímetro de dichas trayectorias. También se puede predecir la energía que alcanzan los electrones acelerados y el número de circunferencias que recorren estos. En la tabla 2.2 se muestran los resultados utilizando las ecuaciones y el procedimiento de dicha sección.

Para obtener la magnitud del campo magnético en la sección 2.2, fue necesario suponer que los electrones salían con una energía de 6 eV del cañón de electrones. Haciendo lo mismo con la ecuación 1.11 se obtiene la velocidad v_i mostrada en la tabla 2.2. V_a es la diferencia de potencial del sistema de aceleración que suministra la fuente de alto voltaje. E_T denota la energía total (que se muestra en electronvolts para facilitar la comprensión, una vez hecha la conversión desde joules) con la que viaja el electrón a una velocidad v_a , después de haberse acelerado. Los radios y perímetros en cada órbita se obtienen tomando en cuenta el resultado de la ecuación 2.1.

No. de órbita	v_i ($\times 10^6$ m/s)	V_a (V)	E_T (eV)	v_a ($\times 10^6$ m/s)	Radio (cm)	Perímetro (cm)
0	1.45	0	6	1.45	0.2	1.27
1	1.45	500	506	13.33	1.85	11.63
2	13.33	500	1006	18.8	2.61	16.39
3	18.8	500	1506	23.01	3.19	20.06
4	23.01	500	2006	26.56	3.68	23.15
5	26.56	500	2506	29.69	4.12	25.87
6	29.69	500	3006	32.51	4.51	28.33

Tabla 2.2. Valores aproximados de parámetros de interés en el Microtrón, suponiendo un voltaje en el filamento emisor de 6 V y que el campo magnético tiene la magnitud obtenida en la sección 2.1 (4.1×10^{-3} T).

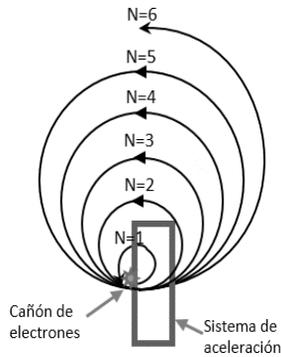


Figura 2.8. Diagrama de órbitas de electrones. A cada órbita le corresponden los datos mostrados en la tabla 2.2.

2.6. Receptor de Electrones (Canal de Extracción).

Cuando los electrones han sido acelerados, sus trayectorias llegarán a ser tan grandes que alcanzan el límite de la zona uniforme del campo magnético existente en el Microtrón. Para coleccionar el haz, en este punto se instala un dispositivo como se muestra en la figura 2.1. Se trata de un colector llamado *Copa de Faraday*, hecho de material conductor conectado a un amperímetro para saber la corriente generada por los electrones acelerados. Este se encuentra aislado de la cámara (si ésta es de metal) para evitar la pérdida de dicha corriente. Cuando se usa para captar haces de potencia relativamente baja (unos cuantos Watts, como en el caso de éste Microtrón) existen fenómenos que deben ser tomados en cuenta. Entre ellos están los electrones secundarios que surgen del choque de los electrones originales con el conductor de la Copa de Faraday, así como la corriente proveniente del choque de dichas partículas con el material conductor de la copa (Strehl, 2006). Esto puede afectar al haz, como el hecho de que al encontrarse en el borde de la cámara, los efectos de borde pueden dispersar a esas partículas. Puesto que se trata de haces de energía baja, el campo magnético debería ser suficiente para dispersarlo y que no afecte demasiado las mediciones.

En lugar de usar una copa de Faraday como tal, en este trabajo, se colocará un blanco sencillo que hará parcialmente el trabajo de aquella. Dicho blanco constará de una pequeña laminilla de cobre en la periferia de la cámara de vacío, que estará conectada mediante *atravesadores* de vacío a un medidor de corriente. Los *atravesadores* son conectores especialmente diseñados para ser conectados a través de la pared de algún recipiente, ya sea que se encuentre al vacío o no. Se utilizan para hacer conexiones con los instrumentos dentro el recipiente con componentes externos como fuente de voltaje o medidores de corriente.

CAPÍTULO 3. TRABAJO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE MICROTRÓN.

Para llevar a cabo la construcción del Microtrón, primero deben realizarse pruebas que permitan saber si cada componente funcionará como se espera. También es necesario verificar si el material utilizado responderá apropiadamente a las necesidades del experimento. Una vez hecho esto, serán implementados en un diseño final para la construcción del Microtrón. En este capítulo se describen los procedimientos seguidos en cada uno de los experimentos, así como las condiciones en las que fueron realizados.

3.1. Distribución de Campo Magnético en Imanes Permanentes.

Conocer la forma en que el campo magnético está distribuido, permite establecer si es posible acelerar electrones de tal manera que puedan seguir trayectorias circulares dentro del acelerador, así como saber cuál será la magnitud de la fuerza magnética que actuará sobre ellos. Por esta razón, se realizaron diferentes mediciones del campo magnético en diferentes condiciones utilizando un *sensor de efecto Hall*.

Inicialmente se intentó usar un electroimán. Sin embargo, su uso fue descartado debido a que el área donde se generaba el campo magnético era muy pequeña, ya que se trataba de un cuadrado de 7cm por lado. Con esas dimensiones los efectos de borde afectarían en gran medida las trayectorias de los electrones. Entonces se optó por usar imanes permanentes de ferrita. A estos se les midió su campo magnético a diversas alturas y en diferentes puntos sobre el plano paralelo a su superficie. También se realizaron mediciones colocando barras de acrílico de 1 cm de ancho para caracterizar la distribución y magnitud del campo en estas condiciones, y así determinar las circunstancias en que se pueden montar en el Microtrón.

3.1.1. Sensor de Efecto Hall.

El sensor de efecto Hall es un transductor que permite saber indirectamente la cantidad de flujo magnético que pasa a través del mismo. Lo anterior, siempre y cuando las líneas del campo magnético que se requiera medir sean perpendiculares al plano del sensor. Dentro del transductor

se crea un campo eléctrico (campo Hall) que da lugar a un voltaje de salida que es proporcional a la magnitud de campo magnético. El sensor utilizado para este experimento fue el encapsulado UGN3503U que en condiciones normales, es decir, usando un voltaje de alimentación de 5 V y a temperatura ambiente, su voltaje de salida es de 1.30 mV por cada Gauss que detecte, esto es 1.30 mV/G (Allegro-MicroSystems, 2002). Lo anterior se mide con un voltímetro y posteriormente se hace la conversión a Gauss utilizando la razón de cambio anterior para saber el campo magnético. En la figura 3.1a se muestra el diagrama de las conexiones y la disposición del sensor sobre el imán para la medición. Debe encontrarse en el mismo plano que una de las caras del imán, de tal forma que las líneas de campo sean perpendiculares a éste dispositivo. La hoja de datos de éste sensor indica que el voltaje de salida es la mitad del voltaje de entrada. Cuando no se encuentra en presencia de ningún campo magnético, si se coloca como se muestra en la figura 3.1a (con la cara que tiene el grabado hacia arriba), el voltaje de salida disminuirá, es decir, será menor que la mitad del voltaje de entrada. Esto indica que se están realizando mediciones en el polo norte del imán. Si ahora el sensor se coloca de tal forma que la cara con letras quede hacia el imán, el voltaje de salida será mayor e indicará que se trata del polo sur. Para tener un mayor control de las regiones donde se hacen dichas mediciones, se traza sobre la superficie del imán una cuadrícula sin llegar a las orillas del mismo para evitar tener medidas confusas debido a los efectos de borde (figura 1.3b). Cada cuadrado es de 1 cm por lado y en cada uno de ellos se realizan 5 mediciones, lo que permite hacer promedios y graficarlos.

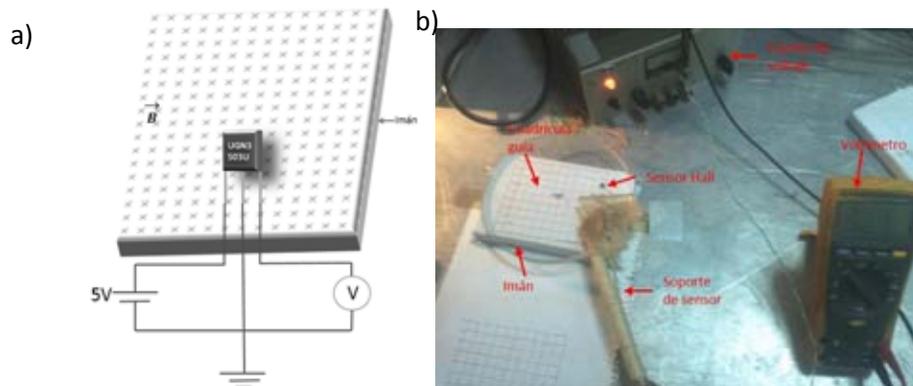


Figura 3.1. a) Diagrama de conexión del sensor de efecto Hall UGN3503U, b) Montaje experimental.

3.1.2. Caracterización de Campo Magnético de Diferentes Arreglos Experimentales.

Con el sensor de efecto Hall directamente sobre el polo sur de uno de los imanes como se muestra en la figura 3.1, se realizan las mediciones del campo magnético. Los datos se muestran en las gráficas 4.1a y 4.1b.

Es importante mencionar que durante todo el proceso de medición del campo magnético el sensor de efecto Hall se mantuvo en la misma posición (como en la figura 3.1a). Las mediciones en uno u otro polo se realizaron rotando el imán de tal forma que no fuera necesario mover el sensor. Las siguientes gráficas 3.2a y 3.2b, corresponden a las mediciones hechas de la misma manera que las anteriores pero en el polo norte del imán.

3.2. Vacío.

Con los cálculos hechos anteriormente (mostrados en la sección 2.2.5) para saber la presión que debería haber en la cámara de vacío para permitir que los electrones tengan el camino libre medio necesario, se predijo que ésta debe ser del orden de 10^{-4} Torr como mínimo. Entonces se procedió a medir las presiones que se podían alcanzar con el equipo de vacío con que se cuenta en el laboratorio. Se revisaron y probaron las bombas y cámaras disponibles, para analizar qué equipos funcionarían adecuadamente para construir el Microtrón.

3.2.1. Bombas de Vacío.

Las pruebas iniciales se realizaron con una bomba de vacío marca Varian modelo SD-40, que cuenta con una tasa de flujo de extracción de 40 l/min y puede llegar a una presión de 2.3×10^{-3} Torr, de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Varian, 1998). Al ser una bomba mecánica, posee 2 puertos por los que fluye el aire, uno de entrada que va conectado hacia la cámara y otro de salida, que puede estar hacia el exterior directamente o ir conectado a una trampa de condensación que evita que los vapores expulsados regresen a la bomba. Sin embargo, resultó que el vacío que se podía obtener por ésta bomba no era suficiente para llegar a la presión necesaria, aunque fue suficiente para tener una primera aproximación a los sistemas de vacío pues no se contaba con alguna experiencia previa. Su fotografía se muestra en la figura 3.2a.

Posteriormente se trabajó con una bomba de vacío mecánica como la mostrada en la figura 3.2b, de la marca Leybold del tipo Trivac que le permite trabajar como una bomba de respaldo en

caso de utilizarse bombas turbomoleculares. Su modelo es el D8A y acorde a los datos del fabricante (Leybold, 2000). Ésta puede generar un vacío de hasta 3×10^{-4} Torr, con una tasa de flujo de 190 l/min. Esto es mucho mayor a lo que ofrece la bomba anterior, permitiéndole realizar un mayor número de pruebas. Las mangueras y conectores de vacío fueron limpiados con alcohol isopropílico y sometidos a un lavado ultrasónico para dejarlos libres de aceites e impurezas que pudieran contener.

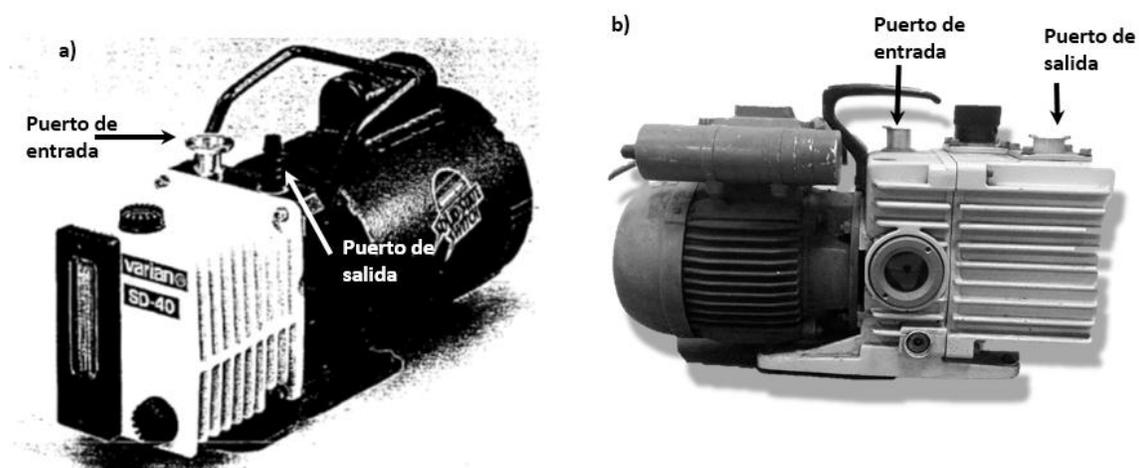


Figura 3.2. Bombas de vacío mecánicas a) Varian SD-40, b) Leybold D8A.

3.2.2. Cámaras de Vacío.

Se utilizó una cámara de vacío circular de 50 cm de diámetro que como se observa en la figura 3.3a. Ésta es de aluminio y consta de una tapa de acrílico de una pulgada de grosor y 4 brazos laterales que poseen adaptadores para conectarse a bombas y medidores de vacío. El interior de la cámara se limpió con alcohol isopropílico para eliminar los restos de humedad que pudieran afectar el vacío. Se utilizó la bomba Varian SD-40 por periodos de aproximadamente 36 horas. En la entrada de la cámara se colocaron válvulas especiales para sistemas de vacío de la marca Varian con las que se regulaba la entrada y salida de aire a la cámara. Fue posible obtener una presión de 200 mTorr como mínimo. Por esto se decidió utilizar la bomba Leybold D8A que debido a su alta tasa de extracción logró llegar a una presión mínima de 10 mTorr después de 3 horas. Así se determinó que ésta era la mejor opción para trabajar con ésta cámara.

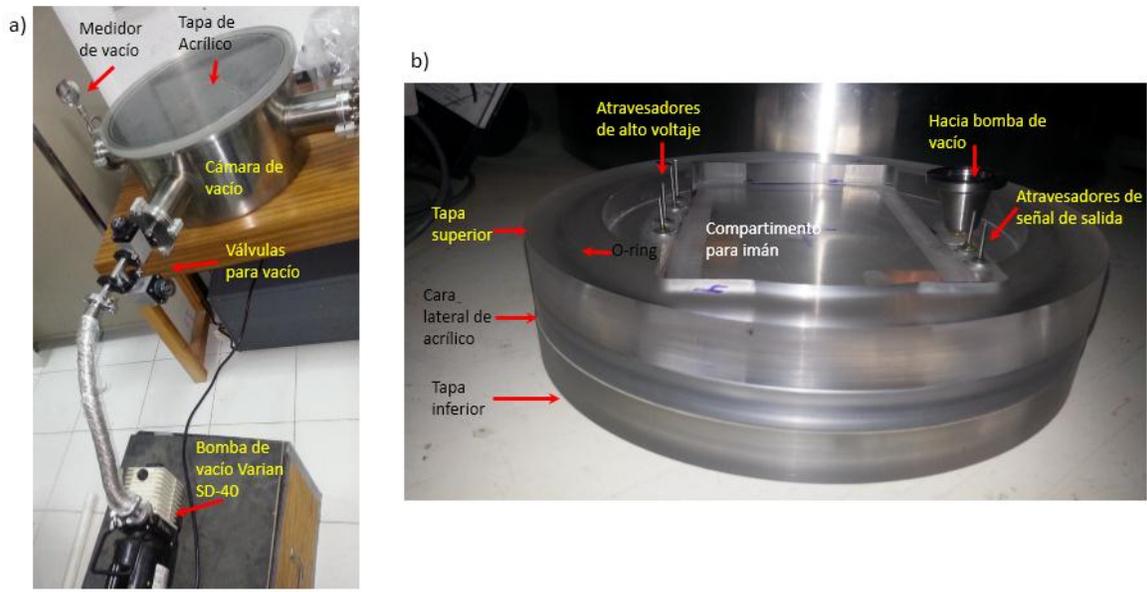


Figura 3.3. Cámaras de vacío a) fabricada con aluminio y tapa superior de acrílico b) elaborada con acrílico.

Debido a que las presiones mínimas alcanzadas dentro de la cámara de aluminio de 50 cm de diámetro eran todavía muy altas, se decidió diseñar una cámara de vacío más pequeña (de 21 cm de diámetro exterior y 17 cm de diámetro interior). Así se redujo el volumen de aire que se tenía que extraer de la misma. La cámara fue construida en el taller mecánico del laboratorio, utilizando acrílico por ser un material que además de ser fácilmente maquinable, también es resistente y su tasa de desgasificación en el vacío es del orden de $1 \times 10^{-6} \frac{\text{Torr l}}{\text{cm}^2 \text{ seg}}$ (Dayton, Relations between size of vacuum chamber, outgassing rate, and required pumping speed, 1960). Esto permite utilizarlo a un vacío de 10^{-4} Torr sin que comience a desgasificar. Su propiedad de transparencia permitió visualizar las descargas disruptivas del aire residual, en caso de existir. Se le colocaron atravesadores. Se trató de conectores para voltaje llamados así pues pasan desde el exterior hasta el interior de la cámara de forma hermética, para conservar el vacío dentro de la misma. Además, permite conectar el voltaje necesario de los componentes internos que lo requieran, gracias a que son de acero que es conductor y cuya tasa de desgasificación tiene una magnitud pequeña de $5 \times 10^{-7} \frac{\text{Torr l}}{\text{cm}^2 \text{ seg}}$ (Dayton, Relations between size of vacuum chamber, outgassing rate, and required pumping speed, 1960). También se le instaló una boquilla especial, maquinada igualmente en el taller, a la cual se le conecta la bomba de vacío herméticamente, para que no existan fugas de aire hacia el interior. De acuerdo a las mediciones

hechas sobre la distribución del campo magnético y luego de determinar que en el gap de 2.5 cm tiene mayor uniformidad, se le maquinaron cavidades del tamaño de los imanes tanto a la tapa superior como a la inferior de la cámara. De esta manera se garantizó que el gap entre los imanes fuera el acordado y se encuentren ubicados en el mismo lugar en ambas tapas para proporcionar un campo con la mayor uniformidad posible. Las dos tapas que componen ésta cámara están colocadas sobre un anillo, también de acrílico. Las uniones se sellan con anillos de neopreno llamados o-rings que van montados dentro un alojamiento especial hechos a medida y que ayudan a mantenerlos en su lugar. Para construir dichos alojamientos se siguieron las siguientes recomendaciones del fabricante:

- Medir la sección transversal W del o-ring.
- La profundidad L del alojamiento será del 80% de la magnitud de W .
- El ancho G del alojamiento será el 115% de W , de modo que al aumentar la presión de la tapa sobre el o-ring, este último tenga suficiente espacio para expandirse sin dañarse.
- Las esquinas tanto superiores como inferiores del alojamiento deberán tener un chaflán (reducción de esquinas) de tal forma que tengan un ángulo de 5° respecto a la vertical.

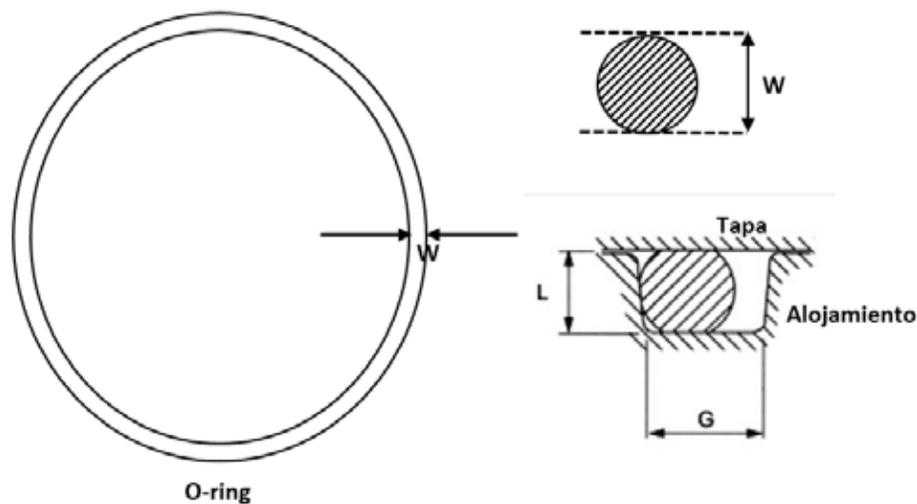


Figura 3.4. Disposición de o-ring dentro del alojamiento.

El diámetro transversal del o-ring que se usó para la cámara de acrílico fue de 0.35 cm , por lo que su alojamiento se construyó con 0.28 cm de profundidad y 0.4 cm de ancho para no dañar el o-ring y asegurar el sellado de la cámara. Para este experimento se utilizó la bomba Leybold D8A y se

logró alcanzar una presión mínima de 1×10^{-4} Torr, lo cual es bastante cercano a la presión necesaria para acelerar a los electrones (ver ecuación 2.5).

También se construyó una cámara de vacío de menor tamaño con una forma cilíndrica, cuya pared lateral y la tapa superior eran de acrílico, mientras que la base fue de aluminio, con diámetro de 10 cm en la base y una altura de 12 cm. En ésta nueva cámara, fue posible alcanzar una presión de 6.5 mTorr en promedio. Aunque es una presión mayor a la de la anterior cámara de acrílico, ésta sirvió para realizar pruebas del camino libre medio de los electrones emitidos por un filamento de tungsteno construido en el laboratorio y de un cañón de electrones de un cinescopio.

3.3. Cañón de Electrones.

3.3.1. Tubo de Acrílico.

Como soporte del primer prototipo se utilizó un tubo de acrílico. Este tubo tenía en sus extremos tapas de cobre de tal manera que sus caras planas estuvieran frente a frente y funcionaran como electrodos. En el arreglo que se muestra en el diagrama de la figura 3.5 se observa que el cátodo es más largo que el ánodo y dentro de él se encuentra un filamento que genera electrones termoiónicos. Éste filamento se extrajo de bombillas incandescentes para faros de automóvil. Estos soportan hasta 12 V y tienen una potencia de 16 W. Los electrodos se montaron sobre tapones de hule para que sellaran las salidas de aire. A una de las tapas de cobre se le perforó un hoyo con una medida de 1/8" de diámetro para que funcionara como colimador de los electrones emitidos por el filamento, que estaba colocado dentro y así, servía para producir el haz. El ánodo se montó en el tubo de manera que fuera móvil para cambiar la separación que tenía del cátodo y así medir con el amperímetro la corriente de electrones. Esta corriente corresponde al total de electrones que viajan por el vacío y llegan al ánodo. Se estableció entre los electrodos, una diferencia de potencial (voltaje de aceleración) de 1500 V con la fuente de alto voltaje.

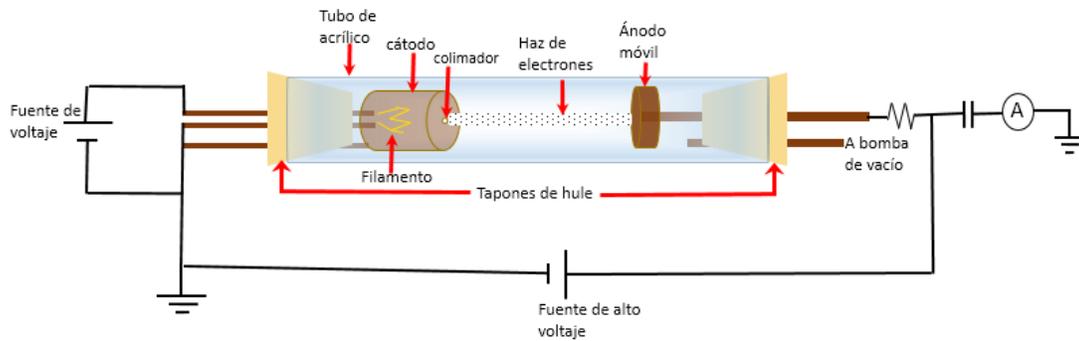


Figura 3.5. Cañón de electrones fabricado con un tubo de acrílico, la resistencia conectada al ánodo permite extraer los electrones y el capacitor filtra la señal en CD de la fuente de 1500 V para poder medir únicamente la corriente de electrones que llega al ánodo.

Conectar el colimador al polo negativo de las fuentes de voltaje provoca que los electrones sean repelidos de las paredes que rodean al filamento. Así, el único lugar por el que salen es el orificio de 1/8" de diámetro. Esto produce un haz de electrones dirigido hacia el ánodo. Tras hacer las conexiones necesarias en el sistema se le hizo vacío hasta que alcanzó la presión mínima de 65 mTorr dentro del tubo. Luego se aplicó un voltaje de aceleración de 1500 V y 10 V para encender el filamento. Se realizaron mediciones de la corriente captada moviendo el ánodo para cambiar su distancia al cátodo, comenzando con un gap de 5 cm.

3.3.2. Cinescopio.

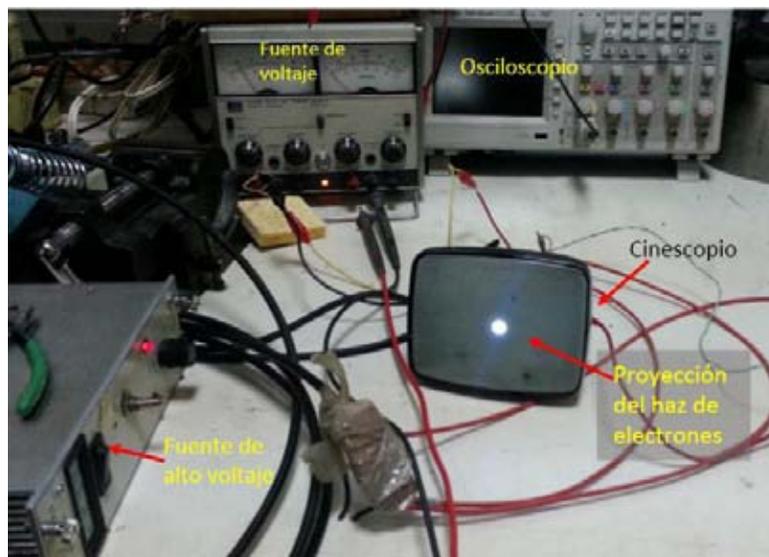


Figura 3.6. Conexiones de cinescopio aislado en el laboratorio.

La estructura del sistema con el tubo de acrílico se basa en el principio de funcionamiento de un cinescopio. En él, los electrones son emitidos por el filamento y acelerados linealmente entre electrodos dispuestos a una alta diferencia de potencial. Es por eso que se extrajo esta pieza tan esencial de un televisor de 5" y se estudió el funcionamiento de su cañón de electrones. Esto permitió determinar el tipo y la magnitud del voltaje utilizado en cada uno de los pines del mismo, mediante la observación directa del haz que se proyectaba en la pantalla como el que se observa en la figura 3.6. Después todo esto se implementó en el Microtrón como la fuente de electrones. Esencialmente el cañón está compuesto por un filamento calefactor conectado a 11 V que, como su nombre lo indica, calienta al cátodo para que emita los electrones (a diferencia del sistema del tubo de acrílico en el que los electrones eran extraídos directamente del filamento). Estos viajan a través de anillos concéntricos que, conectados a una alta diferencia de potencial (en el laboratorio se realizó con 850 V pues no se utilizó su máxima potencia que es de 5000 V), ayuda a acelerar a los electrones. Este es el primer contacto que se tiene con el arreglo de varios ánodos que después será usado dentro del Microtrón. Se observó que mientras más grande era el voltaje del cátodo, la intensidad era mayor, a juzgar por el brillo de la imagen en la pantalla. Se apreció también que si el colimador tenía mayor voltaje positivo, el tamaño de la imagen era mayor a que si el voltaje era cercano 0 V.

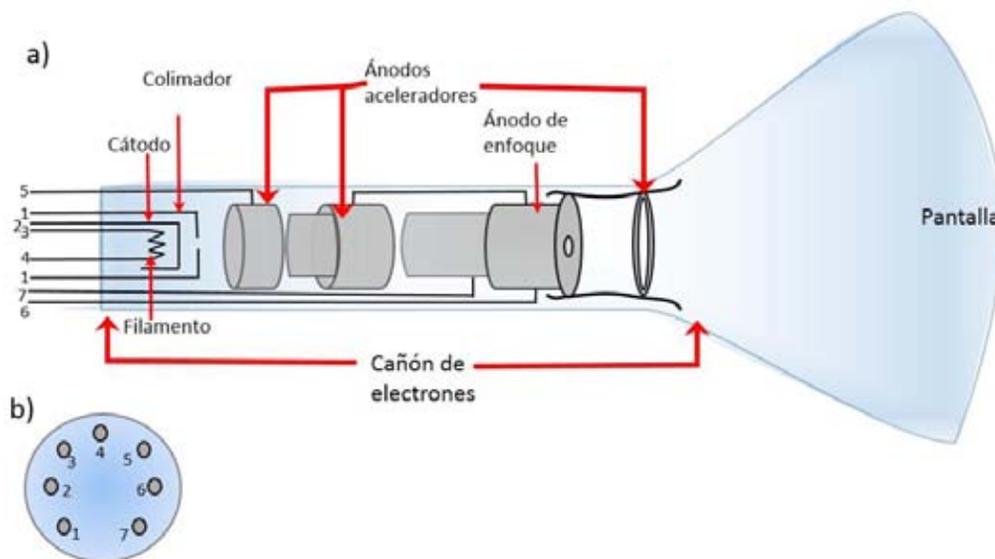


Figura 3.7. a) Estructura de un tubo de rayos catódicos de un cinescopio. Los ánodos aceleradores se conectan a una fuente de alto voltaje mediante los pines 1, 5, 6 y 7 y también sirven para enfocar el haz. El cátodo, mediante un voltaje variable con el pin 2, ayuda a cambiar la intensidad del haz, los pines 3 y 4 se conectan a una fuente de voltaje para encender el filamento b) Vista trasera del arreglo de los pines fuera del cañón.

3.3.3. Cañón de Electrones en Cámara de Aluminio.

Con la noción de los voltajes necesarios para generar un haz de electrones dentro del cinescopio, se decidió separar el cañón de aquel y utilizarlo en la cámara de vacío de 50 cm de diámetro. Se maquilaron tapas del tamaño de los brazos de la cámara (figura 3.8a). En ellas se colocaron conectores atravesadores especiales para vacío, con los que sería posible conectar el cañón de electrones a las fuentes de voltaje. Igualmente, se limpiaron con alcohol isopropílico el cañón, cables, interior de la cámara y conectores para minimizar la evaporación de residuos que contaminaran el vacío.

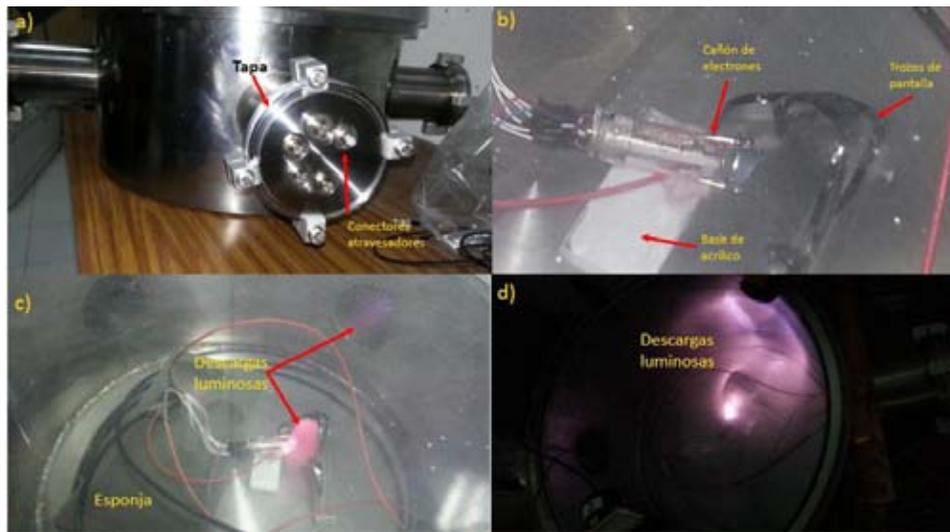


Figura 3.8. a) Tapa de conectores atravesadores montada en brazo de cámara de vacío. b) Cañón de electrones y trozos de la pantalla del osciloscopio. c) Descargas luminosas rojiza (abajo) y violeta (arriba) dentro de la cámara de vacío. d) Descarga luminosa violeta afectada por un imán colocado fuera de la cámara.

Para evitar que partes metálicas del cañón tocaran la cámara, se colocó como lo muestra la figura 3.8b, sobre un pequeño soporte de acrílico maquillado también en el taller del laboratorio. Frente a éste cañón se colocaron trozos de la pantalla del cinescopio, que servirían como blanco. En él los electrones que pegan sobre el fósforo producen pequeños destellos de luz. Para hacer las conexiones en el interior de la cámara se utilizó cable con recubrimiento de teflón (de color blanco en la figura 3.8c), pues su tasa de desgasificación es de $4.6 \times 10^{-7} \frac{\text{Torr l}}{\text{cm}^2 \text{ seg}}$ (F. Markley, 1962), la cual se encuentra entre las tasas más bajas. Pero por otro lado, se utilizó una esponja de hule espuma como

soporte al cañón de electrones. Una vez hechas las conexiones de la bomba con la cámara y sus respectivas válvulas, se encendió la bomba *Varian SD-40*, para hacer vacío. Se logró alcanzar una presión de solamente *200 mTorr*. La capacidad de la bomba se vio excedida por las fugas que tenía la cámara, pues para alcanzar tal presión fueron necesarias 36 horas aproximadamente. Motivo por el que se decidió utilizar la bomba *Leybold D8A*, con la que se obtuvo un vacío de *10 mTorr*, en cuestión de 24 horas.

Ya con una presión cercana al alto vacío se decidió suministrar al filamento con un voltaje de *10 V*, haciendo que brillara al rojo vivo. Esta vez no se observó la aparición de hollín dentro de la cámara, puesto que el filamento no se oxidó tan rápidamente como en el caso anterior. Con estas condiciones se suministró voltaje hasta llegar a *600 V*, donde comenzaron a aparecer descargas de voltaje que como se observa en la imagen de la figura 3.8c. Cerca del cañón, éstas son de color rojizo, mientras que las que se producen en otro lugar de la cámara son de un color violeta. Conservando la misma presión dentro de la cámara, se aumentó a *750 V* con la fuente de alto voltaje. En esta ocasión las descargas fueron más grandes y, a diferencia de las anteriores que eran muy esporádicas y repentinas, éstas se mantuvieron y se presentaron en más secciones dentro de la cámara de vacío. Estas descargas impidieron obtener un haz de electrones libres dentro del sistema, que se impactaran con los blancos colocados enfrente del cañón. Por lo anterior, se decidió no implementar éste cañón de electrones y utilizar otra cámara de vacío más pequeña en la que el volumen de aire a desalojar fuera mucho menor al de esta cámara y así lograr caracterizar a un haz de electrones, producido por un sistema más sencillo de emisión.

3.4. Obtención y Caracterización de Corriente de Electrones Termoiónicos en Cámara de 10 cm de Diámetro.

Es fundamental conocer la corriente de electrones que se puede obtener de un filamento de tungsteno mediante emisión termoiónica y analizar las diferentes configuraciones de electrodos que permiten tener una mayor cantidad de electrones que viajan por el vacío, para implementarlo en el sistema de emisión del prototipo de Microtrón. Por esta razón, se utilizó la cámara de *10 cm* de diámetro en la base, donde se alcanzó una presión de 6×10^{-3} Torr en promedio. Una fotografía de dicho sistema se muestra en la figura 3.9. La tapa inferior contiene conectores atravesadores aislados eléctricamente para que no hagan contacto con esta tapa, ya que es de aluminio. Se utilizaron 2 atravesadores. Uno de ellos para conectar el filamento de tungsteno, otro más se utilizó para fijar un

cilindro de cobre que primero serviría como colector de los electrones emitidos por el filamento encendido. Después sirvió como un colimador para emitir un haz hacia una pequeña lámina de cobre colocada a 2 cm del filamento. Ésta se conectó al amperímetro mediante otro atravesador. El amperímetro usado fue de la marca Keithley modelo 480, que de acuerdo a los datos del fabricante (Keithley-Instruments, 1990), el rango de corriente que puede medir va desde 10^{-3} A hasta 1×10^{-12} A. También se construyó un cubo hecho de lámina de cobre y se conectó a uno de los atravesadores de la cámara de tal forma que dentro de él se encontraba el filamento, pero sin hacer ningún contacto eléctrico (figura 3.10b), lo que permitiría medir la corriente de todos los electrones emitidos por el filamento.

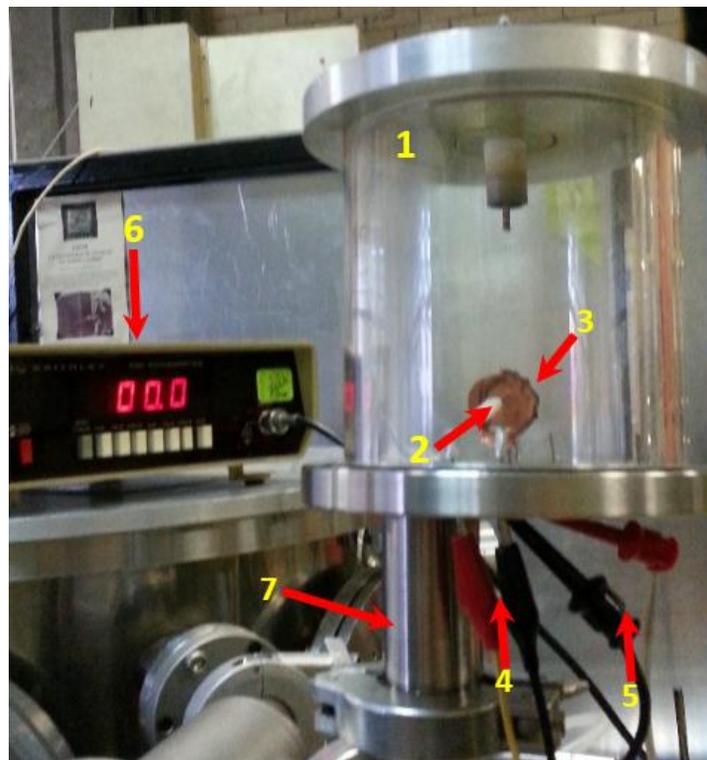


Figura 3.9. 1) Cámara de vacío de 10 cm de base y 12 cm de altura, 2) Filamento, 3) Colector de electrones, 4) Conexiones de voltaje de alimentación del filamento, 5) Señal de salida, 6) Amperímetro, 7) Conducto hacia bomba de vacío.

Para optimizar la emisión de electrones, se fabricaron filamentos hechos de alambre de tungsteno puro, con una configuración como la que muestra la figura 2.4a. Ahí se observa cómo se

calienta directamente el filamento conectándolo a una fuente de voltaje que proporcione una alta corriente. Para tener como referencia la magnitud de toda la corriente electrónica emitida, se utilizó primero el cubo de cobre exhibido en la figura 3.10b. En la gráfica 4.8 se muestra la variación de la corriente de los electrones termoiónicos que llegan al cubo, conforme la corriente que pasa por el filamento aumenta.

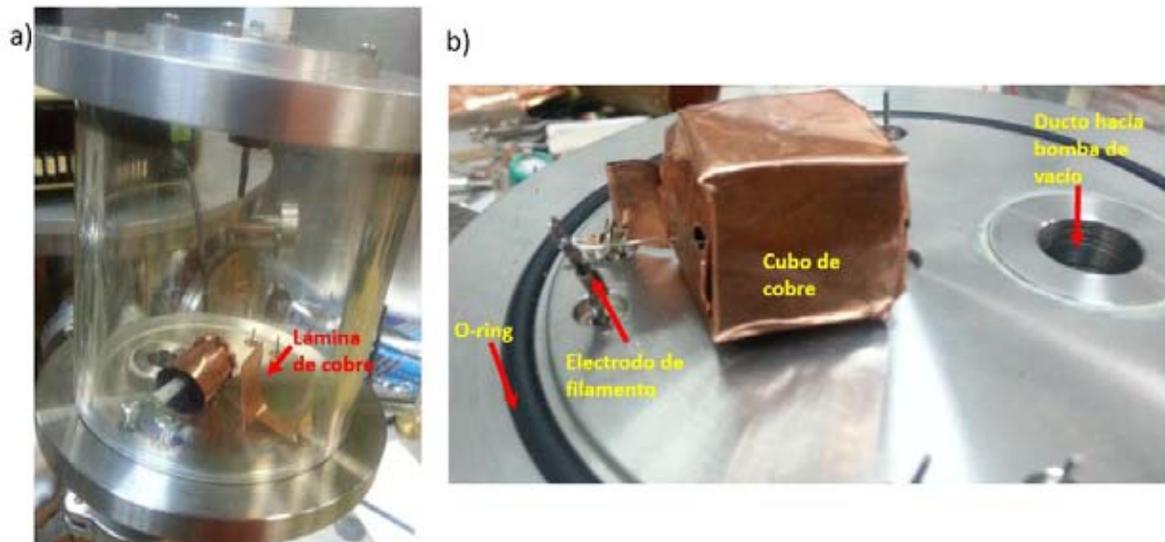


Figura 3.10. a) Arreglo para captar electrones a 2 cm de distancia en el vacío, b) arreglo con cubo de cobre como colector de electrones.

3.5. Prototipo de Acelerador de Electrones con Cámara de Vacío de Acrílico.

Con el experimento anterior se probó que es posible tener dentro de una cámara de vacío un haz de electrones que viaje a través del medio para medir su corriente en un amperímetro. Entonces se recurrió a la cámara construida con un diámetro interno de 17.5 cm como la de la imagen de la figura 3.3b. Los componentes necesarios para el acelerador de electrones se montaron en los conectores atravesadores adheridos con pegamento epóxico en la tapa superior de la cámara. Esa distribución se muestra en la figura 3.11. El filamento se conectó mediante terminales, del tipo que se utilizan para conectar los pines de los bulbos, los atravesadores, para después conectarlo a una fuente de voltaje similar a la utilizada en el experimento anterior. Las mallas paralelas que forman parte del sistema de aceleración se soldaron con una “punteadora”, para sujetarlas a los atravesadores con una distancia entre ellas de 1 cm. Una punteadora es una soldadora que solo utiliza una descarga eléctrica en el punto de contacto entre sus electrodos de tal forma que funde el

metal que se desea unir sin necesidad de usar soldadura, pues ésta empeora las condiciones de vacío. Las mallas soldadas a los atravesadores, se conectarían después a la fuente de alto voltaje para crear el campo eléctrico entre ellas que aceleraría a los electrones funcionando así como la cavidad aceleradora de un Microtrón. Un cilindro se montó sin sus tapas circulares, debido al poco espacio disponible. Como el colimador se utilizó un orificio de $1/16''$. Se colocó de manera que quedara flotado para realizar algunos experimentos que más adelante se explican. También se colocó una pequeña lámina de cobre que sería el sistema de extracción. Éste se situó en el extremo opuesto a las mallas paralelas para permitir que la órbita de los electrones acelerados fuera la mayor posible dentro de esta cámara.

Posteriormente, se conectó a la bomba de vacío *Leybold D8A*, y una vez que se verificaron que los conectores atravesadores estuvieran bien colocados, se le hizo vacío. En esta parte del experimento, fue muy importante la correcta construcción de los alojamientos de los o-rings, puesto que la cámara se comprimía considerablemente (alrededor de 1 cm) lo que podía provocar que los o-rings se dañaran y no sellaran correctamente. Estos, soportaron la presión generada por el exterior al alcanzar un vacío menor a $1 \times 10^{-3}\text{ Torr}$ en el interior de la cámara. No se puede reportar exactamente ésta magnitud puesto que el valor mínimo en la escala del único medidor de vacío disponible era de $1 \times 10^{-3}\text{ Torr}$ pero puede estar muy cercano a los $3 \times 10^{-4}\text{ Torr}$ que es la mínima presión que alcanza ésta bomba.

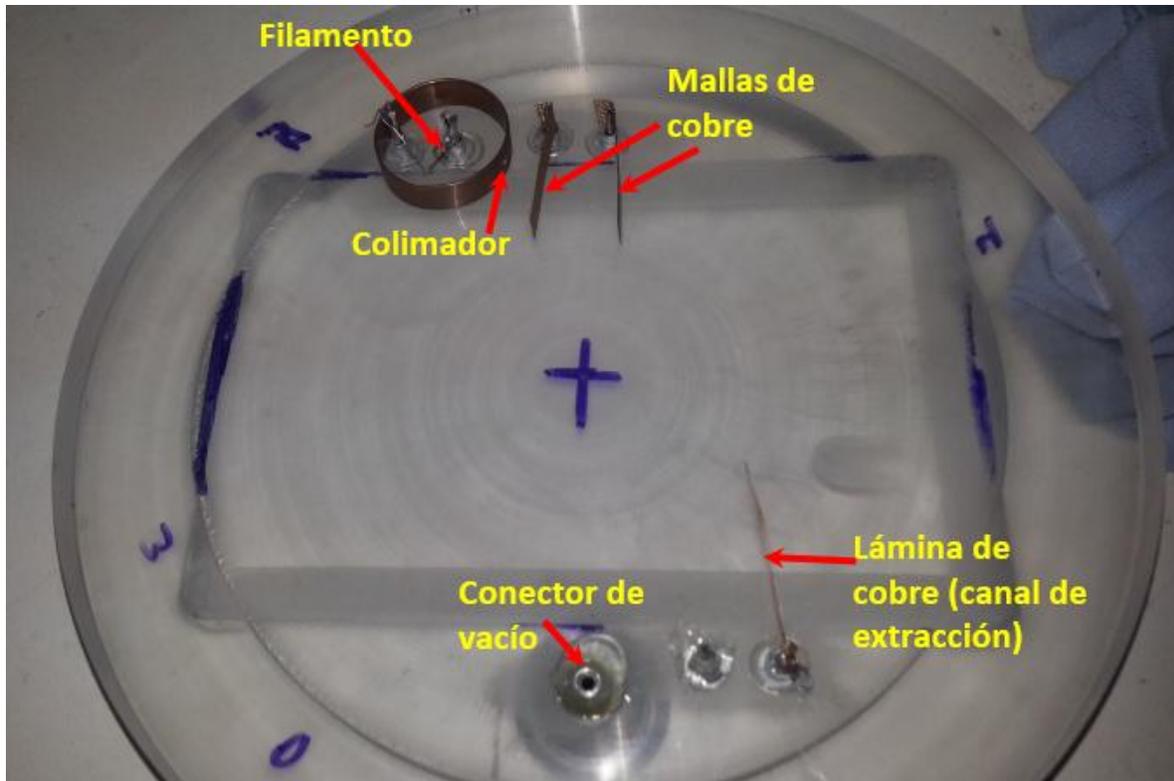


Figura 3.11. Componentes internos del acelerador de electrones en la cámara de 17.5 cm.

Inicialmente se colocó el colimador flotado. De acuerdo a los resultados de la sección anterior para el cilindro abierto y flotado, se obtuvo la mayor corriente en canal de extracción de los electrones, como lo muestra la imagen de la figura 3.11. También se montó en el atravesador más cercano al filamento (a una distancia de 1 cm) una pequeña placa de cobre que estaba conectada al amperímetro Keithley 480. Lo anterior, con el fin de analizar la magnitud de la corriente proveniente del filamento en esa configuración. Ya con las mejores condiciones de vacío dentro de este sistema ($\sim 1 \times 10^{-3}\text{ Torr}$), se encendió la fuente de corriente conectada al filamento para comenzar la emisión de los electrones. El arreglo para este experimento es el de la figura 3.12. Se aumentó gradualmente el voltaje de la fuente para incrementar la corriente que pasaba por el filamento y con esto emitir más electrones termoiónicos. Los resultados se muestran en la gráfica 4.15.

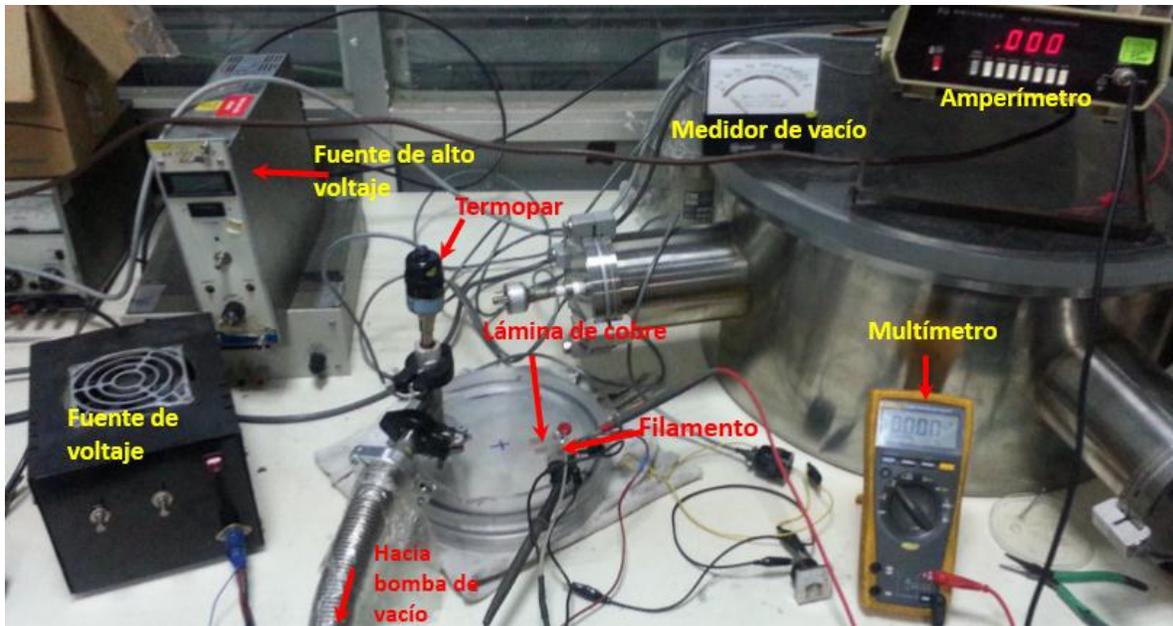


Figura 3.12. Arreglo experimental para medir la corriente de electrones dentro del filamento.

Debe notarse de la gráfica 4.15, que alrededor de los 6 V la corriente de electrones termoiónicos comienza a disminuir. Esto coincide con el hecho de que, al llegar a dicho voltaje, el filamento se encontraba a una temperatura tan alta que comenzó a quemar el interior de la cámara como se ve en la figura 3.13a. Los gases liberados contaminaron el vacío del sistema. Para solucionarlo, se colocaron láminas delgadas de acero en las paredes de la cámara que se encontraban más próximas al filamento para evitar que se quemara (figura 3.13b). Si se comparan los resultados de la gráfica 4.13 con los de la gráfica 4.15 se observa que a pesar de estos problemas, la corriente obtenida en este último experimento tenía magnitudes mayores a las que se obtuvieron en la cámara de 10 cm de diámetro.

Teniendo en cuenta que la fuerza debida al campo magnético ayudaría en gran medida a orientar a los electrones tanto del haz, como los que son emitidos en otras direcciones, se decidió colocar los imanes en los compartimentos especialmente maquilados para tal fin, sobre y debajo de la cámara de vacío (figura 3.3b), para analizar la corriente (gráfica 4.16) que en esta ocasión llegaba al canal de extracción que se coloca junto al filamento.

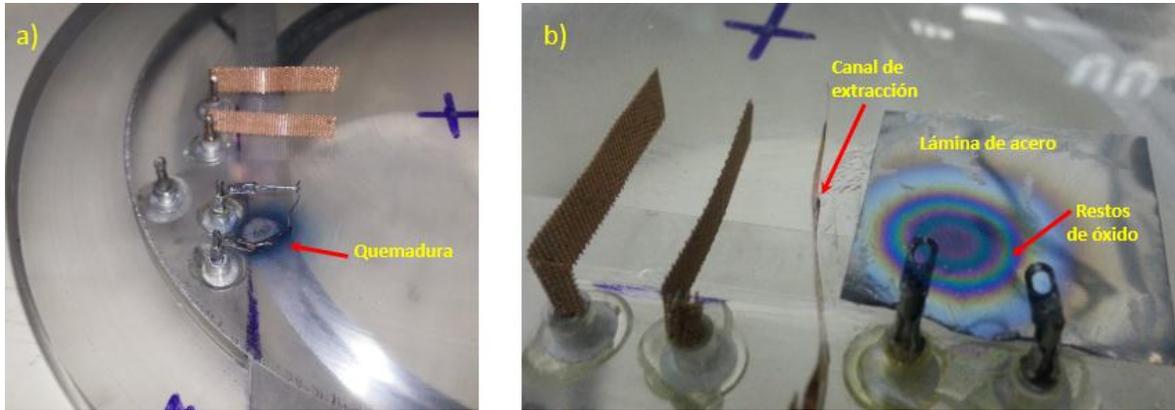


Figura 3.13. a) Quemadura en una de las paredes de la cámara debido a la alta temperatura alcanzada por el filamento. b) Una de las láminas de acero adherida la pared de la cámara, los círculos que se observan son residuos de óxido causados por el filamento.

La fuente de voltaje utilizada para encender el filamento no fue suficiente dado que la cantidad de corriente demandada por el filamento era demasiada ($\sim 2\text{ A}$). Así se construyó una fuente de voltaje cuya capacidad de corriente fuera mayor. Principalmente se utilizó un arreglo electrónico que consistió en: un transformador para bajar el voltaje de línea (120 V) a 10 V que basta y sobra para este experimento; un puente de diodos para convertir la señal de AC en DC; un arreglo de capacitores de valores muy altos (alrededor de $33\ 000\ \mu\text{F}$) para filtrar el ruido que genera el voltaje en AC que proviene del transformador; y un Variac como regulador de voltaje y que permite tener una alta corriente en el circuito. El montaje se puede apreciar en la figura 3.14. Al realizarse las pruebas para verificar su funcionamiento, se comprobó que no se afectó el desempeño del filamento para emitir electrones. Entonces se prosiguió con el experimento y los resultados de las corrientes medidas en la presencia del campo magnético se exhiben en la gráfica 4.16.

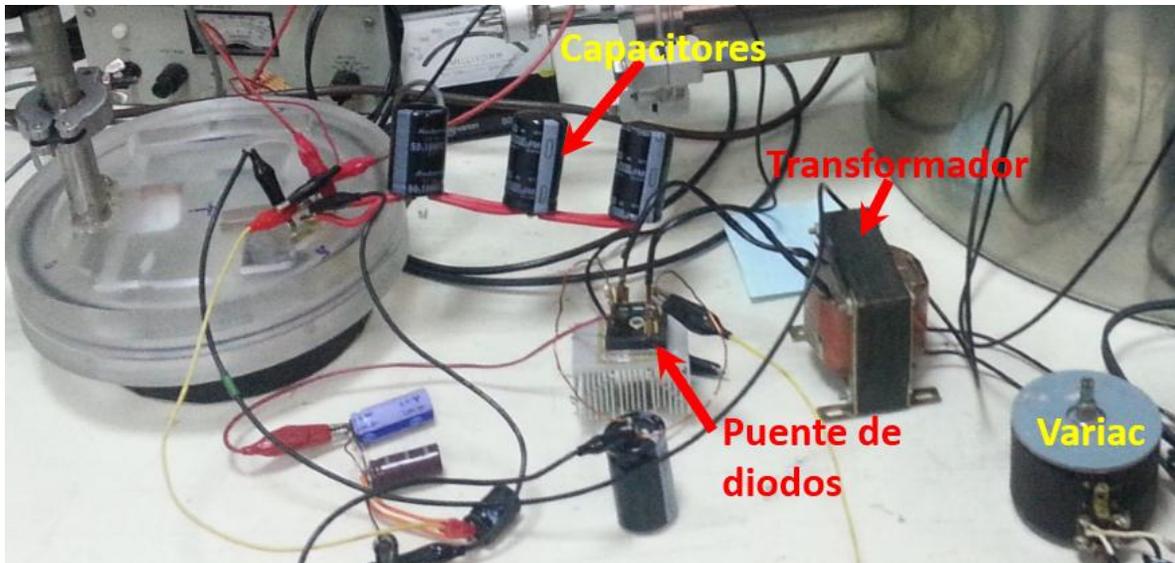


Figura 3.14. Arreglo de fuente de voltaje para filamento.

Cabe hacer mención de que las láminas de acero colocadas en las paredes cercanas al filamento redujeron en gran medida la contaminación del vacío. Esto contribuyó también a obtener una corriente mucho mayor en la lámina de cobre a donde se conectó el amperímetro. Al comprobar que es posible lograr una emisión alta de electrones, el siguiente paso consistió en colocar el sistema de extracción en el extremo opuesto a los electrodos como se observa en la figura 3.11 y colocar las mallas, junto al filamento para aplicarles el alto voltaje necesario para acelerar a los electrones termoiónicos.

Una vez que se logró la configuración adecuada de las fuentes tanto de alto como de bajo voltaje, así como la de los componentes internos de acelerador, se le hizo vacío a la cámara. Cuando se obtuvo a una presión aproximada de 1×10^{-3} Torr, se suministró el alto voltaje a las mallas equipotenciales, que como ya se había mencionado, se encontraban con un gap de 1 cm. Se observó que descargas luminosas aparecían entre las mallas, al llegar a un voltaje de 1460 V, como se exhibe en la figura 3.15. Dichas descargas eran de un color violeta más uniforme que en la cámara de 50 cm de diámetro.

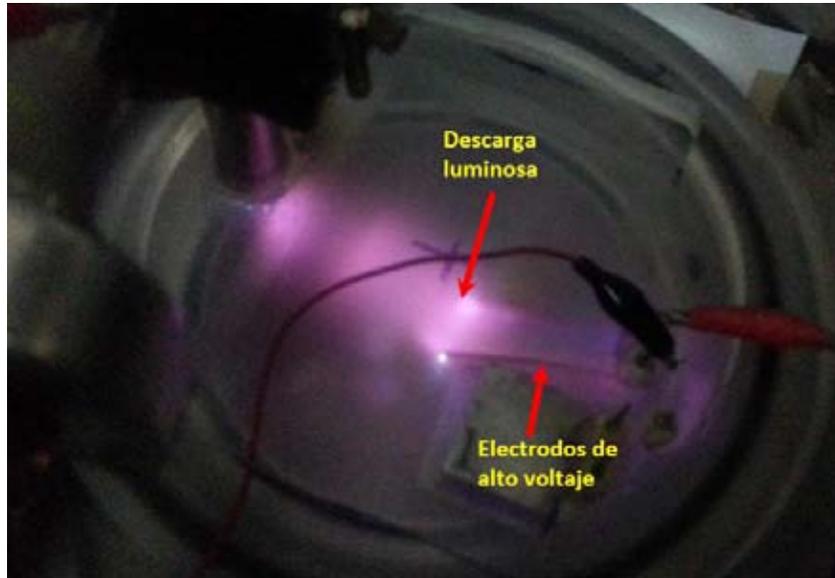


Figura 3.15. Descargas luminosas creadas al aplicar alto voltaje en los electrodos (mallas).

Puesto que las descargas luminosas eran inminentes se decidió realizar un análisis de la presión a la cual aparecían y con qué voltaje se producían. De esta manera se esbozó un gráfico similar a la curva de Paschen. Así se obtuvieron las condiciones de voltaje y presión a las que se podrían trabajar en este sistema en particular. A partir de la presión atmosférica se fue bajando la presión paulatinamente. Mientras que el alto voltaje se incrementaba hasta que se produjera una descarga. Una vez que sucedía esto, se reducía una vez más la presión y el voltaje se ajustaba hasta que se volviera a producir otra descarga. Este procedimiento se repitió hasta que se llegó a la mínima presión alcanzada en el sistema ($\sim 1 \text{ mTorr}$) y con ello se obtuvo la siguiente gráfica (Gráfica 4.17).

El siguiente proceso consistió en colocar los imanes en los compartimentos de la cámara y encender tanto la fuente de las mallas paralelas, como la fuente que alimentaba al filamento para comenzar la emisión de electrones. Luego se conectó el amperímetro al canal de extracción el acelerador, y se midieron cantidades muy pequeñas de corriente, del orden de décimas de picoamperes. Al momento de manipular los instrumentos para tratar de medir la corriente que llegaba al canal de extracción, se observó también que si se movían los imanes de los compartimentos de la cámara, la corriente aumentaba pero volvía a disminuir una vez que los imanes quedaban fijos nuevamente.

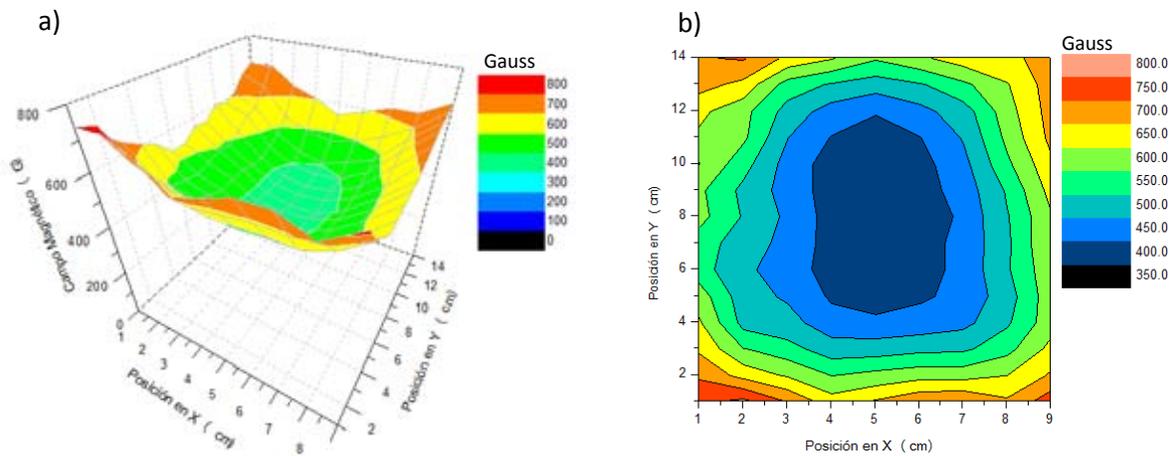
Para comprobar que los electrones estaban siendo acelerados, (después de las mallas aceleradoras) se colocó una tira de $1 \times 3 \text{ cm}$ de una bolsa de plástico delgado, justo después de dichas mallas, de tal forma que el haz de electrones chocara con esta tira después de ser acelerados. A éstas mallas se les aplicó una diferencia de potencial de 1000 V , bajo la premisa de que si los electrones tenían la energía de aproximadamente 1 KeV , podrían provocar algunas pequeñas quemaduras sobre el hule. Una vez hecho ésta prueba el hule quedó intacto.

CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

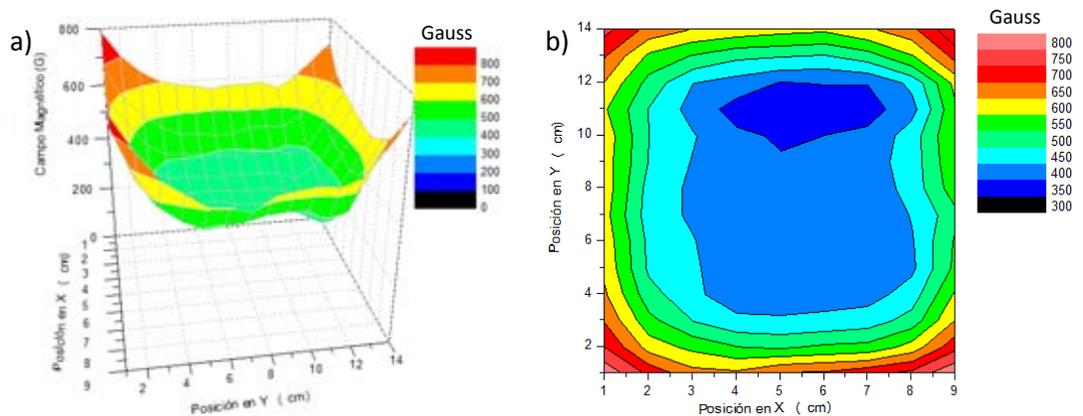
4.1. Campo Magnético.

4.1.1. Medición Directa Sobre Imán.

A continuación, en las gráficas 4.1a y 4.1b, se exhiben los resultados de las mediciones del campo magnético, hechas con el sensor de Efecto Hall directamente sobre el polo sur de un imán. En las gráficas 4.2a y 4.2b, las del polo norte del imán.



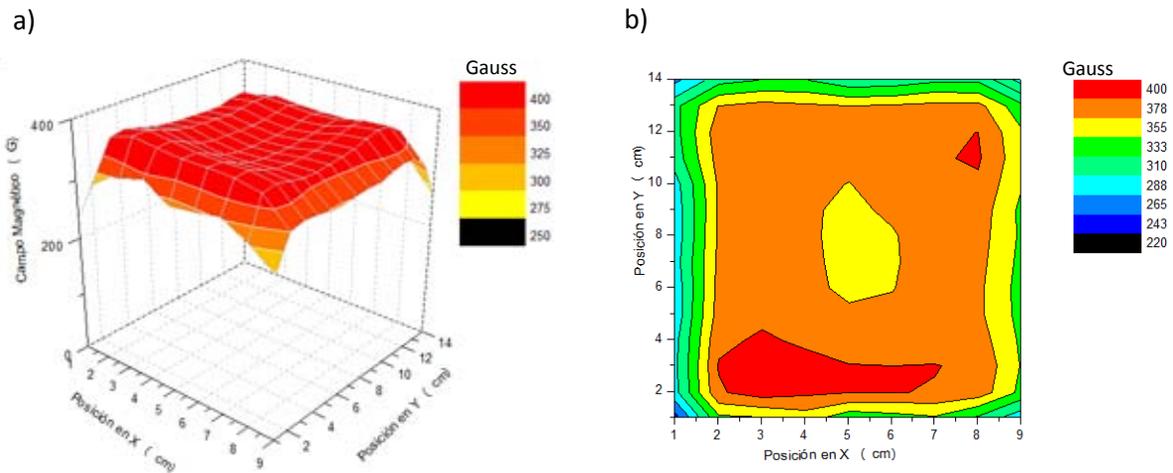
Gráfica 4.1. Curvas de nivel del campo magnético en el polo sur de imán a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.



Gráfica 4.2. Curvas de nivel del campo magnético en el polo norte de imán a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.

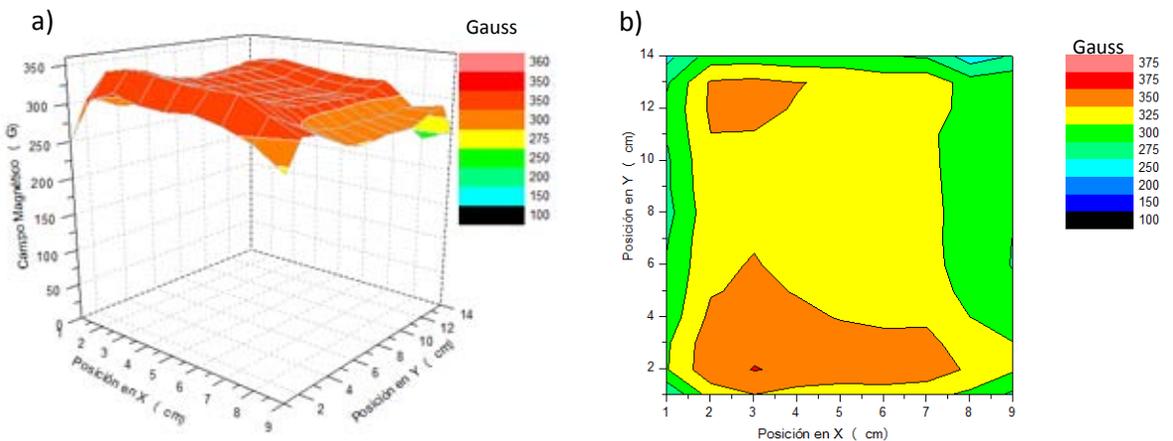
4.1.2. Medición del Campo en un Solo Imán con Placa de Acrílico.

A continuación se muestran los resultados del promedio de mediciones en las que entre el imán y el sensor hall existe una placa uniforme de acrílico que cubre por completo el imán, con el fin de comparar la variación del campo cuando no se tiene el acrílico.



Gráfica 4.3. Curvas de nivel del campo magnético en el polo sur del imán con placa de acrílico a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.

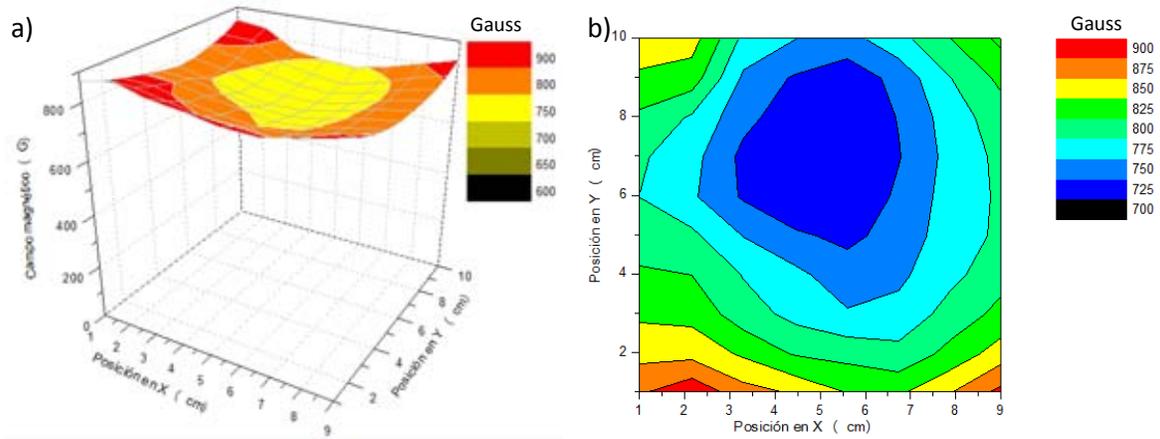
En el polo norte del imán se realizan las mediciones del campo magnético, para saber de cuanta es la diferencia con respecto a las mediciones al polo opuesto.



Gráfica 4.4. Curvas de nivel del campo magnético en el polo norte del imán con placa de acrílico a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.

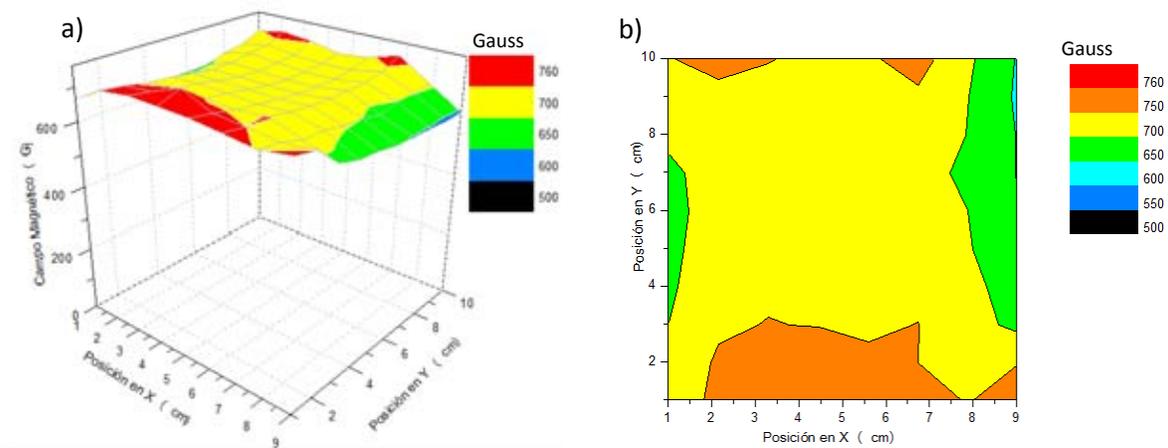
4.1.3. Medición del Campo en el Gap de 2 Imanes sin Placa de Acrílico.

Después de hacer mediciones en un solo imán, se midió del campo magnético entre 2 imanes separados a diferentes distancias. Esto permite analizar la distribución del campo a la que estarían sometidos los electrones dentro del Microtrón. En las siguientes gráficas 4.5a y 4.5b, se muestran los resultados de las mediciones en el gap, manteniendo el sensor en la mitad de dicho gap.



Gráfica 4.5. Curvas de nivel del campo magnético en el gap de 2 cm de dos imanes a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.

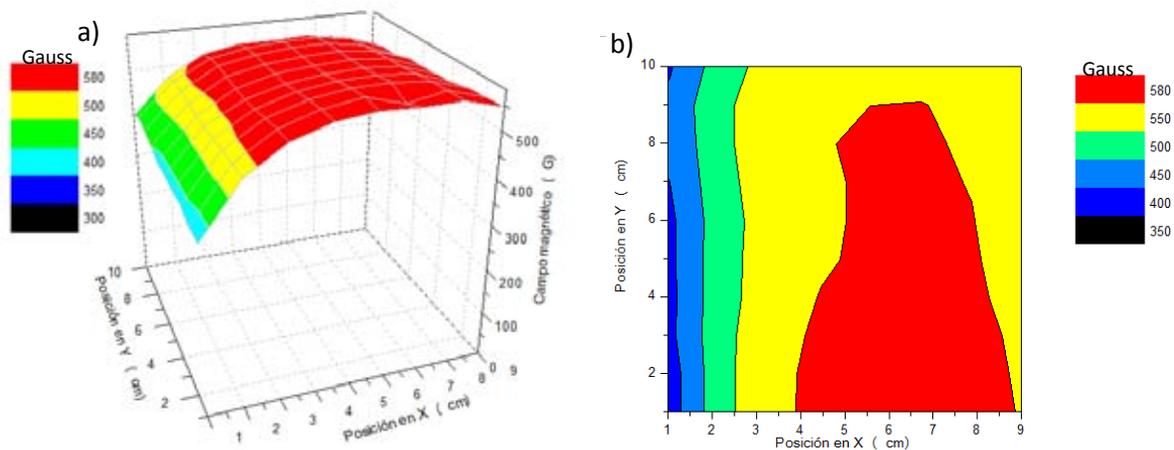
A continuación se muestran las gráficas 4.6a y 4.6b con las mediciones del campo magnético para un gap más grande que el de las gráficas 4.5. Esto permite observar cuanto afecta la distancia entre los imanes a la uniformidad y magnitud del campo.



Gráfica 4.6. Curvas de nivel del campo magnético en el gap de 2.5 cm de dos imanes a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.

4.1.4. Medición del Campo magnético en el Gap de 2 Imanes con Placa de Acrílico.

En las gráficas 4.3 y 4.4 se puede observar el efecto que tiene la placa de acrílico, ya que, propicia una atenuación del campo, pero aumenta la uniformidad del mismo en algunas zonas. Buscando mantener ese mismo efecto, se colocaron las placas de acrílico de 1 cm , cada una entre los imanes. En las gráficas 3.6a y 3.6b, se observa que al aumentar la longitud del gap, el campo es más menor, aunque con menos variaciones. Debido a esto, se decidió mantener el gap de 2.5 cm , sin embargo se le suman 2 cm que corresponden a las placas de acrílico. En las gráficas 4.7a y b, se muestran los resultados obtenidos.



Gráfica 4.7. Curvas de nivel del campo magnético en el gap de 2.5 cm de dos imanes con placas de acrílico entre ellos a) perspectiva lateral b) perspectiva superior de la gráfica.

4.1.5. Análisis y Discusión de los Datos.

El electroimán que fue adquirido como primera fuente de campo magnético, era una excelente opción pues permitía ajustar el campo a la cantidad requerida para curvar las trayectorias de los electrones, además de producir un campo cerrado, esto es, que solo existan líneas de campo entre los polos del electroimán y no fuera de él. Pero se descartó su utilización en el acelerador, debido a su pequeña superficie, pues como se menciona en la sección 3.1, se trataba de un cuadro de 7 cm por lado. Por otra parte los imanes permanentes utilizados, tenían una mayor superficie pero el campo asociado era fijo y carecía de uniformidad en sus orillas, debido a los efectos de borde. Las gráficas 4.1a y 4.2a, denotan una falta de uniformidad con el aumento de las dimensiones del campo en los bordes, mientras más alejada del centro, mayor es su magnitud, pues en esos puntos la

cantidad medida en el sensor de Efecto Hall es mayor, lo que se traduce en un aumento de la densidad de campo magnético.

Por otra parte, la placa de acrílico colocada entre el imán y el sensor, atenúa el total de campo magnético medido como se observa en las gráficas 4.3 y 4.4, donde los máximos se encuentran en el centro y no en las orillas. Resultó ser un excelente material en estas pruebas y es por esto que se utilizó en el diseño final del acelerador. Su transparencia permite observar los componentes y fenómenos que ocurren al interior del sistema, pero también ayudó a tener un campo magnético más uniforme aunque de menor magnitud. Esto último se compensó con el arreglo descrito en la sección 3.1.5, al colocar los dos imanes en esa posición (uno encima del otro, separados una distancia de 2.5 cm) se hace evidente una atracción magnética entre ellos, pues sus líneas de campo orientan en una sola dirección perpendicular al plano de la superficie de cada imán y se distribuyen a lo largo del gap entre ellos, cerrando así el campo magnético en esa región, provocando que su valor aumente a los 565 G en promedio (gráfica 4.7).

4.3. Cañón de Electrones.

4.3.1. Tubo de Acrílico.

A continuación se presentan las corrientes medidas en el cañón de electrones hecho con tubo de acrílico que se describió en la sección 3.3.1.

Gap (cm)	Corriente (μA)
5	50
10	50
15	55
20	50

Tabla 4.1. Variación de la corriente obtenida respecto al tamaño del gap, conservando un voltaje de aceleración de 1500 V.

Como se puede observar en la tabla 4.1 las corrientes obtenidas son muy parecidas entre sí, lo que indica que existe un factor que no depende de la distancia que viajen los electrones, y cuyo efecto es mayor que el camino libre medio de los mismos. El hecho de que las corrientes medidas correspondan a los picos de voltaje que se producen cuando aparecen las descargas luminosas en el instante en que se ioniza el gas residual dentro del tubo de acrílico es factible, pues, de acuerdo a las curvas de Paschen de la figura 2.5, si se toma como referencia los 5 cm de distancia entre los

electrodos y el vacío de 0.065 Torr , entonces el punto en las abscisas será $0.32 \text{ cm}\cdot\text{Torr}$, corresponde a un voltaje de 400 V aproximadamente, lo cual es cercano al voltaje que se tenía cuando comenzaron a aparecer las descargas disruptivas, que tal vez pudieron haber aparecido antes pero no eran tan intensas hasta que el voltaje fue mayor. La aparición de hollín dentro del tubo se originó, como se mencionó anteriormente, por la oxidación del filamento dentro del tubo, ya que todavía existía oxígeno residual dentro del mismo. Esto causó también que el filamento se fundiera y fuera necesario cambiarlo constantemente. Ya que la descarga luminosa fue de un color rojizo, se puede corroborar que efectivamente el gas residual dentro del sistema era aire, acorde a la tabla 2.1. Este experimento fue un acercamiento inicial al comportamiento del alto voltaje en un sistema de vacío.

4.3.2. Tubo de Rayos Catódicos (Cinescopio).

El propósito del estudio hecho al cañón de electrones del cinescopio, era el de implementarlo en el prototipo del Microtrón. El conocimiento de los voltajes utilizados, permitió operarlo sin la necesidad de utilizar todos los circuitos del televisor. Con esto, fue posible emitir electrones generados por el propio filamento del cinescopio y acelerarlos hasta que se impactaran con la pantalla y se iluminara. El punto de luz en la pantalla que se observa en la figura 3.6, corresponde al haz de electrones que llega a la pantalla, y tiene esa forma pues se le quitó el embobinado que proporciona el campo magnético que permite manipular el haz para crear una imagen completa sobre la pantalla, el cual se encuentra entre ésta y donde termina el cañón de electrones. Obtener éste haz alentó su estudio dentro de una cámara de vacío que sería considerada para usarla en el prototipo del acelerador de electrones.

4.4. Cañón de Electrones en Cámara de Aluminio.

La presión obtenida dentro de la cámara de aluminio y de 50 cm de diámetro, fue de 10 mTorr , lo cual está todavía dentro del rango de un vacío medio y que pudo haber aumentado con la utilización de un mejor método de limpieza del material utilizado dentro del sistema. A pesar de que algunos de los cables utilizados tenían recubrimiento de teflón para evitar la desgasificación, el recubrimiento de otros cables como los que se conectaban hacia los conectores atravesadores y la esponja utilizada como soporte y aislante de las conexiones entre los cables y la cámara, pudieron influir para contaminar el vacío, puesto que las fugas, aunque se redujeron al mínimo, seguían existiendo. Por esto, se tomó la decisión de utilizar la bomba *Leybold D8A* se realizó bajo la premisa

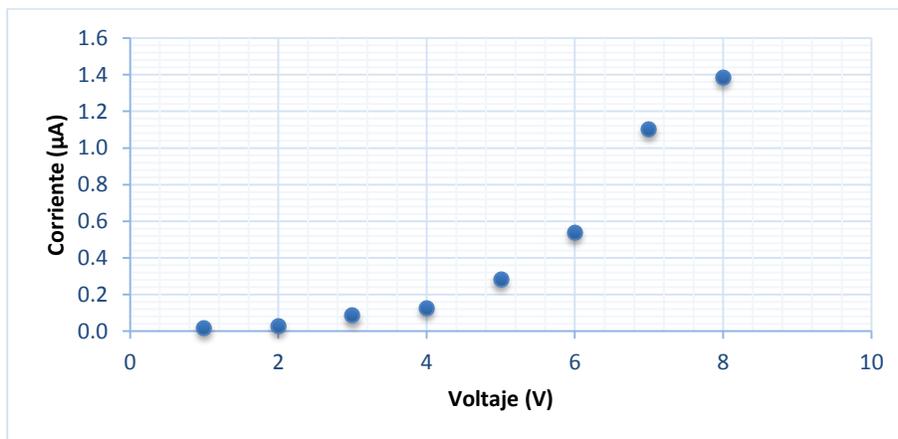
de aumentar el flujo de aire hacia el exterior de la cámara, de manera tal, que fuera mayor que el flujo de entrada de aire hacia la misma.

De acuerdo a la tabla 2.1, los colores rojizo y violeta de las descargas producidas dentro de la cámara corresponden a la ionización de aire y de argón respectivamente. Por otro lado estas descargas debieron haberse producido a voltajes mucho más altos pues con una presión de 10 mTorr y una distancia promedio entre los electrodos del cañón de electrones de 0.5 cm , corresponde el punto en el eje de las abscisas de la gráfica de la figura 2.5 a $0.005 \text{ mmHg}\cdot\text{cm}$, lo cual es mucho menor a la mínima escala pero debido al comportamiento asintótico de la curva de Paschen debió superar los 1800 V para que se produjera una descarga, pero en este sistema hubo otro factor importante, la humedad del medio, pues los valores reportados en la gráfica de la figura 2.5, se midieron en condiciones mejores de vacío donde la humedad fue prácticamente nula (Wittenberg, 1962), reduciendo el ambiente propicio para que las descargas sucedan, en cambio, si existe humedad en el medio, este es más susceptible a ser ionizado por el voltaje entre los electrodos, y este hecho hace discrepar los resultados obtenidos en el experimento a los que la bibliografía dicta.

4.5. Obtención y Caracterización de Corriente de Electrones Termoiónicos en Cámara de 10 cm de Diámetro.

4.5.1. Medición de la Corriente en Cubo de Cobre.

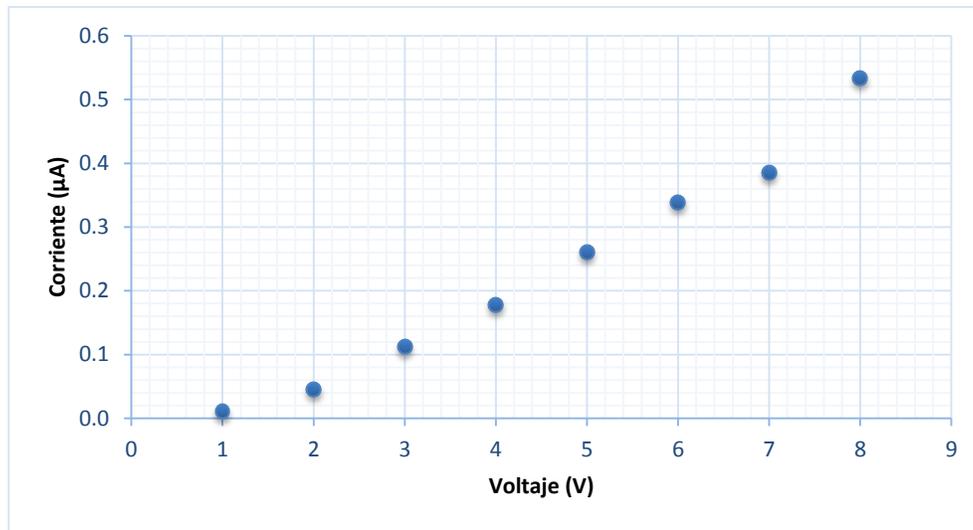
Las mediciones de la corriente hechas con el amperímetro en el cubo de cobre como se observa en la figura 3.10b, se muestran a continuación en la gráfica 4.8.



Gráfica 4.8. Corriente de electrones colectados en el cubo de cobre dentro de la cámara de vacío a una presión promedio de 5.8 mTorr .

4.5.2. Mediciones de Corriente en Cilindro de Cobre sin Tapa Trasera.

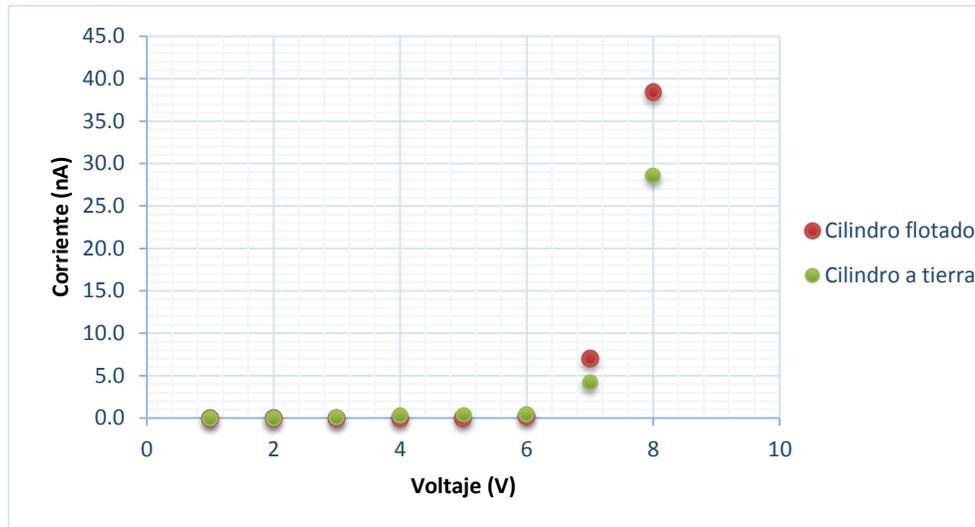
Los resultados de la caracterización del filamento utilizando la configuración visible en la figura 3.9 se muestran en las siguientes gráficas. La gráfica 4.9 corresponde a la corriente captada directamente por el cilindro que rodea al filamento. A diferencia del cubo de cobre, éste no rodea completamente al filamento, ya que no posee una de las tapas circulares (como se exhibe en la figura 3.10a) lo que propicia una pérdida considerable de corriente.



Gráfica 4.9. Corriente en cilindro de cobre sin una de las tapas circulares.

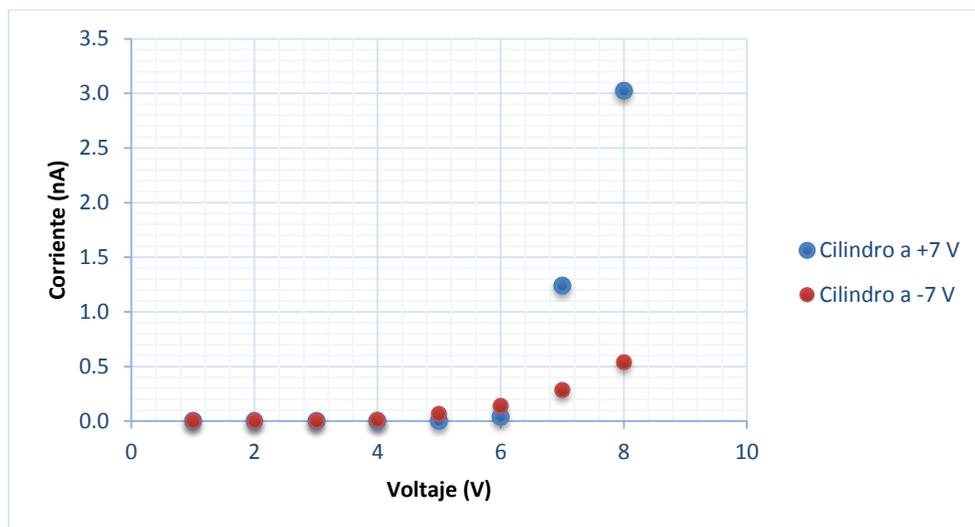
4.5.3. Mediciones de Haz Corriente Colimado Sobre Placa de Cobre.

Después de hacer las mediciones anteriores, como colimador se utilizó el cilindro de cobre para hacer incidir un haz de electrones en una pequeña placa de cobre a 2 cm de distancia. Como se presenta en la figura 3.10a, el orificio por el que el haz sale mide 1/8" de diámetro. Con dicho arreglo dentro de la cámara de vacío, se realizaron las pruebas que a continuación se muestran para analizar cómo afecta la polarización eléctrica del colimador a la corriente de electrones que llega a la placa de cobre. En la gráfica 4.10 se muestra el comportamiento de la corriente cuando el colimador no está conectado a ningún voltaje. Es decir, el colimador se encuentra flotado, en comparación con la curva que muestra el comportamiento de la corriente con el cilindro conectado a tierra.



Gráfica 4.10. Corrientes medidas en placa de cobre, con el colimador flotado y a tierra.

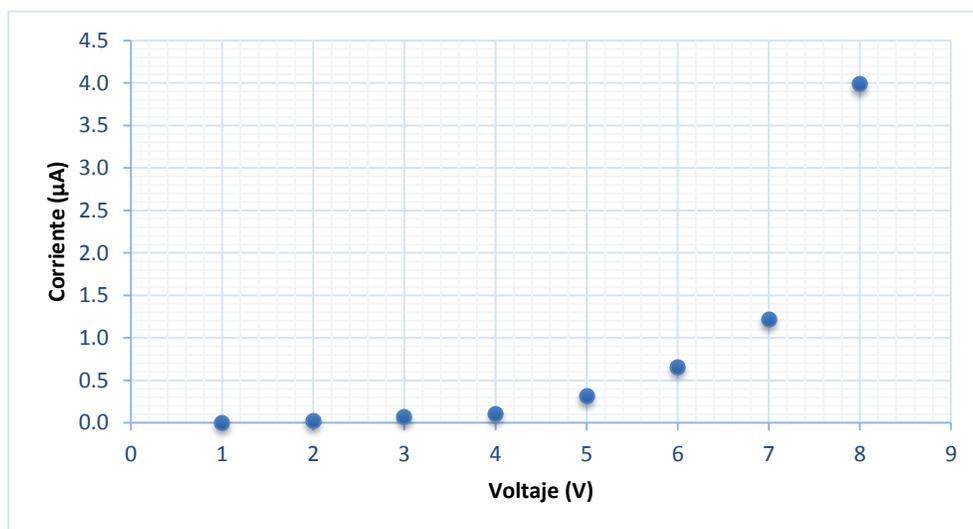
En seguida, conservando la configuración que se utilizó en la prueba anterior, se cambió la polarización del cilindro colimador. En la gráfica 4.11 se presentan los resultados obtenidos con el colimador conectado a un voltaje positivo (7 V) y posteriormente a un voltaje negativo (-7 V).



Gráfica 4.11. Corrientes medidas en la placa con el cilindro colimador polarizado.

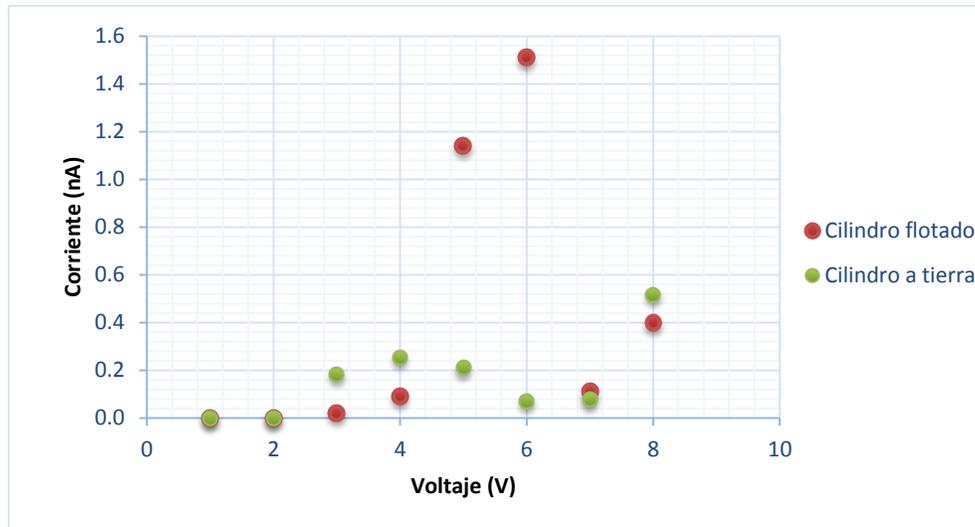
4.5.4. Mediciones de Corriente con Cilindro Cerrado.

Con la finalidad de obtener mayor corriente en la placa de cobre, se modificó el cilindro que se había estado empleando. Considerando los resultados obtenidos con el cubo de cobre que rodeaba completamente al filamento, para los siguientes experimentos se le colocó un cilindro que tuviera las dos tapas circulares, una en cada extremo. De esta manera, el único orificio fue por el que salía el haz de electrones. Dicho orificio tuvo un diámetro de $1/16''$. Se repitió el procedimiento anterior, pero fue posible obtener una presión de 4 mTorr . Una vez más, se realizaron las mediciones directamente en el cilindro, que en esta ocasión estuvo completamente cerrado. Los resultados se exhiben a continuación en la gráfica 4.12:



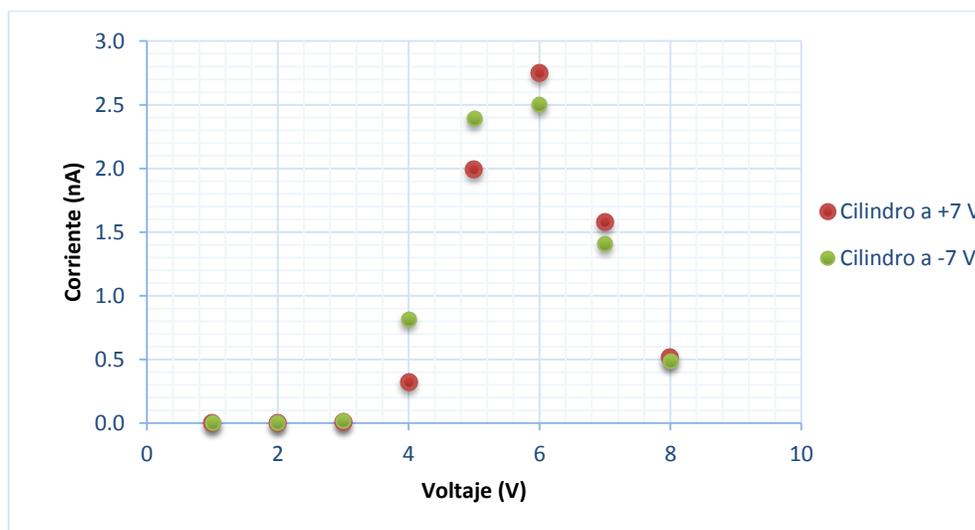
Gráfica 4.12. Corriente medida directamente en cilindro cerrado.

En seguida, se muestran en la gráfica 4.13 las corrientes obtenidas con el cilindro flotado y conectado a tierra, de acuerdo a la diferencia de potencial aplicada al filamento de tungsteno.



Gráfica 4.13. Corrientes obtenidas en la placa de cobre con el cilindro colimador flotado y conectado a tierra.

Por último, en la gráfica 4.14 se puede observar la variación de la corriente obtenida en la placa de cobre cuando el cilindro completamente cerrado se conecta nuevamente a un voltaje positivo (+7 V) y después a un voltaje negativo (-7 V).



Gráfica 4.14. Corriente obtenida en placa de cobre con distintas polarizaciones del colimador.

4. 5.5. Análisis y Discusión de los Datos.

Uno de los procedimientos más importantes fue el de poder caracterizar la corriente de electrones emitidos por un filamento de tungsteno. En la sección 2.3.2, se mencionó que los filamentos de tungsteno puro calentados directamente al aplicarles una corriente, son más eficientes que otras configuraciones, eso fue utilizado en estas pruebas, ya que con los filamentos de lámparas de automóvil no fue posible obtener tanta corriente, debido a que están optimizados para emitir fotones. Se mejoraron las condiciones de vacío en este sistema y fue notable el aumento del factor de camino libre medio.

Los valores de corrientes presentadas en la gráfica 4.8 son menores a los obtenidos en el tubo de acrílico, pero en esta ocasión existe la certeza de que se trata de la corriente de electrones termoiónicos, pues el arreglo se construyó para que estuviera libre de descargas luminosas. Los máximos valores obtenidos fueron de $1.38 \mu A$ y $3.98 \mu A$, que corresponden a las ocasiones cuando se usaron colectores de corriente cerrados como el cubo y el cilindro completo (gráficas 4.8 y 4.12, respectivamente). Estos resultados se adquirieron al aplicarle $8 V$ y una corriente de $2 A$ al filamento de tungsteno.

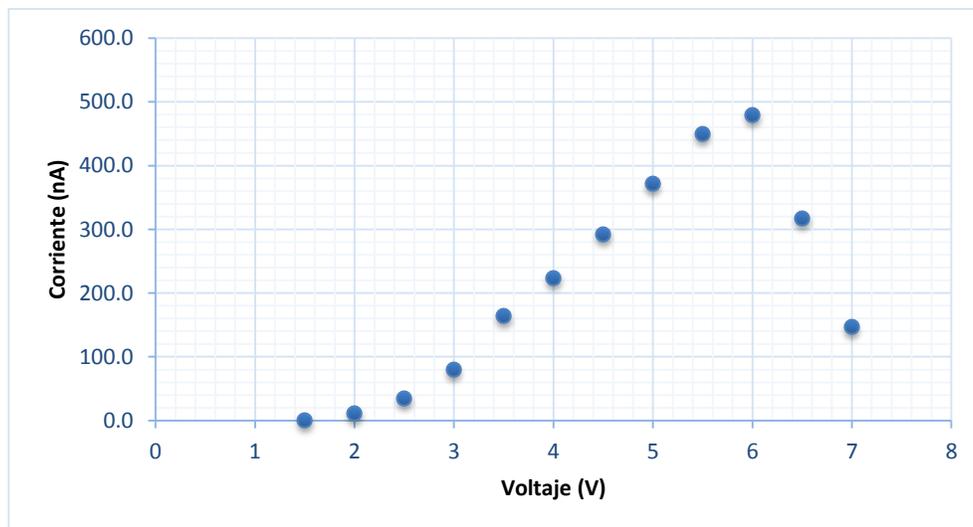
Cuando se utilizó el cilindro sin tapa se obtuvo una corriente máxima de $0.53 \mu A$ (gráfica 4.9), que es casi la tercera parte de la corriente que se mide en el cubo cerrado. Esto demuestra que gran cantidad de los electrones emitidos se pierden si solamente se captan en una cierta dirección y si el electrodo utilizado para atraparlos no está polarizado. La polarización influye también en la cantidad de corriente que se puede captar es por esto que en las gráficas 4.10 y 4.11 se muestran los resultados obtenidos utilizando el cilindro como un colimador de $1/8''$. Es notable que la corriente cuando el cilindro está flotado es mayor que en todas las demás configuraciones, lo que puede interpretarse como que los electrones que llegaron a la lámina de cobre a $2 cm$ de distancia fueron solamente los que se encontraban en la dirección del orificio, pues no fueron desviados por ningún campo eléctrico debido a que no había ninguna diferencia de potencial. Por otro lado, el cilindro conectado a una diferencia de potencial negativa repelía a los electrones haciendo que salieran por la parte posterior del cilindro que no tenía tapa de cobre, y como lo muestra la gráfica 4.11 fuera escasa la corriente de electrones que llegaba a la lámina. Mientras que, cuando el cilindro se polarizó positivamente, los electrones (incluso los que eran emitidos por el filamento hacia la parte posterior del cilindro) eran atraídos hacia el cilindro, por lo que había más probabilidad de que pasaran por el

colimador (pues justo en el centro del orificio el campo eléctrico es nulo pues tiene una configuración similar a la de un anillo equipotencial explicado en la sección 2.5) y llegaron al objetivo.

Con el fin de obtener más corriente de electrones termoiónicos, se utilizó un cilindro completamente cerrado excepto por el orificio de $1/16''$ utilizado como colimador. Y como lo muestra la gráfica 4.12, la corriente máxima alcanzada fue de $8.39 \mu A$, puesto que las presiones fueron un poco más bajas a los experimentos anteriores. En la gráfica 4.13, se observa que la corriente máxima obtenida en el cilindro flotado es de $1.5 nA$ a $6 V$ en comparación a la corriente obtenida con el cilindro aterrizado, que fue de $0.51 nA$ alimentando el filamento a $8 V$, lo cual puede deberse que los electrones son llevados a tierra por el tipo de polarización del cilindro. Por otra parte, las corrientes de los cilindros conectados a un voltaje positivo y negativo son muy cercanas entre sí, teniendo su máximo en un voltaje de $6 V$, debido a que las altas temperaturas alcanzadas dentro de la cámara de vacío provocaban la evaporación de residuos que se encontraban en las paredes internas, lo cual perjudicaba el vacío y con esto el camino libre medio. Por esto, la corriente que llega a la lámina de cobre a baja después de que llega a un máximo alrededor de $6 V$.

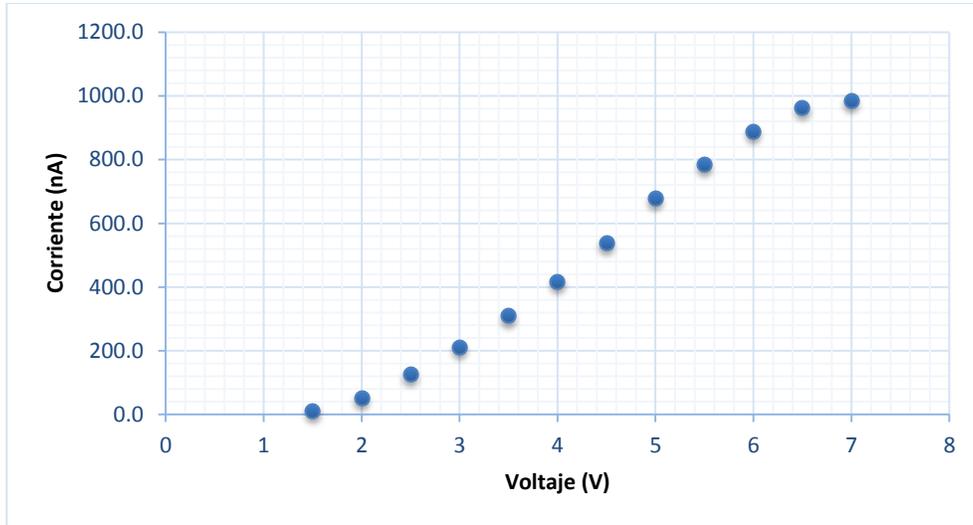
4.6. Prototipo de Acelerador de Electrones.

A continuación se presenta la gráfica 4.15, donde se muestran las corrientes medidas en el canal de extracción situado a $1 cm$ de la fuente de electrones.



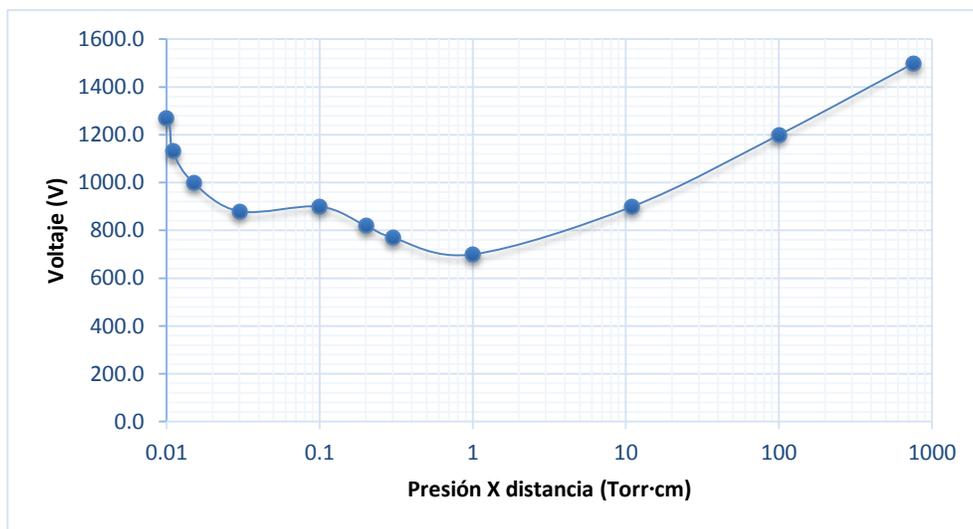
Gráfica 4.15. Corriente de electrones termoiónicos que llegaron al canal de extracción a $1 cm$ de distancia del filamento.

En la gráfica 4.16 se pueden observar las mediciones de la corriente con el canal de extracción a 1 cm de la fuente de electrones, con la configuración mostrada en la figura 3.14, una vez que se colocaron los imanes en los compartimentos especiales de la cámara de vacío.



Gráfica 4.16. Corriente obtenida con imanes colocados en la cámara de vacío.

En la gráfica 4.17 se muestran los puntos donde se obtuvieron descargas disruptivas dentro de la cámara de vacío, con la configuración mostrada en la figura 3.15.



Gráfica 4.17. Curva de Paschen para un gap de las mallas de aceleración de 1 cm.

La gráfica 4.17 tiene la forma de una de las curvas de Paschen que se muestran en la figura 2.5. Sin embargo, no es posible ajustarla a esa curva, puesto que las condiciones de experimentación son diferentes y por lo tanto los resultados son distintos. Sin embargo, nos pareció ser una muy buena aproximación.

4.6.1. Análisis y Discusión de los Datos.

Se tomaron en cuenta todos los resultados de los experimentos anteriores para poder implementarlos en este prototipo de Microtrón. La presión alcanzada del orden de 1×10^{-4} Torr fue la menor, lo que permitió realizar las pruebas necesarias para caracterizar la corriente que se obtenía en este sistema. En la gráfica 4.15 se pueden observar las corrientes obtenidas, cuyo máximo se encuentra en 480 nA , lo cual es mayor a lo obtenido en la cámara de 10 cm de diámetro con el cilindro abierto. También se puede notar que después de 6 V , la corriente comenzó a disminuir, hecho que se puede relacionar con la contaminación del vacío al quemarse la parte interna de la cámara. Es aquí donde se nota el impacto de la presión en el camino libre medio de los electrones y que por lo tanto la corriente en el canal de extracción disminuya.

Cuando se colocaron los imanes en sus respectivos compartimentos, una vez que se arreglaron los problemas que se tuvieron con las quemaduras de la cámara y la fuente de voltaje del filamento, se logró medir la corriente obtenida con la presencia del campo magnético proporcionado por los imanes, esta fue notoriamente mayor a las obtenidas cuando no se tenían los imanes, como se puede observar en la gráfica 4.16, lo que prueba la capacidad de la instrumentación utilizada de generar electrones termoiónicos y medir la corriente que llega al canal de extracción.

Examinar el comportamiento de las descargas luminosas en presencia de alto voltaje, fue necesario para corroborar si el voltaje de aceleración propuesto en la sección 2.5.1, de 500 V , se encontraba dentro de la región en donde no habría descarga luminosa si este sistema se conserva a 1 mTorr y con un gap de 1 cm , por lo cual se realizó un muestreo similar a la curva de Paschen y por los resultados expuestos en la gráfica 4.17 se puede decir que es muy parecida a dicha curva. Las pequeñas variaciones que existen respecto a la original se deben a las condiciones específicas de éste sistema, que es distinto al que se utilizó para realizar las curvas mostradas en la figura 2.5. Se puede inferir, de los resultados obtenidos, que efectivamente el voltaje de aceleración propuesto puede ser utilizado si se mantiene en la magnitud mencionada, cumpliría con las condiciones necesarias para acelerar a los electrones. De hecho podría ser mayor, llegando hasta los 650 V sin que existan

descargas (pues el voltaje mínimo al que se presentó una descarga fue de 700 V), entonces retomando el procedimiento de la sección 2.5.1 los voltajes, y número de órbitas serían los que se muestran en la siguiente tabla 4.1:

No. de órbita	v_i ($\times 10^6$ m/s)	V_a (V)	E_T (eV)	v_a ($\times 10^6$ m/s)	Radio (cm)	Perímetro (cm)
0	1.45	0	6	1.45	0.2	1.27
1	1.45	650	656	15.19	2.11	13.24
2	15.19	650	1306	21.43	2.97	18.68
3	21.43	650	1956	26.23	3.64	22.86
4	26.23	650	2606	30.27	4.2	26.39

Tabla 4.1. Valores de parámetros más relevantes en la aceleración de electrones suponiendo un voltaje de emisión de 6 V.

Como se puede ver en ésta tabla 4.1, el número de las órbitas de los electrones sería menor pues cada que son aceleradas con 650 V, ganan más energía que cuando se aceleran con 500 V, por lo que necesitarían pasar menos veces por el sistema de aceleración para poder llegar al sistema de extracción. Ahora bien, el color de las descargas fue más uniforme en este sistema que en la cámara de aluminio, lo que significaría que la presión dentro de ésta cámara era más uniforme que la anterior, aunque el color violeta indica la presencia en mayor cantidad de argón en el sistema acorde a la tabla 2.1.

Al corroborar que todos los dispositivos que conforman este prototipo de acelerador de electrones funcionaran correctamente, se esperaba que también trabajaran de manera adecuada. De hecho existen diversas razones para creer que la corriente que se midió en el canal de extracción al tener todos los componentes instalados y funcionando, se debía a los electrones acelerados. La corriente fue pequeña debido a que no todas las órbitas de cada uno de los haces de electrones fue tal y como se tenía prevista. Es innegable que el camino libre medio haya afectado por alguna contaminación del vacío no detectada durante el experimento. Sin embargo, también existen razones para decir que la corriente medida en el amperímetro era inducida por el campo magnético de los imanes. Lo anterior, se observó que cuando se cambiaban de posición a los imanes y se mantenían en movimiento, la corriente aumentaba y eventualmente volvía a disminuir si los imanes regresaban

a estar estáticos. También, puede mencionarse que la corriente que se medía en el amperímetro se trataba solo de ruido de fondo pues el canal de extracción podía funcionar como una antena. Es posible afirmar que existió una corriente medida en el canal de extracción del acelerador de electrones, cuya magnitud se compone de todos parámetros mencionados anteriormente, pero la corriente de los electrones acelerados no fue tan grande como para hacer despreciables las otras posibles fuentes de corriente de ruido.

4.2. Vacío.

Durante el proceso de medición de la corriente en el ánodo, se observaron descargas luminosas dentro del tubo de un color rojizo, que comenzaron a aparecer desde que el voltaje de aceleración fue de aproximadamente 400 V. Además fue necesario cambiar el filamento y limpiar tanto el cátodo como el tubo repetidamente, debido a que el primero se calentaba tanto que se fundía y el mantenerlo encendido producía hollín que contaminaba bastante el vacío dentro del sistema. También se detectaron fugas hacia el interior del tubo. Por lo anterior, se recubrieron con pegamento expandible e impermeable de la marca Gorilla, los orificios por donde se insertaron los alambres en los tapones de goma. Sin embargo, no fue suficiente para detener las fugas, ya que en donde embonaba el tampón con el tubo también existía una entrada de aire considerable.

La presión resultó ser uno de los parámetros más importantes durante todas las pruebas pues de ésta depende el camino libre medio de los electrones. Además, es una de las condiciones más relevantes para la aparición de las descargas luminosas como lo muestran las curvas de Paschen. Por lo que el sistema para generar vacío debe estar en óptimas condiciones, ya que puede ser contaminado muy fácilmente por factores como:

-Fugas de aire hacia el interior de la cámara: En las pruebas con el tubo de acrílico y la cámara de aluminio, fue muy clara la presencia de este factor, pues en ocasiones las fugas eran tan grandes que se lograban escuchar al acercarse lo suficiente a ellos. En el caso del tubo, el pegamento utilizado para cubrir las fugas no fue suficiente para detenerlas, razón que obligó a cambiar de procedimiento. En la cámara de aluminio las fugas detectables se encontraron en los conectores atravesadores y en la tapa de acrílico, en los primeros fue necesario verificar que las tuercas que presionaban a los atravesadores contra la tapa, estuvieran correctamente atornilladas y fijas, mientras que en la tapa de acrílico se verificó que el o-ring embonara correctamente en su alojamiento y que éste estuviera

perfectamente limpio, pues de encontrarse alguna limadura de metal o granulo, deformaría el o-ring dando paso a la entrada de aire.

-Oxidación de metales debido a la temperatura: Este factor depende no solo de la temperatura, sino también de la existencia de gas residual dentro de la cámara que al entrar en contacto con el metal caliente, acelera su proceso de oxidación, y como se observó en los filamentos de tungsteno del tubo de acrílico, los hizo quebradizos e inservibles para futuras pruebas, además provocó la aparición de hollín en las paredes del tubo como resultado del oxígeno actuando como comburente.

-Desgasificación de los materiales: Esta condición no es muy notoria a simple vista, sin embargo, es relevante estar consciente de su existencia pues si las fugas en la cámara han sido descartadas, ningún instrumento se está oxidando y la presión sigue aumentando, es necesario consultar las tablas de datos de la tasa de desgasificación para verificar que se hizo la correcta elección de los materiales a utilizar dentro del sistema de vacío. En esta ocasión la tabla de F. Markley (F. Markley, 1962), fue consultada, para sustentar la utilización de cables de teflón, acrílico y cobre, debido a que tienen una tasa de desgasificación relativamente baja para las presiones utilizadas en el experimento. De hecho, dentro de la cámara de aluminio se introdujeron materiales como cables de aislamiento polietileno y una esponja, la cual, después de realizar las pruebas se supo que por ser muy porosa podía almacenar muchos residuos de agua y polvo que contaminaban el vacío. En comparación, en la cámara de acrílico, solo se tuvo tungsteno, acero y cobre, cuyas tasas de desgasificación eran más bajas y habían sido limpiadas cuidadosamente con alcohol isopropílico para remover la mayor cantidad de grasa e impurezas posibles. Todos estos acabados contribuyeron para llevar al sistema a una presión más baja.

-La existencia de humedad: esto afecta en demasía la presión dentro de la cámara de vacío, pues al no tratarse de material especializado y que el proceso no se realizó en un ambiente totalmente libre de humedad, contribuye a que no se alcancen presiones más bajas, pues como se mencionó antes, la mínima presión alcanzable es la presión del vapor de agua a la temperatura que se encuentre dentro del sistema (Roth, 1990).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA MEJORAR EL DISEÑO.

Después de haber realizado todos los experimentos anteriores, se tuvo el conocimiento para proponer un mejor diseño de un prototipo de Microtrón que se podría construir en un futuro con mejores condiciones dentro del laboratorio, de acuerdo a todos los resultados obtenidos hasta el momento. Como ejemplo, la utilización de la cámara de acrílico con un diámetro de 17.5 cm , provino del aprendizaje obtenido en la experimentación con los anteriores prototipos. Su tamaño permitió construir los compartimentos de los imanes permanentes y tener espacio para colocar los atravesadores en las tapas de la cámara en donde se conectaron los demás componentes eléctricos. Se minimizó la cantidad de instrumentos de distintos materiales, para reducir la contaminación del vacío por efecto de la desgasificación, y también el poco volumen interior de la cámara facilitó el proceso de extracción del aire. El empleo de una bomba de vacío Leybold D8A, que tiene mayor potencia que la Varian SD-40, hizo que el flujo de aire hacia afuera del sistema fuera mayor que el flujo hacia adentro debido a las fugas, las cuales también se redujeron al máximo con la correcta construcción de los alojamientos de los o-rings y sellado de los atravesadores utilizados. Estos últimos permanecieron herméticos con la aplicación de pegamento epóxico. Todas estas medidas, dieron como resultado una presión menor a la que se había obtenido en los experimentos anteriores, propiciando mejores condiciones para obtener electrones termoiónicos en el sistema de extracción.

Lo que se concluye de los resultados obtenidos del proceso de emisión de electrones termoiónicos es que, al utilizarse un cátodo cerrado es necesario polarizarlo positivamente para que atraiga a la mayor cantidad de electrones hacia el orificio colimador y emitir un haz de mayor corriente. Pero si se utiliza un colimador abierto, se obtendrá una mayor corriente si se deja flotado, pues polarizarlo positivamente los atrae hacia sí, y polarizarlo negativamente los repele, disminuyendo la cantidad de electrones que pasan por el orificio colimador.

Cabe destacar que para obtener los resultados de la tabla 2.2, se utiliza un campo magnético pequeño (40 G), puesto que con éste podía aplicarse una diferencia de potencial de 650 V y las primeras órbitas de los electrones acelerados serían lo suficientemente grandes como para ser acelerados cuando pasen por el gap de los electrodos. En la tabla 5.1 se muestran los valores aproximados de las energías de los electrones si se utiliza el promedio del campo magnético medido (565 G) y el voltaje de 650 V pues con éste no se producen descargas luminosas. Como se observa, las primeras órbitas serían demasiado pequeñas y necesitarían pasar cientos de veces para poder

alcanzar el canal de extracción, aunque alcanzarían una energía de 195.006 KeV, lo cual es mayor a lo que se podría alcanzar utilizando la suposición del campo magnético pequeño. Por otro lado en la tabla 5.2 se muestran las órbitas que se tendrían si se utilizara un voltaje de aceleración más elevado.

No. de órbita	v_i ($\times 10^6$ m/s)	V_a (V)	E_T (eV)	v_a ($\times 10^6$ m/s)	Radio (cm)	Perímetro (cm)
0	1.45	0	6	1.45	0.014	0.09
1	1.45	650	656	15.18	0.15	0.96
2	15.18	650	1306	21.43	0.21	1.36
3	21.43	650	1956	26.23	0.26	1.65
300	261.43	650	195006	261.87	2.63	16.56

Tabla 5.1. Valores de órbitas utilizando un campo magnético de 565 G y un voltaje de aceleración de 650 V.

No. de órbita	v_i ($\times 10^6$ m/s)	V_a (V)	E_T (eV)	v_a ($\times 10^6$ m/s)	Radio (cm)	Perímetro o (cm)
0	1.45	0	6	1.45	0.014	0.09
1	1.45	30000	30006	102.72	1.03	6.5
2	102.72	30000	60006	145.26	1.46	9.19
3	145.26	30000	90006	177.9	1.79	11.25
9	271.75	30000	240006	290.51	2.92	18.37

Tabla 5.2. Valores de órbitas utilizando un campo magnético de 565 G y un voltaje de aceleración de 30000 V.

En el caso de que se utilice un voltaje de 30000 V, se obtendrían electrones con una energía de 240 KeV en tan solo 9 órbitas, como se observa en la tabla 5.2. Lo anterior comprueba que, si se utiliza un campo magnético más intenso, el voltaje de aceleración también debe ser aumentado, para que las trayectorias de los haces de electrones sean lo suficientemente grandes para entrar en el sistema de aceleración. Para alcanzar un voltaje de 30 KeV para acelerar a los electrones se necesita

un vacío de al menos 10^{-6} Torr y eliminar considerablemente la humedad dentro del sistema el cual debe estar optimizado para alto vacío.

Un factor muy importante fue la humedad dentro del sistema de vacío, pues su presencia influye en gran medida en la forma en que aparecen las descargas luminosas, pues no solamente hace más susceptible al ambiente para ser ionizado con menor voltaje, sino que también hacen más difícil identificar los elementos químicos de los que está compuesto el gas remanente para utilizar las curvas de Paschen y predecir su comportamiento de acuerdo al color de la descarga. Por lo que para asegurar mejores condiciones para acelerar a los electrones y evitar las descargas luminosas dentro de la cámara de vacío se sugieren las siguientes recomendaciones:

-Limpiar perfectamente los materiales que se coloquen dentro de la cámara, teniendo cuidado de no tocarlos directamente con las manos, ya que la grasa de la piel no se limpia fácilmente y en condiciones de alto vacío su desgasificación es bastante contaminante. Alcohol isopropílico es muy recomendable para limpiar el material, ya que deshidrata la superficie de contacto, lo que ayuda a eliminar la humedad del sistema.

-Utilizar una cámara hecha de acero inoxidable para alto vacío, además trabajar con una bomba turbo molecular o criogénica, para poder alcanzar presiones aún más bajas (del orden de 10^{-10} Torr) y con ellas asegurar un mejor camino libre medio para los electrones.

-La implementación de electroimanes con polos del tamaño de las tapas de la cámara de vacío para tener una superficie mayor en la que el campo magnético sea uniforme y las trayectorias de los electrones sean más controlables.

-Sustituir el cobre por acero inoxidable para fabricar instrumentos como las mallas aceleradoras, el colimador o la lámina del canal de extracción.

-Para fabricar los conectores atravesadores se podría utilizar pegamento epóxico para alto vacío, que puede ser usado a presiones por debajo de los 10^{-9} Torr (Loctite-Corporation, 2005).

-De ser posible, utilizar un filamento y hacerle pasar corriente para que caliente el interior de la cámara y ayude a evaporar los residuos de humedad que existan en las paredes de la misma. El tiempo necesario para este proceso depende de la presión, mientras menos humedad haya menor será la presión de la cámara.

Como pruebas a realizar para corroborar que efectivamente el haz que se obtiene en el canal de extracción del Microtrón corresponde a los electrones acelerados se propone lo siguiente:

-Adicionalmente al amperímetro con que se mide la corriente en el canal de extracción se recomienda utilizar un instrumento sensible a los rayos X que puedan emanar del choque de los electrones con la placa de cobre de la cual está hecho el canal de extracción. El uso de películas sensibles a los rayos X, es una opción.

-En la sección 3.4 se describe la caracterización de la corriente de electrones termoiónicos que se obtiene del filamento. Se realizó un análisis con voltaje y corriente debido a que no se contaba con un dispositivo que fuera capaz de medir la temperatura de dicho filamento. Por lo que se sugiere utilizar un pirómetro para así desarrollar un análisis más directo y específico de la corriente.

Posteriormente, se pretende utilizar los resultados obtenidos en los experimentos realizados en este trabajo, para lograr la construcción de un acelerador de partículas funcional dentro del laboratorio. Lo anterior, permitirá sentar las bases que acerquen a estudiantes e investigadores a la construcción de sus propios aceleradores, para utilizarlos en sus propios experimentos.

- Aldous, W. H. (1952). *Thermionics Vacuum Tubes*. Gran Bretaña: Methuen & Co. LTD.
- Allegro-MicroSystems. (2002). *Ratiometric, Linear Hall-Effect Sensors*. Worcester, Massachusetts, USA.
- Beiser, A. (2003). *Concepts of Modern Physics*. New York: McGraw-Hill.
- Boylestad, R. (1997). *Electrónica: Teoría de Circuitos*. México: Pearson Educación.
- Chambers, A. (1998). *Basic Vacuum Technology*. Londres: Institute of Physics Publishing.
- Dayton, B. B. (1960). Relations between size of vacuum chamber, outgassing rate, and required pumping speed. *6th National Symposium on Vacuum Technology Transactions* (pp. 101-119). New York: Pergamon Press.
- Dayton, B. B. (1962). Outgassing rate of contaminated metal surfaces. *Transactions of the 8th National Vacuum Symposium* (pp. 42-57). New York: Pergamon Press.
- Diefenderfer, A. J. (1986). *Guía de Instrumentación Electrónica*. México: McGraw-Hill.
- Espe, W. (1968). Materials for High Vacuum Technology, Vol. 3. *Pergamon Press*, 393.
- F. Markley, R. R. (1962). Vacuum Symposium Transactions. *Transactions of the 8th National Vacuum Symposium* (p. 78). New York: Pergamon.
- Goldstein, H. (1993). *Classical Mechanics*. San Francisco: Addison Wesley.
- Griffiths, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Hellborg, R. (2005). *Electrostatic Accelerators*. Berlin: Springer.
- Jefimenko, O. D. (1966). *Electricity and Magnetism. An introduction to the theory of electric magnetic fields*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Keithley-Instruments, I. (1990, January). Instruction Manual. *Model 480 Digital Picoammeter*. Cleveland, Ohio, USA: Test Instrumentation Group.
- Latham, R. V. (1981). *High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis*. England: Academic Press Inc.

- Leybold. (2000). Trivac "A" Dual Stage Rotary Vane Pump Manual. United States of America: Leybold Vacuum Products, Inc.
- Loctite-Corporation. (2005, Junio 04). Torr Seal. *Material Safety Datasheet*. Lexington, Massachusetts, USA: Varian Vacuum Technologies.
- Lorrain, P. (1988). *Electromagnetic Fields and Waves: Including Electric Circuits*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Loyarte, J. M. (1967). *Radiaciones Ionizantes* (Primera ed.). España: Editorial Alhambra, S. A.
- Malvino, A. P. (1999). *Principios de Electrónica*. Madrid: McGraw-Hill.
- O'Hanlon, J. F. (2003). *A user's guide to vacuum technology*. United States of America: Wiley-Interscience.
- Purcell, E. M. (2001). *Electricidad y Magnetismo*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.
- Raizer, Y. P. (1991). *Gas Discharge Physics*. Berlín: Springer.
- Reitz, J. R. (2001). *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Argentina: Addiscon-Wesley Iberoamericana.
- Resnick, R. (1999). *Física Vol. 2*. México: Compañía Editorial Continental S.A. de C.V.
- Roth, A. (1990). *Vacuum Technology*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., & Young, H. D. (1989). *Física Universitaria* (Sexta ed.). México: Addison Wesley Iberoamericana.
- Serway, R. A. (2000). *Física para Ciencias e Ingeniería (Tomo II)*. México: McGraw-Hill.
- Serway, R. A. (2002). *Electricidad y magnetismo*. México: McGraw-Hill.
- Strehl, P. (2006). *Beam Instrumentation and Diagnostics*. Berlin: Springer.
- Varian. (1998, October). Instruction Manual. *SD 40 Rotary Vane Pump*. Lexington, Massachusetts, USA: Varian Vacuum Products.
- Wadhwa, C. L. (2007). *High Voltage Engineering*. New Delhi: New Age International.
- Wittenberg, H. H. (1962). Gas Tube Desing. *Electron Tube Division, Radio Corporation of America*, 792-817.
- Yoshimura, N. (2008). *Vacuum Technology (Practice for Scientific Instruments)*. Berlin: Springer.