



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

**MANIPULACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE ELECTRONES POR
MEDIO DE MATERIALES DIELECTRICOS**

**INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DEL HAZ INCIDENTE EN EL
ÁNGULO DE DEFLEXIÓN DURANTE EL EFECTO GUIDING CON
ELECTRONES DE 5 KEV**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO**

NICOLÁS JOLAOS CALERO VILLACÍS

nicolas.calero@epn.edu.ec

DIRECTOR: ESTEBAN FELIPE IRRIBARRA CAZAR

esteban.irribarra@epn.edu.ec

DMQ, Agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Nicolás Jolaos Calero Villacís, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Nicolás Jolaos Calero Villacís

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Nicolás Jolaos Calero Villacís, bajo mi supervisión.

Esteban Felipe Iribarra Cazar

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Nicolás Jolaos Calero Villacís

Esteban Felipe Iribarra Cazar

AGRADECIMIENTO

En la vida existen personas que tienen la maravillosa y noble capacidad de sacarnos del mas hondo y oscuro mar de problemas con un sabio consejo, un cálido abrazo o su dulce compañía. Para esas personas, queda corta la palabra agradecimiento, puesto que es un inefable sentimiento el que se llega a sentir dentro de la parte mas abstracta de nuestro ser, algunas veces llamado espíritu, cuando pensamos todas las veces que fue necesario su amparo y estuvieron ahí para nosotros. No basta solo con nombrarlas, debería erigirse monumentos y atavíos de toda clase en su honor. Lo que constituye nuestro ser, es en gran medida gracias a ellos.

Es por eso que quiero mediante este extracto, dar por escrito mi sempiterno sentimiento de reconocimiento y gratitud hacia mis padres, Jimmy Calero y Mónica Villacís, porque desde el alba de mi vida forjaron mi camino y me concedieron su invaluable sabiduría. Hacia mi hermano, Jimmy Calero, porque siempre vi en él un ejemplo de superación, dedicación y entrega hacia lo que mas amo en la vida. A Betzabet Cacuangó, porque inexorablemente me sacó de las sombras, dotó mi ser de la bondad que había perdido y me otorgó el más puro y noble sentimiento de amor. Al que siempre fue y seguirá siendo mi guía en mi camino profesional, Esteban Iribarra, porque sus consejos y palabras me ayudaron a encontrar sentido en mi mas grande pasión, la Física. A Pablo Jácome, por brindarme toda la ayuda necesaria para realizar los experimentos presentados en este trabajo. Y, aunque no las nombre directamente, a todas las personas que en algún momento creyeron en mi. A ellas les digo que no les he fallado, seguiré creciendo y volaré lejos con las alas que ayudaron a construir. Volaré, hasta ver el mundo como realmente es, un pequeño punto en este infinito universo, y nunca los olvidaré, serán recordados por siempre como los arquitectos de mi destino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcance.....	1
1.4 Marco teórico.....	2
1.5 METODOLOGÍA.....	5
1.6 Instrumentos.....	5
1.7 Caracterización del haz.....	8
1.8 Diseño y análisis de un brazo angular.....	10
1.9 Análisis del efecto guiding versus corriente incidente sobre la muestra.....	12
2 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	12
2.1 Discusión y Resultados.....	12
2.2 Conclusiones.....	26
2.3 Recomendaciones.....	26
3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
4 ANEXOS.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista externa de la pistola de electrones.....	5
Figura 2: Montaje experimental externo.....	6
Figura 3: Placa con polvo fosforescente. Se observa la lámina de aluminio frontal.	7
Figura 4: Esquema básico de irradiación sobre una muestra.....	7
Figura 5: Mancha del haz a) con el cátodo desalineado, b) alineado y c) enfocado.	8
Figura 6: (a) Vista superior de la placa fosforada desde la ventana en la cámara (luz interna prendida). A la izquierda de la placa se observa la copa de Faraday. (b) Se muestra como se ve el haz impactando con la placa inclinada a 10° (luz interna apagada).....	9
Figura 7: Esquema de apertura geométrica de la placa.....	9
Figura 8: Diseño de brazo angular conectado a goniómetro de precisión angular.	10
Figura 9: (a) Goniómetro angular, su paso es de 5° . (b) Adaptación para mediciones con pasos de 1.5°	11
Figura 10: Esquema experimental interno con goniómetro lineal (a) y angular (b).	11
Figura 11: Mediciones con el goniómetro lineal con escala logarítmica. A la derecha se muestra los valores de declinación de la muestra	13
Figura 12: Mediciones con el goniómetro angular con escala logarítmica. A la derecha se muestra los valores de declinación de la muestra.....	13
Figura 13: Dispersión y captura de los electrones en los esquemas lineal y angular.....	14
Figura 14: Esquema del movimiento lineal y angular del detector. En rojo están los puntos de medición de ambos esquemas.....	15
Figura 15: Comparación entre los esquemas de medición utilizados.....	16
Figura 16: Posición de máximos de intensidad versus ángulo de declinación de la muestra en ambos esquemas experimentales.....	16
Figura 17: Intensidad de corriente máxima medida versus ángulo de declinación de la muestra.....	17
Figura 18: Mediciones de haz directo. A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector.....	18

Figura 19: Mediciones de haz directo. A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector.....	19
Figura 20: Mediciones de corriente cuando la muestra estaba declinada 5°. A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector. En rojo se muestra la región a la que los electrones no pueden incidir debido al cierre geométrico.....	19
Figura 21: Mediciones de corriente cuando la muestra estaba declinada 5°. A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector. En rojo se muestra la región a la que los electrones no pueden incidir debido al cierre geométrico.....	20
Figura 22: Perfiles de corriente con placa declinada a 5° se encuentran fuera de los perfiles que se forman con el haz incidiendo directamente sobre el detector..	20
Figura 23: Mediciones de corriente para el máximo y mínimo de corriente irradiada para varios ángulos.....	21
Figura 24: Máximos de intensidad medida versus la corriente incidente. Para el caso de $\phi = 5^\circ$ se multiplicó por el factor mostrado en la leyenda del gráfico.....	22
Figura 25: Relación entre los cocientes de las corrientes medidas y las corrientes incidentes para el haz directo y con la placa declinada 5°.....	23
Figura 26: Comprobación factor de escala hallado para el caso cuando a placa esta declinada a 5°.....	23
Figura 27: Mediciones de corriente con la placa con polvo fosforescente en su superficie.....	24
Figura 28: Desgaste en la placa de borosilicato.....	25

RESUMEN

Se conoce como efecto guiding a la manipulación de la trayectoria de partículas cargadas por medio del uso de muestras aislantes. En el presente escrito, se estudió dicho efecto para un haz de electrones de 5 keV que incidió sobre una placa cuadrada de borosilicato de 10 centímetros de lado. Se trabajó en condiciones de alto vacío (alrededor de 10^{-6} Torr). Se utilizó una copa de Faraday para la medición de la corriente del haz dispersado por la muestra. En este contexto, se comparó el uso de dos esquemas de movimiento de la copa de Faraday; uno lineal, perpendicular a la muestra, y uno angular, con su eje de rotación en el sujetador de la muestra. Además, se estudió la dependencia de la intensidad de corriente incidente sobre la muestra, en un rango de 10 a 1000 μA , en los parámetros del haz deflectado.

Entre los resultados más importantes del proyecto se debe mencionar que se pudo deflectar el haz incidente hasta un ángulo de 26.56° . Por otro lado, se observó que el esquema lineal presenta una limitación para capturar electrones en casi el doble de intensidad en sus extremos de medición. Se evidenció una dependencia exponencial de la corriente transmitida respecto al ángulo de inclinación de la muestra. La corriente transmitida es en todos los casos por lo menos 10 veces menor a la incidente. Se comprobó que no existe una dependencia del efecto guiding con la intensidad de corriente que se irradia a una muestra aislante. Finalmente, se estableció una ecuación de escalamiento para perfiles de corriente recopilados a diferentes corrientes de incidencia. Dicha ecuación no establece una relación directa entre el cociente de las corrientes de incidencia y las corrientes medidas.

Palabras clave: Efecto guiding, muestra macroscópica, corriente incidente.

ABSTRACT

The manipulation of the trajectory of charged particles through the use of insulating samples is known as the guiding effect. In this present study, this effect was investigated for a 5 keV electron beam incident upon a square borosilicate plate measuring 10 centimeters on each side. The work was conducted under high vacuum conditions (approximately 10^{-6} Torr). A Faraday cup was employed for the measurement of the beam current scattered by the sample. Within this context, two Faraday cup movement schemes were compared: a linear one, perpendicular to the sample, and an angular one, with its axis of rotation at the sample holder. Furthermore, the dependence of the incident current intensity on the sample, in a range of 10 to 1000 μA , was studied with respect to the deflected beam parameters.

Among the most significant outcomes of the project, it is worth noting that the incident beam could be deflected up to an angle of 26.56 degrees. On the other hand, it was observed that the linear scheme has a limitation in capturing electrons at nearly twice the intensity at its measurement endpoints. An exponential dependence of the transmitted current was evident concerning the angle of inclination of the sample. The transmitted current is in all cases at least 10 times lower than the incident current. It was verified that there is no dependence of the guiding effect on the current intensity irradiated onto an insulating sample. Finally, a scaling equation for current profiles collected at different incidence currents was established. This equation does not establish a direct relationship between the ratio of incidence currents and the measured currents.

KEYWORDS: guiding effect, macroscopic sample, incidence current.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Se analizó la trayectoria de un haz de electrones deflectado por una placa cuadrada de borosilicato de 100 cm² que posee un ángulo de inclinación variable. La energía de los electrones del haz incidente sobre la muestra fue de 5 keV y se varió su corriente entre 10 a 1000 μ A. La posición e intensidad de corriente del haz deflectado fueron registrados mediante una copa de Faraday. Todo el esquema estuvo dispuesto al interior de una cámara de alto vacío, cuya presión estaba alrededor de 10^{-6} Torr. Se analizó el efecto de la corriente del haz incidente sobre la muestra con la corriente deflectada y el ángulo de deflexión. La copa realizó mediciones tanto perpendicularmente al haz incidente sobre la placa, como de forma circular, con centro en el eje de rotación de la muestra. Se analizaron las diferencias generadas debido a la geometría de caracterización del haz en los resultados finales.

1.1 Objetivo general

Establecer el rol de la corriente en el ángulo de deflexión e intensidad de corriente del haz deflectado después de interactuar con una muestra macroscópica de borosilicato.

1.2 Objetivos específicos

- Manipular la trayectoria de un flujo de electrones mediante el uso de una placa cuadrada macroscópica de borosilicato.
- Estudiar la influencia de la geometría en el movimiento del detector (copa de Faraday) sobre las mediciones de corriente deflectada.
- Analizar la dependencia del ángulo de deflexión con la intensidad de corriente incidente del haz sobre la muestra con ángulos de inclinación de 0 y 5 grados.

1.3 Alcance

En general, la dispersión de electrones por una muestra de un material eléctricamente aislante depende de muchos factores, como la energía del haz incidente [1] o el tiempo en el que le haz incide sobre la muestra [2]. Algunos de los electrones son absorbidos por las moléculas del material mientras que otros son re-dispersados en un amplio ángulo. Los primeros producen una interacción coulombica con los segundos resultando en lo que se conoce como efecto Guiding [1].

En el año 2012, Vokhmyanina et al. [3] condujeron un experimento donde colocaron una placa de vidrio de 76 milímetros de largo de tal forma que un haz de electrones de 10 keV

pasara de forma rasante y paralelo a su superficie. Variando la corriente de incidencia entre 10 a 170 nA, observaron la posición del haz en una pantalla centelleante detrás de la muestra. En dicha investigación, se evidenció el cambio de posición del haz de electrones cuando se varió la intensidad de corriente. Así, se podría suponer que la corriente si ejerce un efecto sobre la manipulación de la trayectoria de electrones por medio muestras hechas de materiales aislantes.

Por otro lado, es necesario analizar la geometría óptima del movimiento del detector para caracterizar el haz después de la incidencia. Así, respecto a los diferentes esquemas de medición que se pueden utilizar, se debe analizar la precisión, maximizar la corriente que se registra, mejorar la resolución de los perfiles de corriente que se recopilan, identificar una mejor captación de partículas cargadas por la entrada del detector, entre otros.

De esta manera, el presente trabajo se llevó a cabo hasta que se encontró los siguientes resultados:

- Análisis de la influencia de la geometría del movimiento del detector sobre mediciones del haz dispersado por la muestra.
- Perfiles de corriente versus posición, linear o angular, dependiendo del anterior punto, para diferentes valores de corriente incidente en el rango de operación de la pistola de electrones dispuesta.
- Análisis de parámetros del haz deflectado como magnitud y posición de pico de corriente y su dependencia con la intensidad de corriente del haz incidente sobre la muestra.

1.4 Marco teórico

El efecto guiding, o la transmisión sin contacto de partículas cargadas por un material aislante, fue descubierto en el año 2002 por Stolterfoht et al. [4]. Así, se reportó como la trayectoria de iones de Ne^{+7} podía ser modificada por medio de micro-capilares hechos de tereftalato de polietileno (PET). Una de las características mas importantes que subyace de este descubrimiento es que el flujo de partículas que se dispersan por los micro-capilares conservan el estado de carga inicial o incidente. Además, se observó evidencia de que las partículas cargadas aparecían en lugares antes no vistos a medida que se modificaba el ángulo de rotación de la muestra, una clara demostración de la manipulación de su trayectoria.

Una de las ramas que se desprende de este descubrimiento es el efecto guiding de electrones, tema fundamental del presente escrito, investigado inicialmente por Den et al. [5] y Milosavljević et al. [6]. A diferencia de los iones, los electrones al poseer un coeficiente carga-masa (q/m) relativamente menor, tienden a verse más afectados por campos electromagnéticos, en específico, por el producido por un parche de carga. Asimismo, la estabilidad del parche de carga es menor, debido a que los electrones presentan una mayor movilidad que los iones dentro de la muestra. Adicionalmente, dado que la incidencia de electrones puede producir electrones secundarios, se puede provocar que las partículas de las paredes de la muestra pierdan carga negativa, debilitando el efecto repulsivo del parche de carga.

Se hipotetiza que existen principalmente dos causas para que las partículas cargadas modifiquen su trayectoria en su interacción con muestras dieléctricas. En primer lugar, por dispersión causada por las partículas de las paredes internas de la muestra [7]. Por otro lado, por la formación de parches de carga [2], producto de acumulaciones de partículas que incidieron previamente, que a su vez, producen un campo eléctrico repulsivo para partículas subsecuentes.

Se tiene evidencia que una causa predomina sobre la otra según la energía de los electrones incidentes [1]. Asimismo, existe un tiempo de formación del parche de carga característico de cada muestra según su composición y morfología superficial, y, por tanto, existe una dependencia temporal del efecto guiding [2]. Además, se ha observado pérdidas de no más del 10 por ciento de la energía inicial (incidente) de la mayoría de los electrones que se dispersan después de incidir sobre una muestra aislante [8]. Empero, según estudios realizados con PET [5] y óxido de aluminio [9], se pueden establecer ciertas condiciones para que las interacciones de los electrones con las paredes de la muestra sean mayormente inelásticas, presentando pérdidas significativas de energía.

Existen características ampliamente asociadas al efecto guiding. Por ejemplo, los perfiles de intensidad de corriente medidos después de que electrones interactúen con una muestra comúnmente poseen una forma pseudo-gaussiana [10]. Además, mientras mayor es el ángulo de rotación de la muestra, mayor es el decrecimiento de la corriente medida. Milosavljevic y colaboradores [6] propusieron la ecuación 1 para esta tendencia en capilares, donde I_{max} es el pico de intensidad de corriente medida a una rotación ϕ de la muestra, $I_{directo}$ es el pico de intensidad cuando el haz incide directamente al detector y λ es un parámetro cuya inversa cuantifica la capacidad de una muestra para modificar la trayectoria de partículas cargadas. Sin embargo, Dassanayake et al. [1] proponen una ecuación diferente, cambiando el argumento de la función exponencial por $-\lambda \phi$.

$$I_{max} = I_{directo} \exp(-\lambda \sin^2 \phi) \quad (1)$$

No obstante, existen varios factores que pueden incidir sobre el efecto guiding y que continúan siendo objeto de discusión. En este contexto, se puede hablar de la morfología [11] [12], y composición de la muestra [10], la corriente [3] y energía [1] de los electrones que inciden sobre ella; inclusive, la temperatura en las inmediaciones del esquema experimental [10]. Por lo tanto, hay un amplio nicho de investigación relacionado a este tema.

De esta manera, la cuestión sobre la forma en la que el efecto guiding depende de la corriente que incide sobre la muestra no tiene una respuesta clara. Se menciona por ejemplo que no existe tal dependencia [13]. Así, la intensidad de corriente incidente solo tendrá un efecto sobre la magnitud de intensidad de corriente que se medirá después de la interacción. No hay variaciones en la capacidad de dispersar partículas cargadas por parte de la muestra. Este resultado se ve apoyado por simulaciones computacionales que a su vez se respaldan en comprobaciones experimentales [13], [14].

Por el contrario, se evidencia que existe una variación de la conductividad superficial de una muestra aislante debido a la constante incidencia de radiación sobre ella (radiation induced conductivity) [7]. Por otro lado, la formación, saturación y estabilidad del parche de carga dependen de la conductividad superficial de la muestra [6]. En suma, se infiere que existe un efecto dinámico en la formación del parche de carga en una muestra aislante. No obstante, no se ha evidenciado una relación entre este efecto dinámico y la corriente que incide. En otras palabras, se vuelve a reafirmar que no hay una dependencia entre el efecto guiding y la corriente incidente.

Sin embargo, en el estudio realizado en [3] se hallaron resultados que parecen contradecir las conclusiones mencionadas. Se hizo incidir un haz de electrones de forma casi paralela por encima de una muestra plana de vidrio. Se colocó una pantalla centelleante para detectar el paso del haz después de la interacción. Así, se observó como al incrementar la corriente incidente a la muestra, se modificó la posición del haz en la pantalla. A pesar de que el autor del estudio menciona que es necesario realizar mas investigaciones al respecto, este resultado sirve para marcar un precedente en la posible dependencia del efecto guiding con la corriente incidente.

En relación al desgaste de una muestra aislante después de incidir radiación sobre ella de forma constante se han publicado estudios como [15] y [16]. Por un lado, se evidencia una mancha de color opaco, la cual, provoca que la muestra pierda substancialmente su capacidad para deflectar electrones. Por otro, se muestran pruebas de la existencia de

agregados de hidrógeno y oxígeno en la muestra, lo que cambia significativamente sus características superficiales, como conductividad superficial o presencia de desperfectos. Se sabe de antemano que dichas características influyen en el efecto guiding [10]. Así, es recomendable analizar el estado del material dieléctrico utilizado y determinar que afectaciones presenta después de experimentos como los mencionados en este escrito.

1.5 METODOLOGÍA

1.6 Instrumentos

Para llevar a cabo el experimento en cuestión, se utilizaron principalmente 3 componentes: Sistema de vacío, sistema de detección y fuente; los cuales serán descritos brevemente:

1. **Pistola de electrones de la marca Kimball Physics, modelo EGPS-3101 D (fuente):** Se muestra en la figura 1. Este dispositivo es capaz de producir un haz de electrones cuya corriente y energía son controlados desde el centro de comando de la fuente de alimentación. La trayectoria del haz es manipulada mediante un sistema de deflexión electrostático. El tamaño del haz y su divergencia en la posición de la muestra son controlados mediante un sistema de lentes de Einsel. El rango de energía y corriente de emisión es de 1 – 10 keV y 1 – 1000 μ A respectivamente. Finalmente, el sistema puede configurarse para producir un haz circular de 1.5 mm de diámetro.

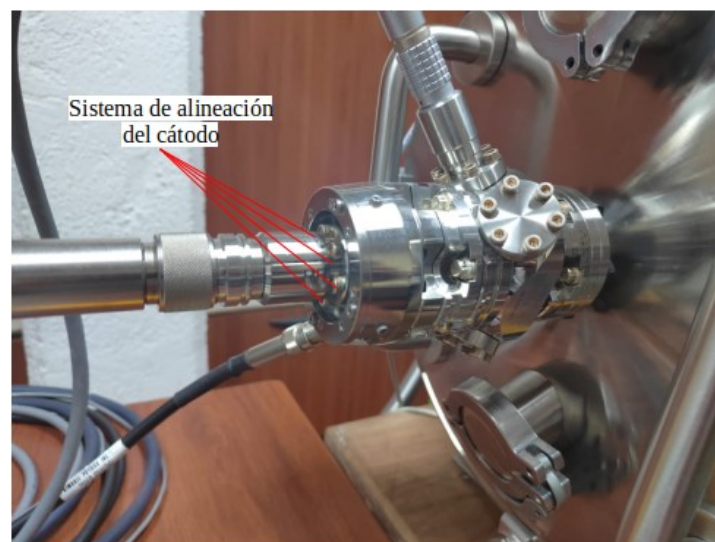


Figura 1: Vista externa de la pistola de electrones

2. **Cámara y bombas de vacío (sistema de vacío):** En el interior de la cámara comúnmente existe una presión de aproximadamente 10^{-6} Torr (Alto vacío). Dentro, se coloca todo el esquema experimental, como muestras a irradiar, medidores, soportes, entre otros. Posee una serie de bridas que permiten la comunicación con el exterior. Se utilizaron 2 bombas turbo-moleculares, una de marca Varian, modelo SH-110 Dry Scroll Pump, y otra de marca Pfeiffer, modelo HiPace 300; cada una funcionando en conjunto con una bomba de pre-vacío (capaz de llegar a presiones de aproximadamente 10^{-2} Torr).
3. **Copa de Faraday (sistema de detección):** Se usa para medir la cantidad de electrones (o partículas cargadas) que ingresan entre sus paredes por unidad de tiempo (intensidad de corriente). Posee una máscara con una apertura rectangular de 1 mm.

Los 3 componentes descritos estuvieron funcionando en conjunto en cada parte del experimento. Tanto las bombas de vacío como la pistola de electrones fueron conectadas a la cámara. Siempre que la pistola esté en funcionamiento, debe existir un régimen de alto vacío, por tanto, para este escrito, se sobreentenderá este punto. La copa de Faraday se conectó por medio de una salida coaxial con un recubrimiento metálico (para evitar la deposición de electrones y causar deflexiones del haz indeseadas). En general, la vista de todo el esquema externo se puede observar en la figura 2.

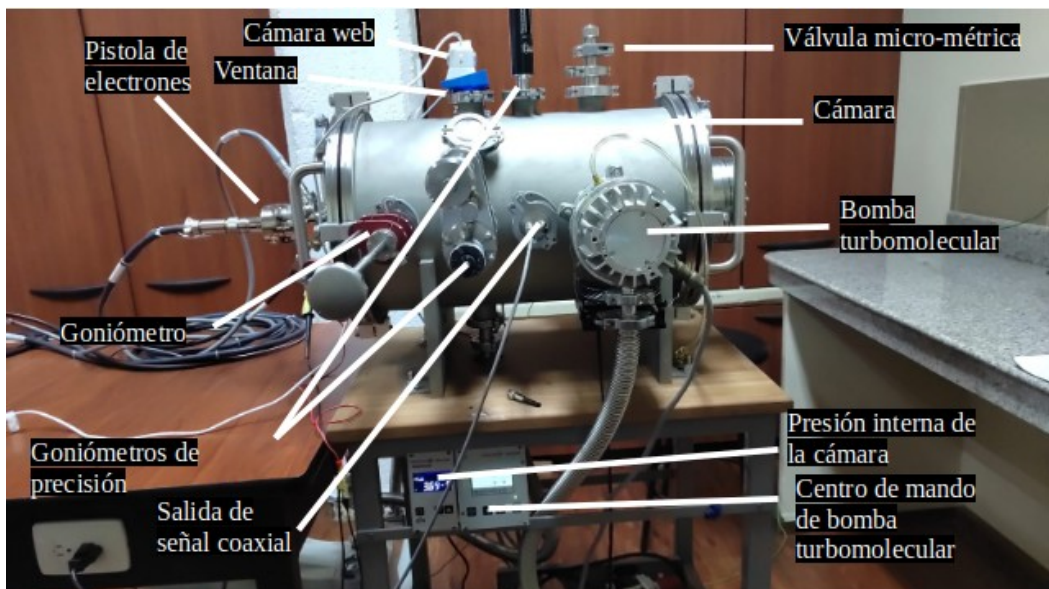


Figura 2: Montaje experimental externo.

Las muestras utilizadas (placa de borosilicato y placa con polvo fosforescente) fueron colocadas en soportes metálicos, contruidos a partir de planchas cortadas a láser. Además, se colocó láminas de aluminio en sus caras frontales al haz, como se observa en la figura 3, para evitar la deposición de carga indeseada y por ende una posterior deflexión del haz. Hay que tomar en cuenta que todos los componentes descritos (cámara, bombas, soportes, goniómetros, entre otros) estaban conectados a tierra.



Figura 3: Placa con polvo fosforescente. Se observa la lámina de aluminio frontal.

Un esquema que describe la irradiación de electrones a la muestra, con declinación variable ϕ , se expone en la figura 4. Finalmente, todos los experimentos se hicieron utilizando el modo de corriente de emisión continua dispuesto en la pistola de electrones. Dicho modo permite asegurar que la corriente que se emite, ya sea al detector o la placa, sea aproximadamente constante a lo largo del tiempo, sufriendo variaciones de no más de $1 \mu\text{A}$.

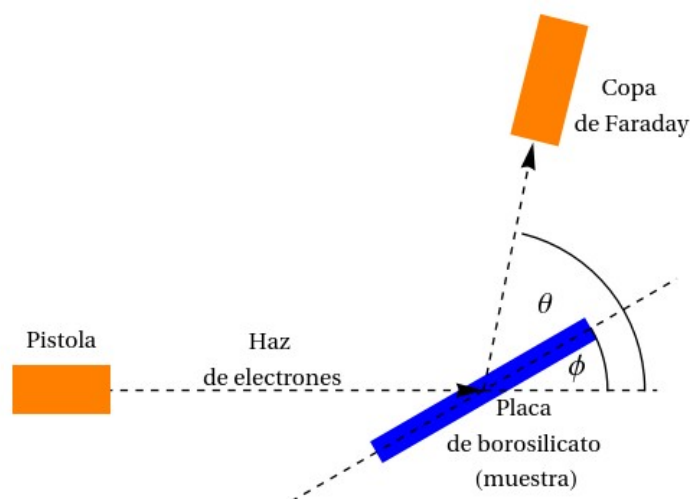


Figura 4: Esquema básico de irradiación sobre una muestra.

1.7 Caracterización del haz

Se comenzó alineando el cátodo de la pistola. Su sistema de sujeción se encuentra en la parte posterior (véase figura 1) y esta compuesto por una serie de tornillos, que al aflojarlos, permite modificar la disposición del cátodo. El objetivo era obtener un haz que forme una mancha circular y homogénea. Así, se verificó la mancha formada mediante una pantalla con una capa de ZnS:Ag (pantalla fosforescente P11) colocada en el extremo de la cámara. En la figura 5, se muestra la mancha del haz en la pantalla antes y después del alineamiento del cátodo.



Figura 5: Mancha del haz a) con el cátodo desalineado, b) alineado y c) enfocado.

El haz con el cátodo desalineado produce una mancha de intensidad heterogénea, de forma circular incompleta. Por otro lado, el haz con el cátodo alineado produce una mancha homogénea y con una forma circular completa. Seguidamente, con el haz alineado, mediante un enfoque, se produce una mancha casi puntual. Para asegurar que el haz se encuentre centrado y correctamente alineado, se hicieron mediciones con la copa de Faraday utilizando el goniómetro lineal de precisión mostrado en la figura 2.

Con el fin de caracterizar el haz de electrones en el lugar de la muestra, se colocó una placa con polvo fosforescente fabricada con el proceso propuesto por Núñez [17]. Dicha placa produce una mancha blanca al contacto con el haz. Así, se modificó los parámetros de la pistola, como voltajes de deflexión electrostática, y se registró las condiciones necesarias para obtener un haz puntual y alineado como el observado en la figura 6. Seguidamente, se irradia la placa utilizada para la caracterización, con una corriente de incidencia de $30 \mu\text{A}$ y una energía de 5 keV . Se modificó su ángulo de declinación de 0 a 10 grados en pasos de 2.5° y se recopilaban datos de intensidad de corriente deflectada.

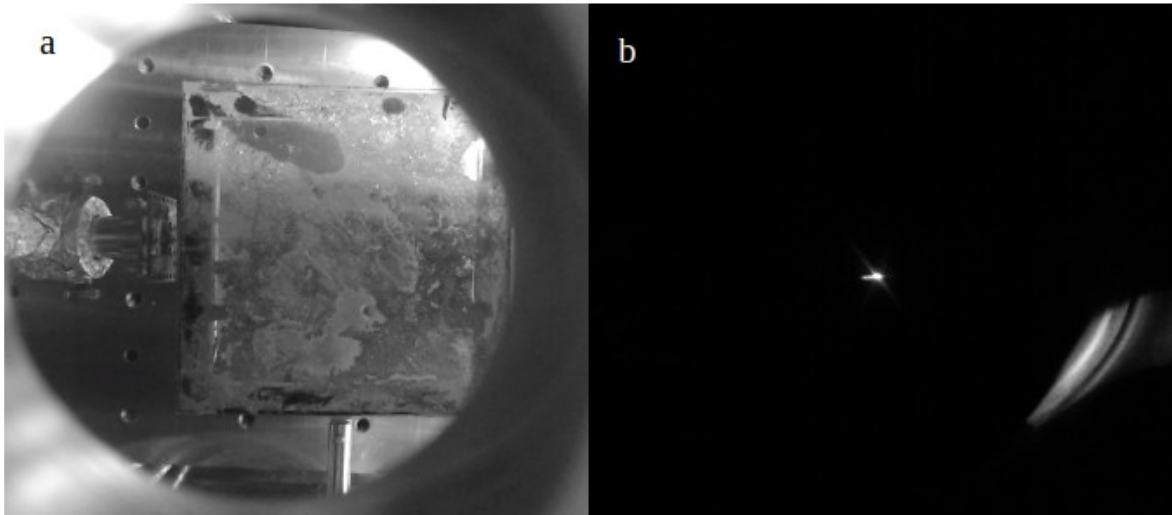


Figura 6: (a) Vista superior de la placa fosforada desde la ventana en la cámara (luz interna prendida). A la izquierda de la placa se observa la copa de Faraday. (b) Se muestra como se ve el haz impactando con la placa inclinada a 10° (luz interna apagada).

Finalmente, se verificó que las muestras se ubiquen ligeramente por debajo de la línea de emisión de la pistola de electrones. Por medio de voltajes de deflexión electrostática se podía colocar el haz en su centro geométrico. No obstante, existía un ángulo de declinación de la placa mínimo (apertura geométrica, véase figura 7), aproximadamente igual a 2.5° , para el cual el haz pasaba al menos parcialmente al detector. En otras palabras, a partir de 2.5° , se obtiene un cierre geométrico total del haz de electrones.

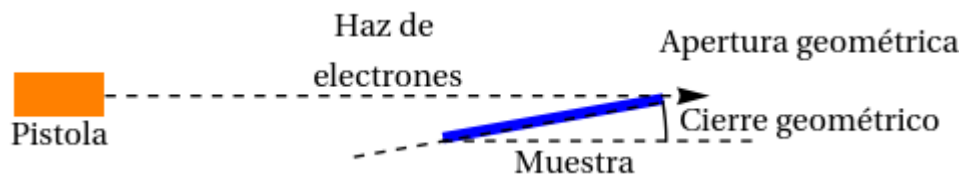


Figura 7: Esquema de apertura geométrica de la placa.

1.8 Diseño y análisis de un brazo angular

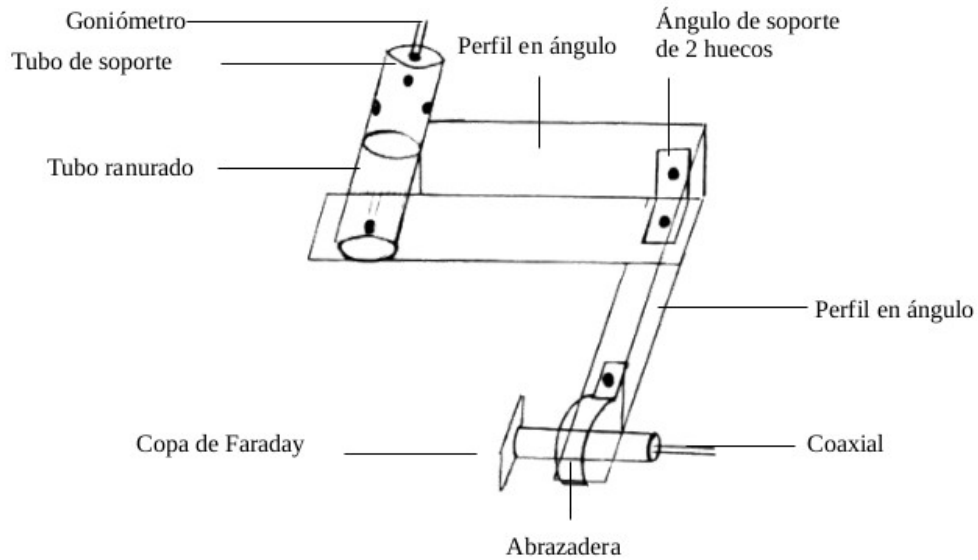


Figura 8: Diseño de brazo angular conectado a goniómetro de precisión angular.

Para analizar el haz que se defleca desde la muestra, se puede proponer un movimiento del detector lineal o circular. Para el segundo caso, se diseñó un brazo como el que se muestra en la figura 8. El brazo, que sostiene a la copa de Faraday mediante una abrazadera, se conecta a un goniómetro de precisión angular. Las dimensiones del brazo fueron escogidas de acuerdo a las dimensiones de la cámara y de la placa. La estructura se construyó con un perfil de aluminio de una pulgada de ancho por lado y de un tubo ranurado. No obstante, fue necesario pulir el brazo puesto que poseía una capa aislante, la cual, podía causar acumulaciones indeseadas de carga.

Se colocó el goniómetro angular mostrado en la figura 9 (a) y el brazo diseñado, paralelo al eje de rotación de la muestra, dentro de la cámara, como se muestra en la figura 10 (b). Se estableció en la pistola una energía de 5 keV y una corriente de incidencia de 5 μA . Variando el ángulo de declinación de la muestra en pasos de 5° , se hicieron mediciones de corriente del haz de electrones deflectado. Se identificó que la precisión del goniómetro era muy pequeña y, por tanto, se decidió adaptarlo para que se redujera su paso a 0.75° , como se observa en la figura 9 (b). Asimismo, se adaptó el goniómetro angular para la rotación de la muestra, reduciendo su paso de 5° a 2.5° .

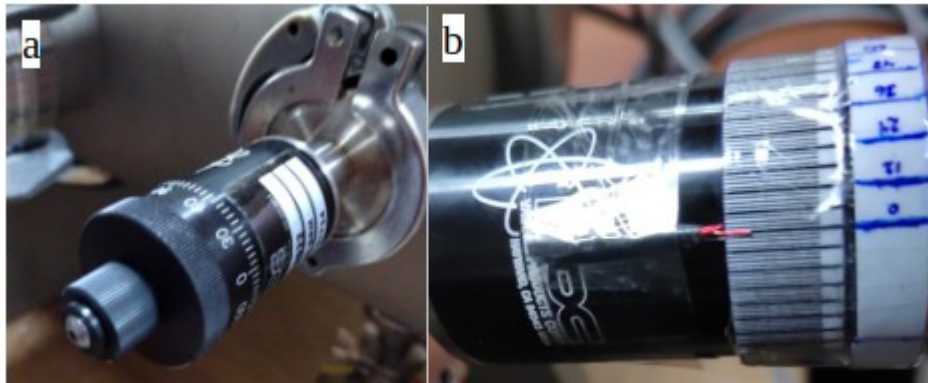


Figura 9: (a) Goniómetro angular, su paso es de 5°. (b) Adaptación para mediciones con pasos de 1.5°.

Se mantuvo la energía previamente mencionada, se incrementó la corriente de incidencia a 30 μ A. Se utilizó el goniómetro angular con mayor precisión. Se hicieron mediciones de la corriente deflectada por la muestra variando su inclinación en pasos de 2.5°. Se realizó el mismo experimento con el esquema mostrado en la figura 10 (a), es decir, con el goniómetro lineal, para fines comparativos.

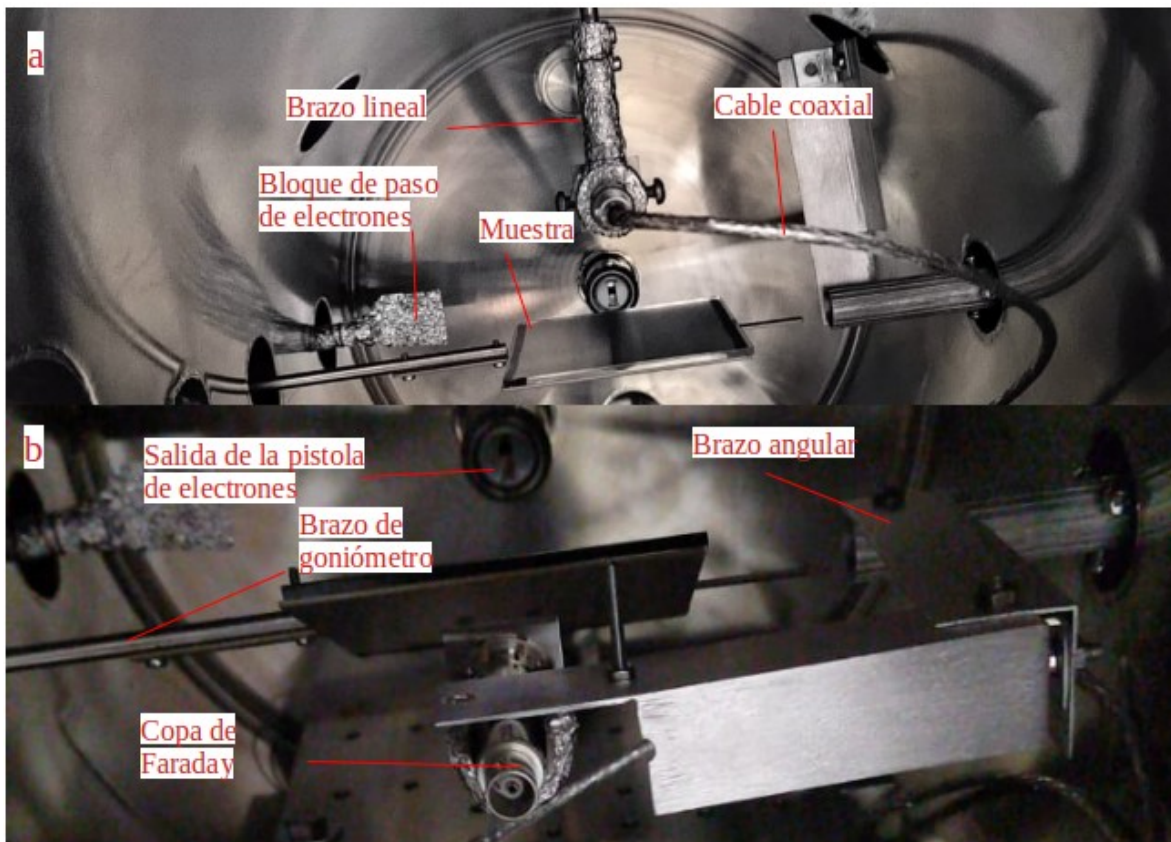


Figura 10: Esquema experimental interno con goniómetro lineal (a) y angular (b).

1.9 Análisis del efecto guiding versus corriente incidente sobre la muestra

Usando el goniómetro lineal, como se muestra en la figura 10 (a), se configuró la pistola para emitir electrones con una energía de 5 keV. Se varió la corriente de incidencia I_{cc} desde 10 a 100 μA en pasos de 10 μA y desde 100 a 1000 μA en pasos de 100 μA . Las mediciones recopiladas fueron tanto con incidencia directa sobre el detector como con la muestra declinada a 5°. Cuando el haz incidió sobre la muestra, se esperó un tiempo de 5 a 10 minutos para permitir la formación de un parche de carga.

Cada dos perfiles de corriente recopilados, se tomó una foto de la mancha producida en la ventana fosforada ubicada en el extremo opuesto a la pistola en la cámara. Además, para corrientes de incidencia de 10 y 1000 μA , se recopilaron mediciones variando la declinación de la placa de 5° hasta 25°, en pasos de 5°.

2 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

2.1 Discusión y Resultados

Todos los datos recopilados fueron almacenados en formato .Calc. Seguidamente, fueron transformados a formato .csv para analizarlos en el programa Wolfram Mathematica. Asimismo, se hizo estudios de la placa de borosilicato después de todos los experimentos mediante un microscopio óptico. Los puntos de los gráficos que se presentaran posteriormente en el escrito están unidos mediante líneas, ello con el único fin de mejorar la visibilidad.

Comparación de movimiento lineal versus movimiento angular

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 11 y 12. En primera instancia, se puede observar que no existe una diferencia significativa para el caso de un movimiento angular o lineal. En ambos casos, se mantienen características como la magnitud de los máximos de corriente o la morfología de los perfiles.

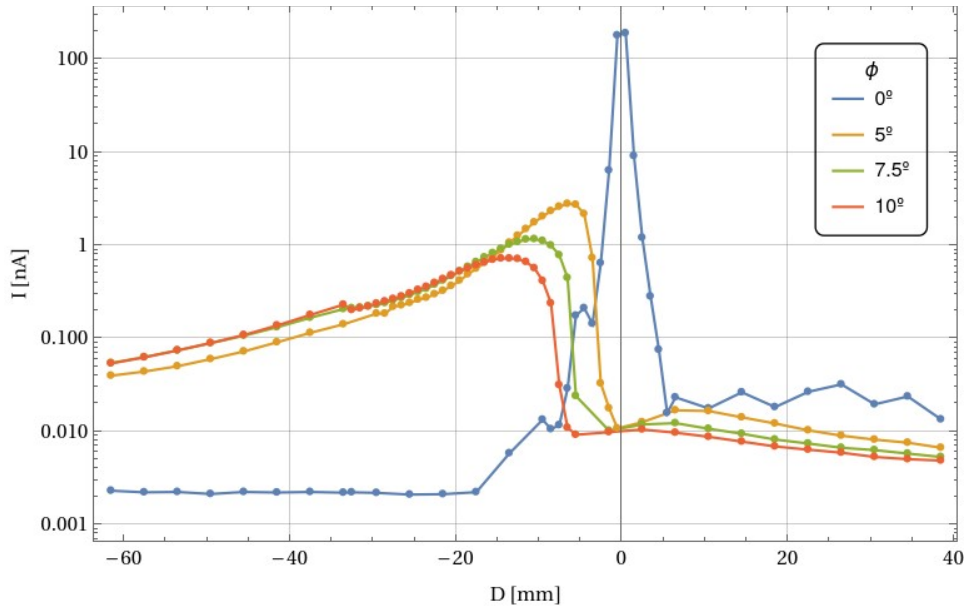


Figura 11: Mediciones con el goniómetro lineal con escala logarítmica. A la derecha se muestra los valores de inclinación de la muestra (ϕ).

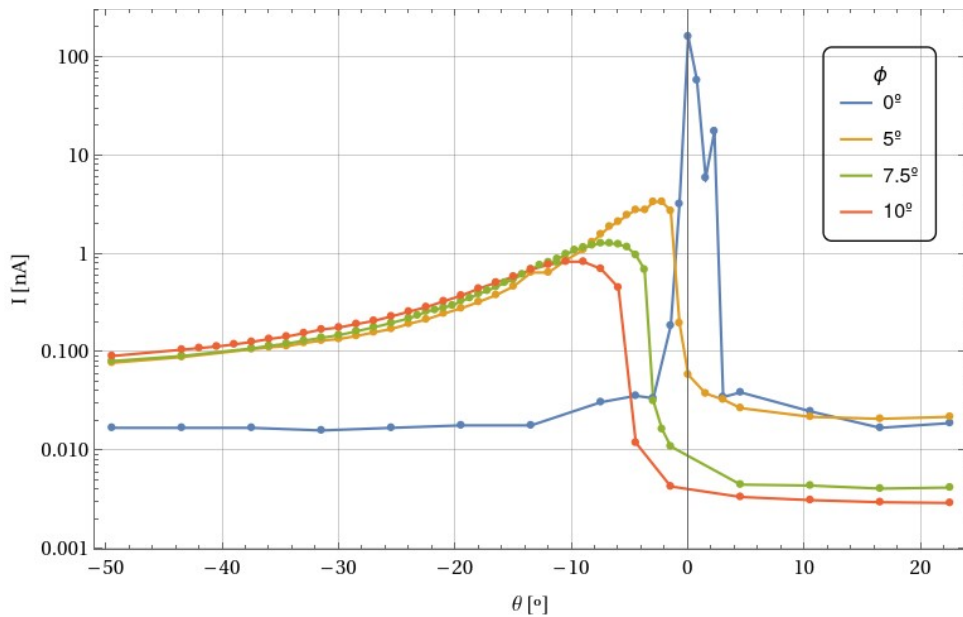


Figura 12: Mediciones con el goniómetro angular con escala logarítmica. A la derecha se muestra los valores de inclinación de la muestra.

En la figura 14 se muestran los esquemas de movimiento del detector. Tómese en consideración dos electrones, e_1 y e_2 , que parten desde la muestra. Su repulsión coulombica mutua provocará que no mantengan una trayectoria paralela, por el contrario, tenderán a alejarse a medida que se desplazan. Como se observa en la figura 13, los extremos de medición del esquema lineal permiten un mayor desplazamiento de los electrones y, por tanto, una mayor dispersión de ellos, dificultando la captura de

electrones dentro de la copa. Además, en el esquema lineal la captura no es directa como lo sería el esquema angular. Por tanto, se puede suponer que el esquema lineal presentará una ligera limitación para medir corrientes ubicadas en los extremos de la cámara.

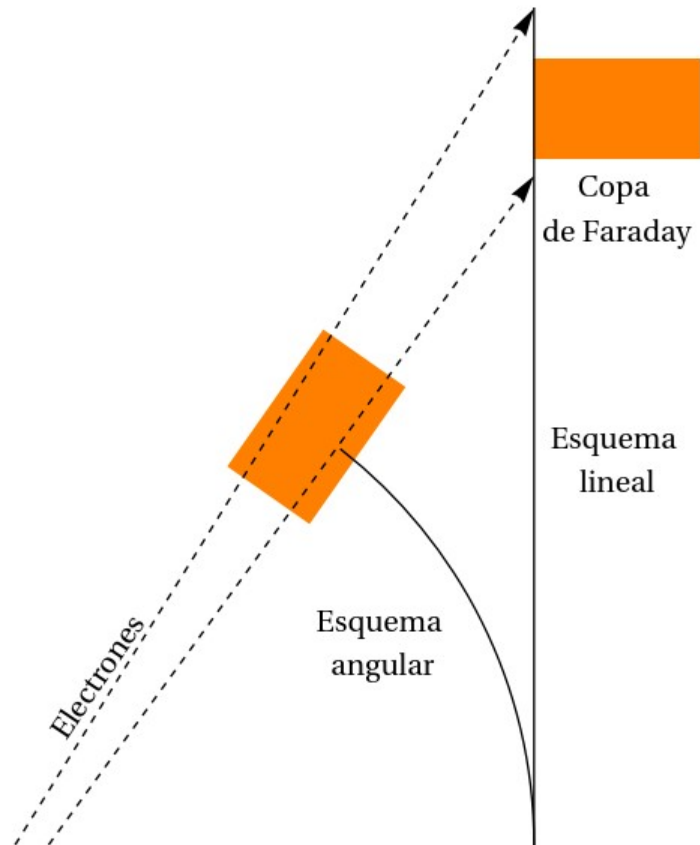


Figura 13: *Dispersión y captura de los electrones en los esquemas lineal y angular.*

Asimismo, desde el centro de la muestra se puede establecer una distancia R . El esquema angular medirá la corriente deflectada versus θ y el esquema lineal versus D . Así, como se observa en la figura 14, se puede establecer una relación trigonométrica sencilla entre ambos esquemas como se muestra en la ecuación 2. El valor de R es aproximadamente igual a 80 mm. Como referencia, si se realizan mediciones con un paso lineal de 1 mm, su equivalencia angular tendría un paso de aproximadamente 0.71° .

$$D = R \tan \Theta \quad (2)$$

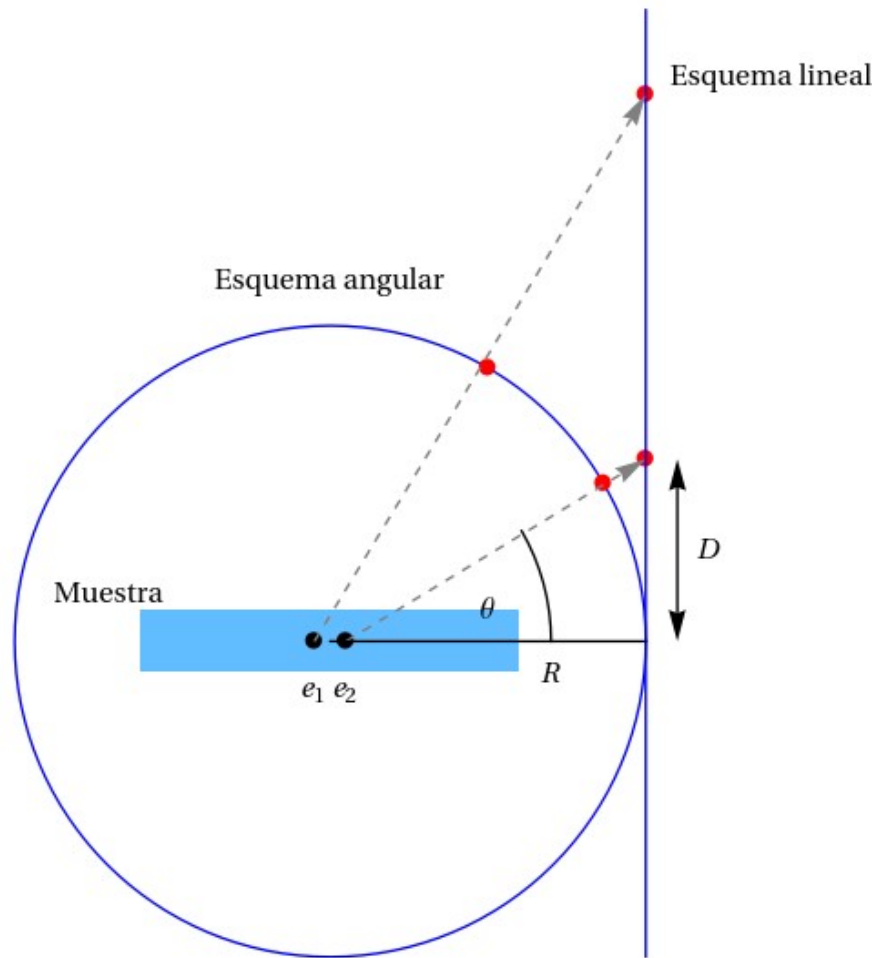


Figura 14: Esquema del movimiento lineal y angular del detector. En rojo están los puntos de medición de ambos esquemas.

En la figura 15 se muestra una comparación de ambos casos, para ello, se realizó la transformación propuesta en la ecuación 2 a los datos recopilados con el esquema lineal. Se observa que la resolución de las mediciones angulares es ligeramente menor. Los máximos de intensidad no están posicionados en la misma ubicación, ello puede deberse a la dificultad de colocar al detector a la misma distancia de la placa utilizando ambos esquemas. Se evidencia que las mediciones por debajo de menos 30 grados tienden a separarse con casi el doble de magnitud de intensidad de corriente.

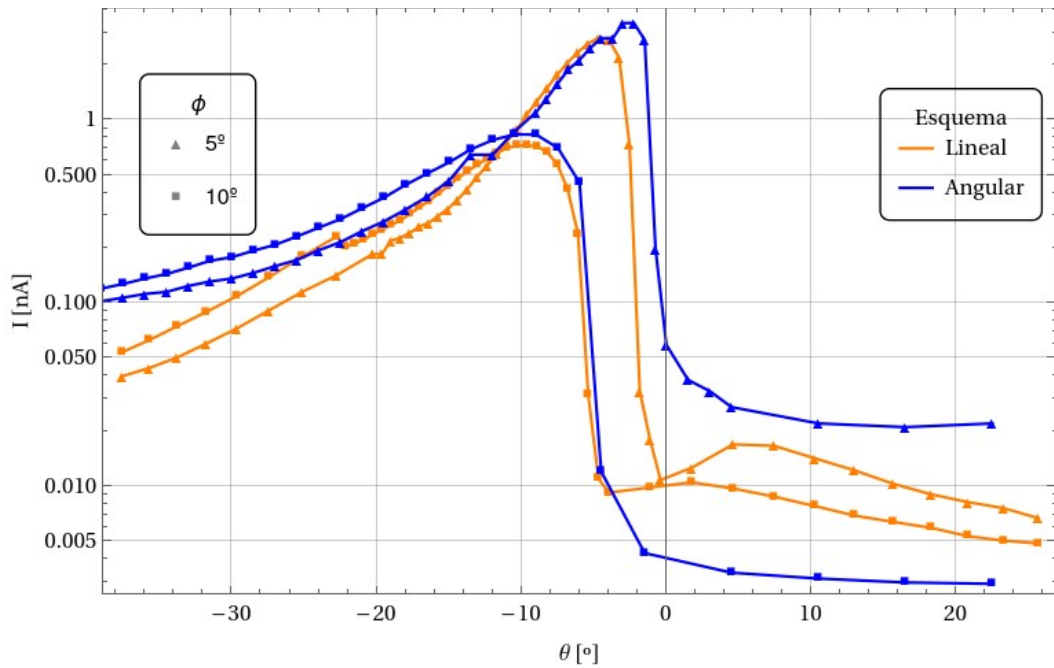


Figura 15: Comparación entre los esquemas de medición utilizados.

Además, mediante la figura 16 se presenta un análisis de la posición de los máximos de intensidad recopilados (D_{max} y θ_{max}) en función del ángulo de inclinación de la placa para ambos esquemas. Los puntos experimentales parecen seguir una tendencia lineal, así, se realiza un ajuste que se muestra en azul y naranja. Como muestra de la validez del ajuste realizado, se menciona que el valor R^2 es aproximadamente 0.94 para el esquema lineal y 0.88 para el esquema angular.

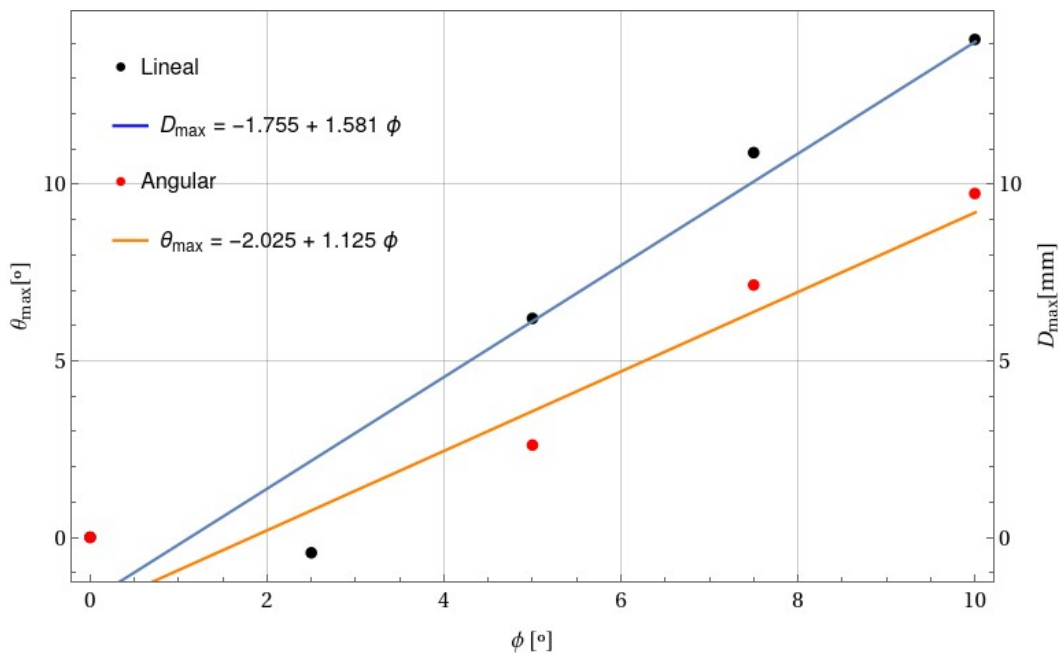


Figura 16: Posición de máximos de intensidad versus ángulo de inclinación de la muestra en ambos esquemas experimentales.

Por otro lado, en la figura 17 se muestran la magnitud de intensidad de corriente máxima (I_{max}) en el esquema lineal según el ángulo de declinación de la muestra. Se puede observar como la corriente medida decrece de forma exponencial según aumenta el ángulo de declinación. Se trató ajustar los puntos según la ecuación 1 propuesta para capilares. No obstante, los puntos no se ajustaron a la curva propuesta. Sin embargo, se propuso una ecuación similar, mostrada en la figura 17, cuyos parámetros pueden interpretarse de la misma manera que la ecuación 1. El ajuste realizado posee un valor R^2 aproximadamente igual a 0.99, validando su uso.

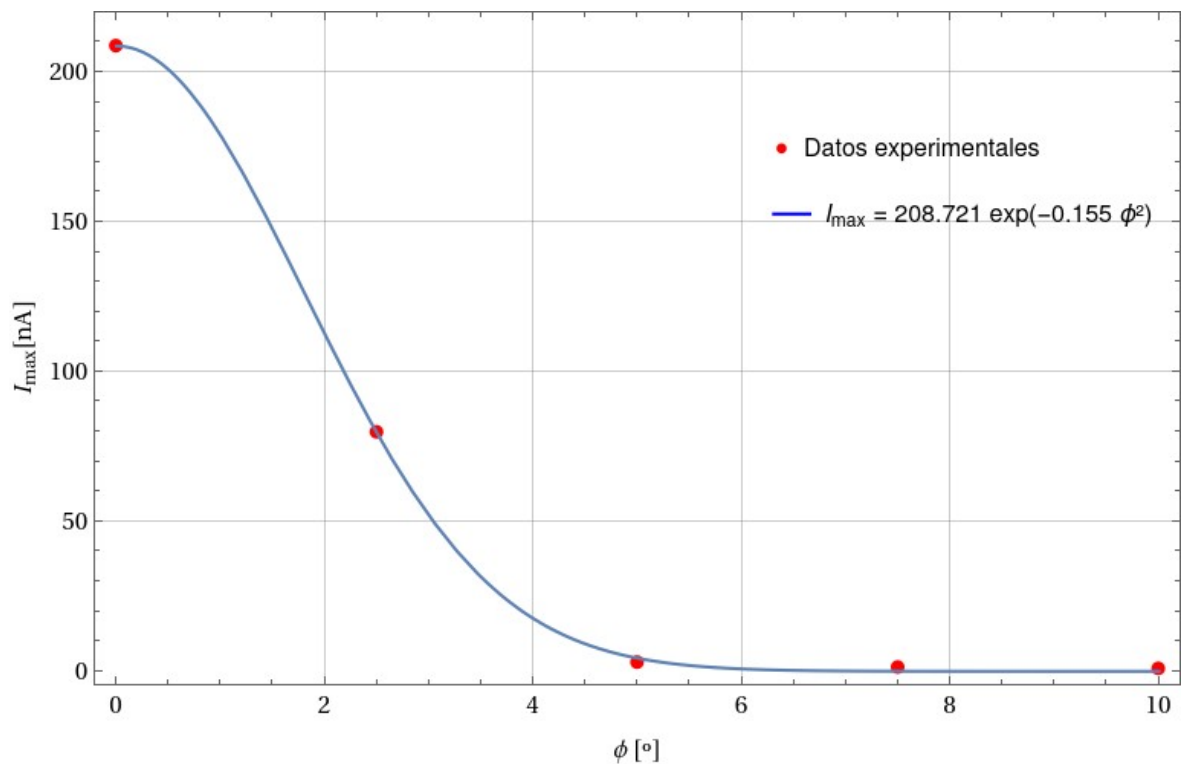


Figura 17: Intensidad de corriente máxima medida versus ángulo de declinación de la muestra.

En conclusión, según se observan las figuras 11 y 12, las mediciones realizadas comparando los esquemas de movimiento del goniómetro angular y lineal no permiten establecer una clara diferencia entre ambos. No obstante, la figura 15 permite corroborar que las mediciones realizadas en los extremos del esquema lineal presentan un registro inferior de casi el doble de corriente. Por lo tanto, se concluye que es mejor utilizar el esquema angular. Aun así, el esquema angular tiene complicaciones prácticas para alcanzar la precisión que ofrece el esquema lineal. De esta manera, el uso de un esquema angular es recomendable cuando el paso ofrecido por este sea de aproximadamente 0.7° como mínimo.

Asimismo, los máximos de intensidad de corriente medidos decaen de forma exponencial según el ángulo de declinación de la muestra. En general, el mismo comportamiento se puede observar en las mediciones que están fuera de fondo. Sin embargo, el comportamiento no es el predicho por Milosavljevic et al. [6] para capilares, por lo que se propuso uno diferente, aun cuando los parámetros se los puede interpretar de la misma forma. Las posiciones de los máximos de intensidad de corriente siguen un comportamiento lineal en ambos esquemas de medición.

Análisis de corriente en el efecto Guiding

Los resultados de las mediciones realizadas con el haz incidiendo directamente sobre la copa (haz directo) se muestran en las figuras 18 y 19. Se visualiza como las mediciones de fondo (alrededor de los máximos de intensidad) tienen un incremento significativo a partir de la incidencia de $30 \mu\text{A}$. Seguidamente, se mantienen en un mismo orden hasta los $100 \mu\text{A}$. Después, van incrementando gradualmente. En todos los perfiles recopilados, la posición del máximo y forma de las curvas no tienen cambios significativos.

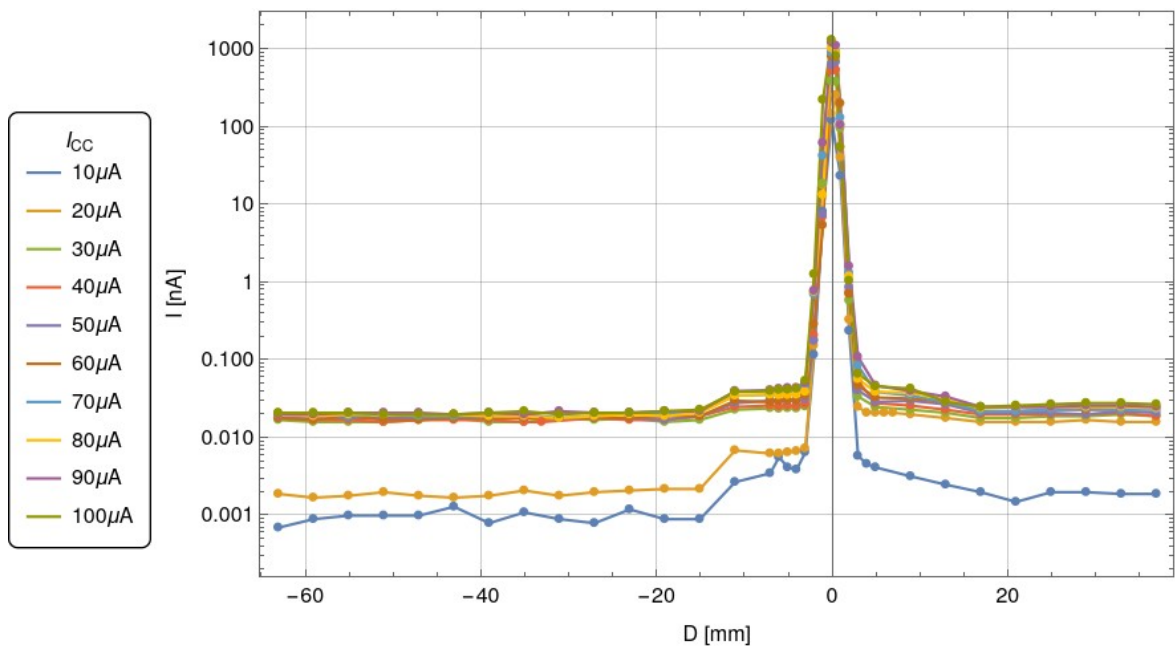


Figura 18: Mediciones de haz directo. A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector.

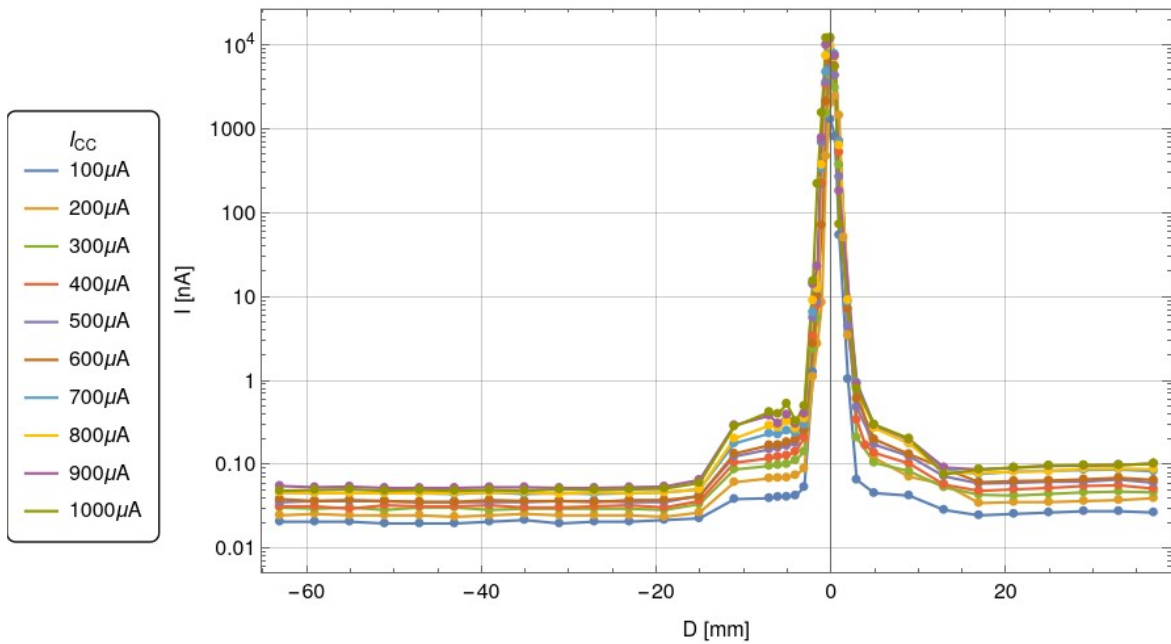


Figura 19: Mediciones de haz directo. A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector.

Por otro lado, los resultados cuando la placa fue declinada a 5° se muestra en las figuras 20 y 21. De la misma manera, se observa que no existen cambios en la posición del máximo de corriente ni en la forma de los perfiles. Cada incremento de la corriente incidente provoca un aumento en la magnitud de la corriente medida en cada punto. Así, cada perfil parece incrementar gradualmente en escala. Además, la corriente medida esta por fuera del cierre geométrico para todas las corrientes irradiadas a la muestra. Por tanto, los electrones necesariamente interaccionaron con la placa.

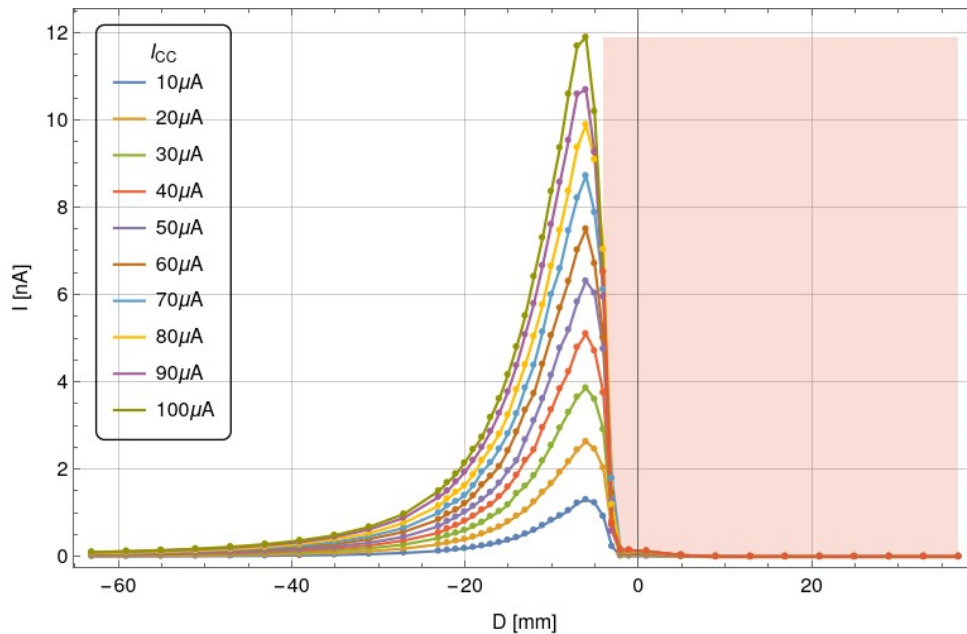


Figura 20: Mediciones de corriente cuando la muestra estaba declinada 5° . A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector. En rojo se muestra la región a la que los electrones no pueden incidir debido al cierre geométrico.

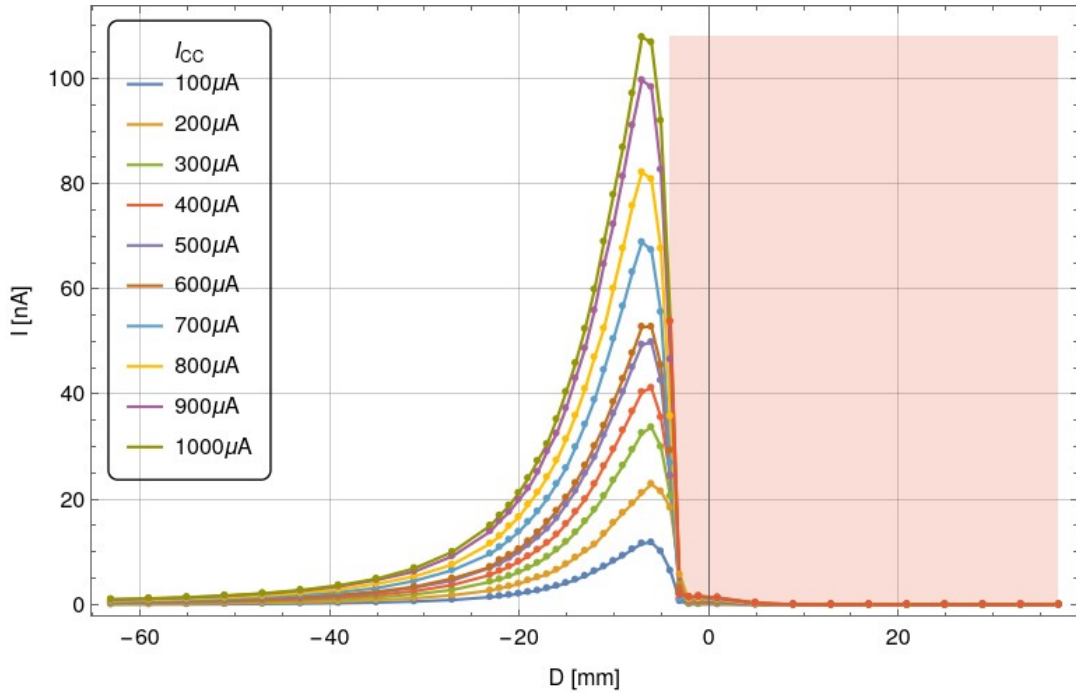


Figura 21: Mediciones de corriente cuando la muestra estaba declinada 5° . A la izquierda se muestra las corrientes incidentes al detector. En rojo se muestra la región a la que los electrones no pueden incidir debido al cierre geométrico.

En la figura 22, se observa como las mediciones realizadas cuando la placa estuvo declinada 5° sobresalen de aquellas mediciones con incidencia directa para 3 corrientes características. El mismo comportamiento se evidenció para todas las corrientes de emisión estudiadas. De esta forma, se corrobora la presencia de electrones en zonas donde previamente no podían llegar, y, por lo tanto, se comprueba que se consiguió producir el efecto guiding para todo el rango de corriente de incidencia trabajado.

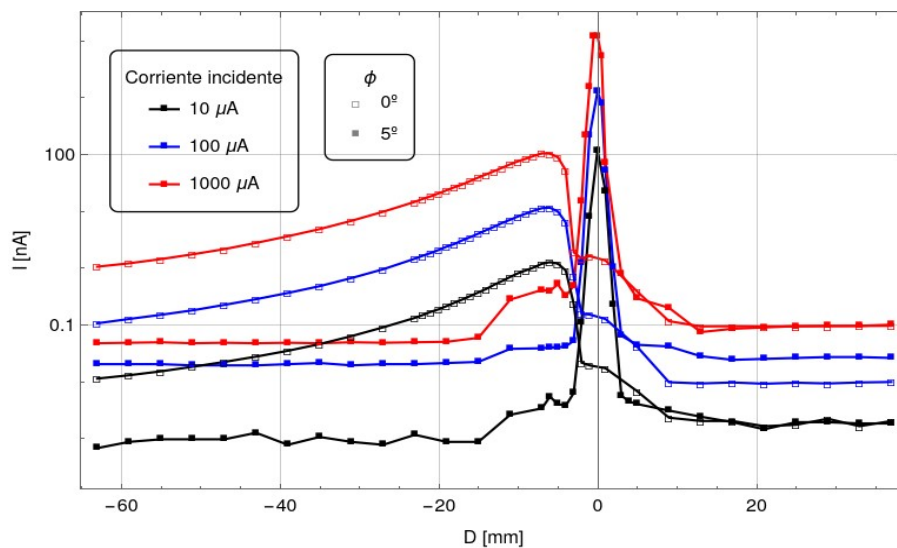


Figura 22: Perfiles de corriente con placa declinada a 5° se encuentran fuera de los perfiles que se forman con el haz incidiendo directamente sobre el detector.

En la figura 23 se muestran mediciones realizadas para diferentes ángulos en los extremos de corriente incidente. Se observa nuevamente un comportamiento típico de electrones dirigidos por una muestra de material aislante, en otras palabras, se registra electrones en regiones donde antes no podían haber llegado, comprobando un cambio en la dirección del haz. Para ambos casos de corriente, las curvas para todos los ángulos conservan su forma, solo parecen estar re-escaladas. Asimismo, se evidencia que inclusive los valores de corriente medidos fuera del máximo y por debajo de la placa mantienen su orden de magnitud. El haz llegó a ser deflectado 26.56 grados sobre su línea de emisión.

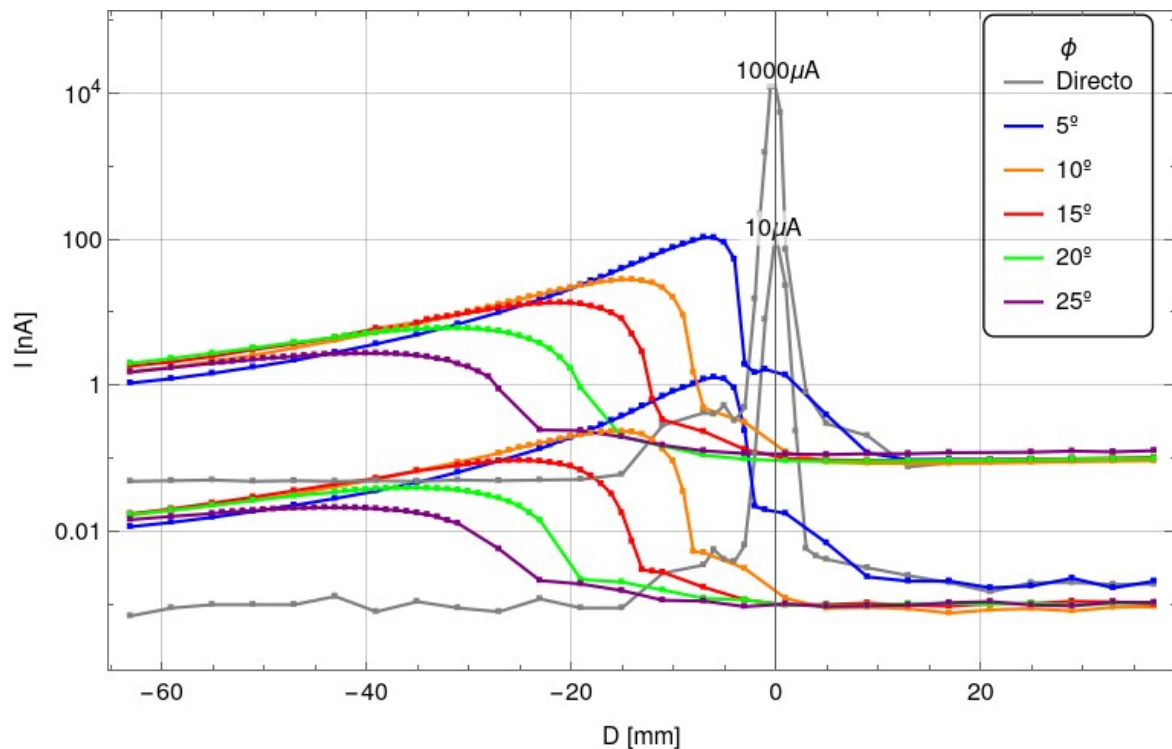


Figura 23: Mediciones de corriente para el máximo y mínimo de corriente irradiada para varios ángulos.

La figura 24 muestra como los máximos de intensidad (I_{max}) van incrementando con un comportamiento lineal de acuerdo a la corriente incidente. En conjunto, todas las figuras de esta parte del escrito permiten identificar un comportamiento muy interesante. Todo perfil de corriente, usando cierta corriente de incidencia I_{cc_k} , puede ser construido mediante el escalamiento de otro perfil previamente ya medido. Por ejemplo, si se considera como base $I_{cc_0} = 10 \mu A$, todos los demás perfiles, a cualquier corriente incidente, pueden ser reconstruidos a partir de él.

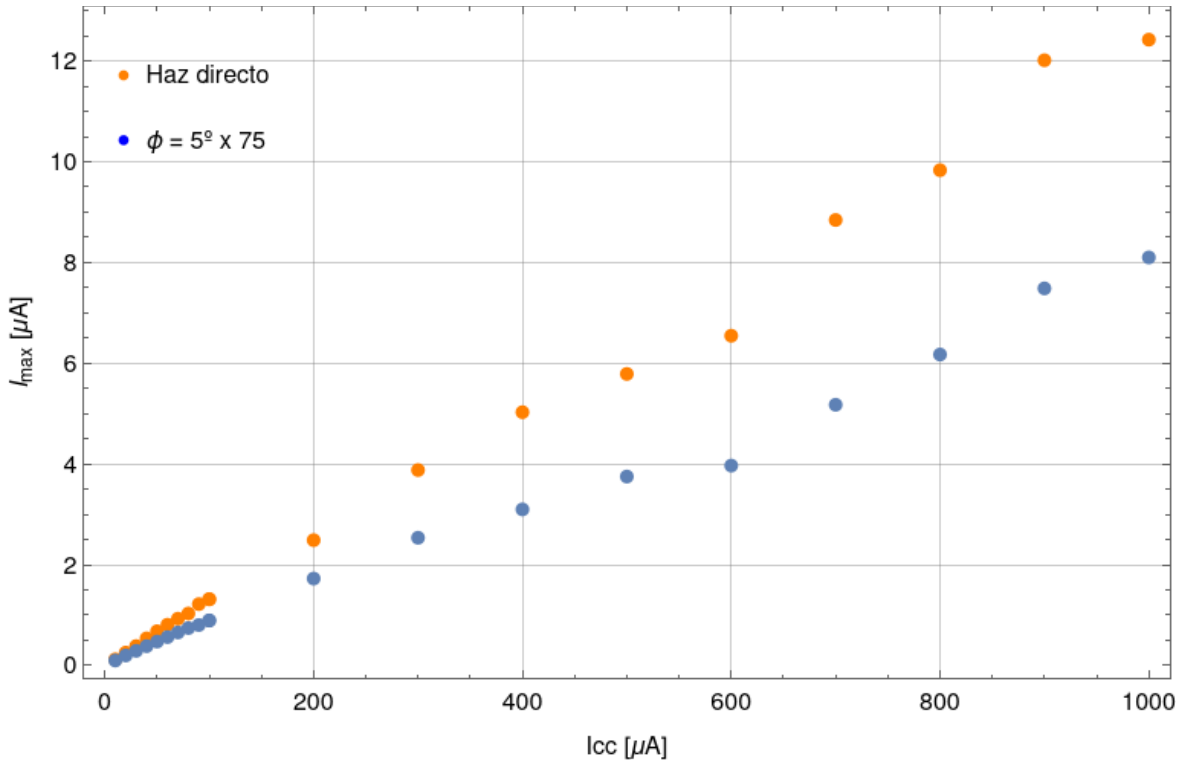


Figura 24: Máximos de intensidad medida versus la corriente incidente. Para el caso de $\phi = 5^\circ$ se multiplicó por el factor mostrado en la leyenda del gráfico.

Empero, anti-intuitivamente no se cumple que el factor de escala sea exactamente la relación de las corrientes de incidencia ($r_E = I_{cc_k}/I_{cc_0}$). En otras palabras, si se tiene un perfil medido con una corriente de incidencia I_{cc_0} , no se construye el perfil a $2I_{cc_0}$ exactamente del doble del anterior.

Sea r_M el cociente entre una corriente medida utilizando una corriente de incidencia I_{cc_k} y I_{cc_0} (I_k/I_0). Se puede construir una relación entre r_E y r_M tal como se muestra en 25. Para este caso, r_M fue calculado a partir del cociente de los máximos de intensidad de las figuras 18, 19, 20 y 21. Tanto para el caso de incidencia directa como para el caso con la placa inclinada 5° , los ajustes presentan un valor de R^2 aproximadamente igual a 0.99. Se puede observar como el factor de escalamiento (pendiente) cuando el haz incide directamente al detector es próximo a uno.

En la figura 26, se muestra un ejemplo de aplicación de la ecuación para $\phi = 5^\circ$ con varias corrientes de incidencia. Se hace hincapié en que se tomó $I_0 = 10 \mu A$ (corriente base). Se observa que en todos los casos los perfiles recopilados experimentalmente son comparables con los escalados a partir de I_0 .

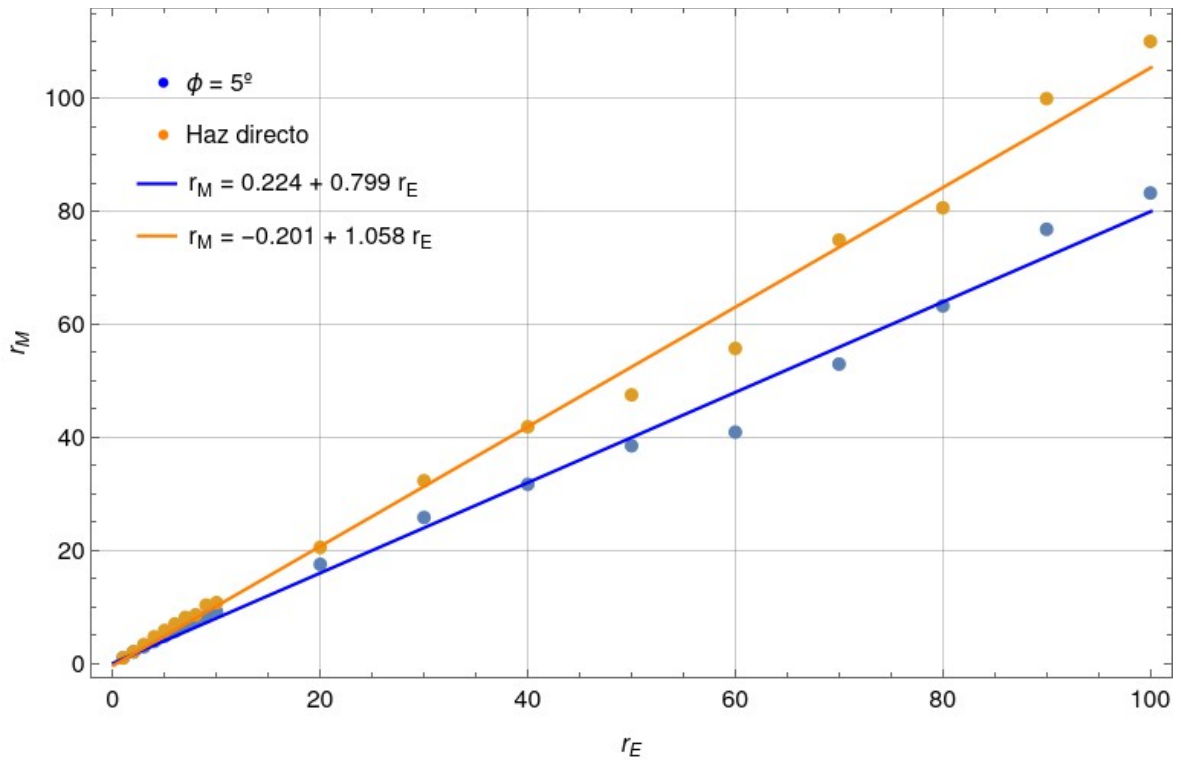


Figura 25: Relación entre los cocientes de las corrientes medidas y las corrientes incidentes para el haz directo y con la placa declinada 5° .

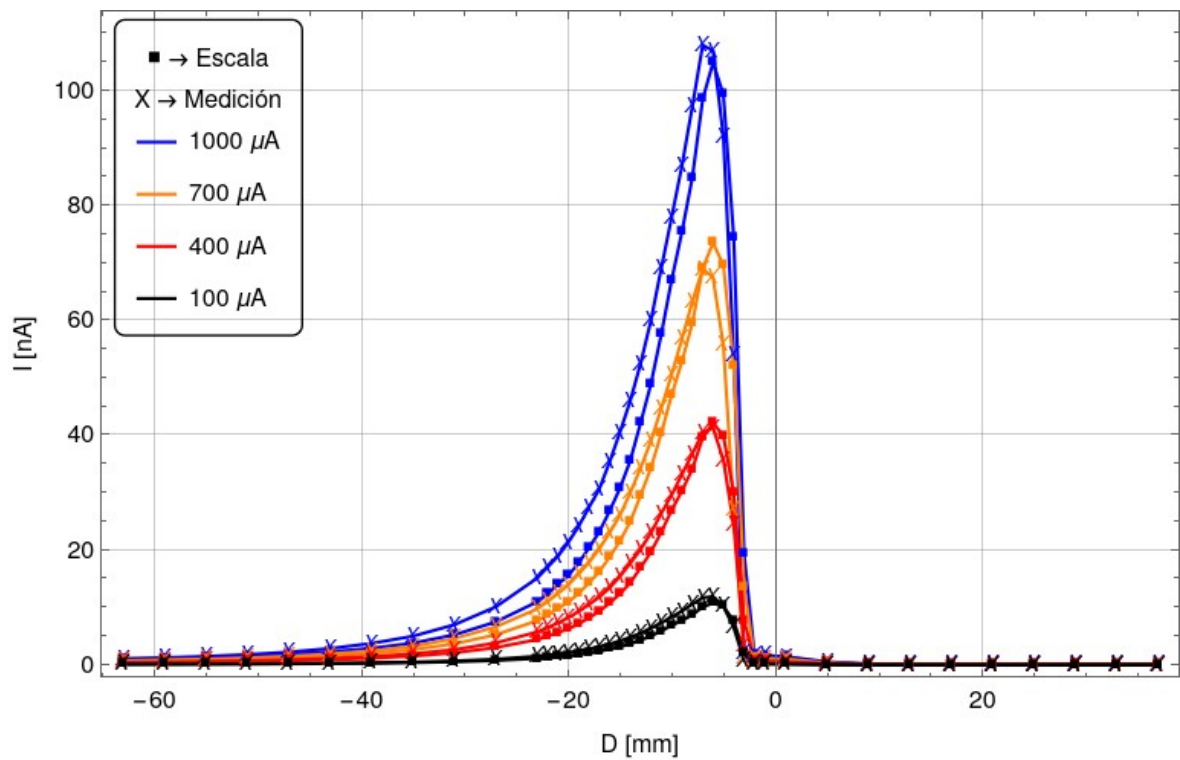


Figura 26: Comprobación factor de escala hallado para el caso cuando a placa esta declinada a 5° .

En conclusión, los resultados que se ofrecen desde la figura 18 a la 23 permiten deducir que la forma en la que se dispersan los electrones en una muestra macroscópica no está relacionada a la intensidad de corriente incidente. En otras palabras, el efecto guiding no se ve afectado por la corriente que incide sobre la muestra, al menos en el rango trabajado. Por otro lado, se observó que los máximos de intensidad se incrementan de forma lineal de acuerdo a la intensidad de corriente incidente. Adicionalmente, se identificó que basta con saber la ecuación de escalamiento, para un ángulo de declinación de la muestra, para reproducir cualquier perfil de corriente a cualquier valor de corriente incidente a partir de uno previamente medido.

Superficie de la muestra

Los resultados de las mediciones realizadas utilizando una placa con polvo fosforescente en su superficie en vez de la muestra de borosilicato se muestran en la figura 27. Las curvas se sobreponen en su mayoría y la corriente de fondo llega a ser comparable con algunos máximos de intensidad. Se observa que debido al recubrimiento con polvo fosforescente existe una pobre capacidad para manipular la trayectoria de electrones. Además, las curvas son amorfas y no parecen seguir alguna tendencia conocida.

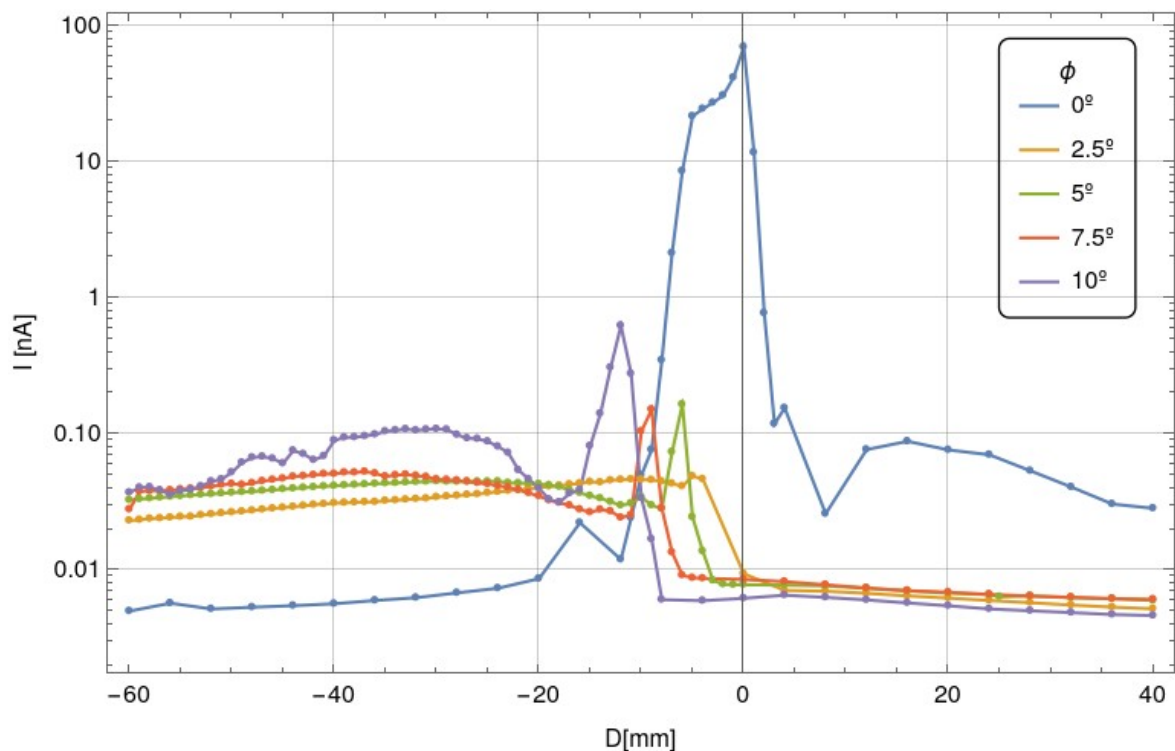


Figura 27: Mediciones de corriente con la placa con polvo fosforescente en su superficie.

Después del experimento presentado en la sección anterior, varios implementos utilizados sufrieron ciertos daños, como la máscara de la copa de Faraday o la pantalla ubicada en la parte posterior de la cámara (véase los anexos del escrito). Sobre la muestra de borosilicato apareció una mancha de color dorado, en la zona de incidencia del haz de electrones, como se muestra en la figura 28. Seguidamente, se fue limpiando la zona afectada con un paño de lino y alcohol etílico al 70%. En cada pasada, se utilizó un microscópico óptico y se capturo el resultado. Progresivamente, se fue obteniendo una mancha de color opaco, tal como se describió en la introducción del escrito.

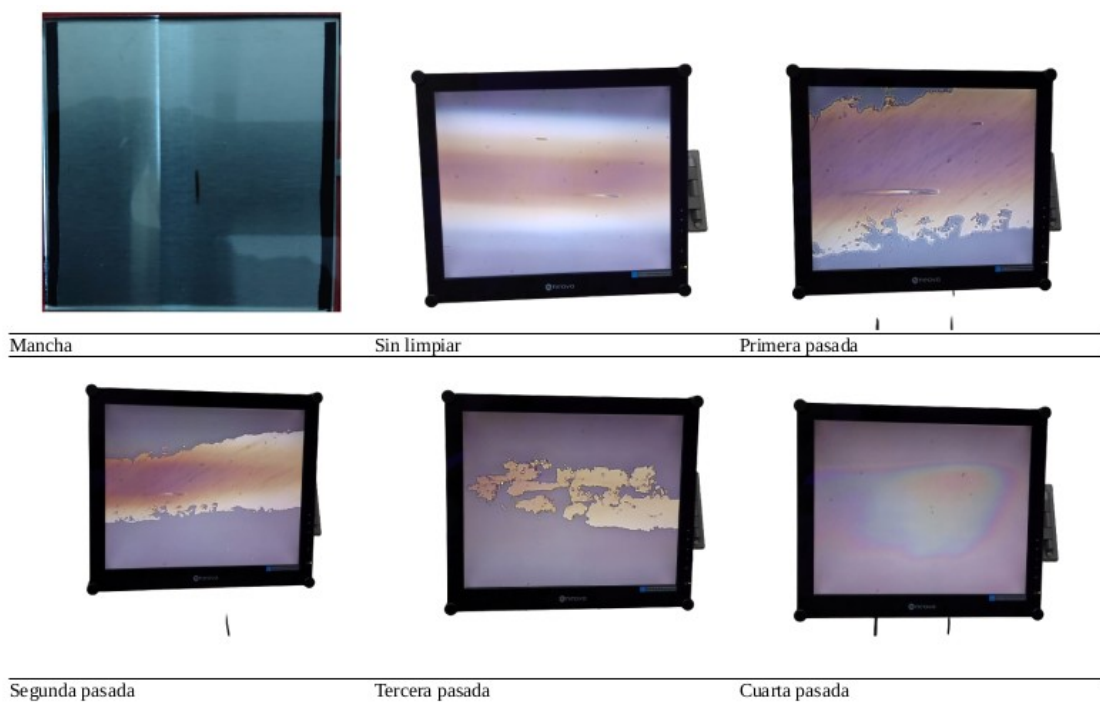


Figura 28: *Desgaste en la placa de borosilicato.*

Finalmente, como se observa en la figura 27, existe una clara relación entre las características superficiales de la muestra y la forma en la que se dispersan los electrones sobre ella, tal como se mencionó en la introducción. Por tanto, se infiere que la zona de desgaste mostrada en la figura 28 podría tener repercusiones en la capacidad de la muestra para modificar la trayectoria de un flujo electrones.

2.2 Conclusiones

- El esquema de medición angular tiene una mayor capacidad para captar electrones especialmente en sus extremos de medición.
- Existe una dependencia lineal entre el ángulo de declinación de la muestra y la posición de los máximos de corriente medidos.
- Existe una relación exponencial decreciente entre el ángulo de declinación de la muestra y la intensidad de corriente medida.
- La forma en la que se dispersa un flujo de electrones sobre una muestra macroscópica no se ve afectado por la intensidad de corriente incidente.
- Se pueden reproducir los perfiles de corrientes para cualquier corriente incidente por medio de un solo perfil medido de antemano y una ecuación de escalamiento para un ángulo fijo de declinación de la placa.
- El efecto guiding depende de manera significativa de las características superficiales de la muestra utilizada.

2.3 Recomendaciones

- Si se desea utilizar el esquema angular, se sugiere menorar el paso ofrecido por el goniómetro a al menos 0.7° .
- Por otro lado, se recomienda analizar la evolución del desgaste de la muestra en la zona de incidencia de acuerdo con la corriente emitida hacia la misma.
- Finalmente, se sugiere analizar si existe una variación en la conductividad superficial de una muestra desgastada en la zona de incidencia, así como analizar si dicha variación afecta a la dispersión de electrones en el efecto guiding.

3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. S. Dassanayake, S. Das, R. J. Berezky, K. Tókési, y J. A. Tanis, «Energy dependence of electron transmission through a single glass macrocapillary», *Phys. Rev. A*, vol. 81, n.º 2, p. 020701, feb. 2010, doi: 10.1103/PhysRevA.81.020701.
- [2] B. S. Dassanayake *et al.*, «Temporal evolution of electron transmission through insulating PET nanocapillaries», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 298, pp. 1-4, mar. 2013, doi: 10.1016/j.nimb.2012.12.017.
- [3] K. A. Vokhmyanina *et al.*, «Investigation of contactless electron transmission through dielectric channels», *J. Surf. Investig. X-Ray Synchrotron Neutron Tech.*, vol. 7, n.º 2, pp. 271-275, mar. 2013, doi: 10.1134/S1027451013020249.
- [4] N. Stolterfoht *et al.*, «Transmission of 3 keV Ne7+ Ions through Nanocapillaries Etched in Polymer Foils: Evidence for Capillary Guiding», *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, n.º 13, p. 133201, mar. 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.88.133201.
- [5] S. Das, B. S. Dassanayake, M. Winkworth, J. L. Baran, N. Stolterfoht, y J. A. Tanis, «Inelastic guiding of electrons in polymer nanocapillaries», *Phys. Rev. A*, vol. 76, n.º 4, p. 042716, oct. 2007, doi: 10.1103/PhysRevA.76.042716.
- [6] A. R. Milosavljević *et al.*, «Guiding of low-energy electrons by highly ordered Al₂O₃ nanocapillaries», *Phys. Rev. A*, vol. 75, n.º 3, p. 030901, mar. 2007, doi: 10.1103/PhysRevA.75.030901.
- [7] Y. Xue *et al.*, «Electron beam guiding by grooved SiO₂ parallel plates without energy loss», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, n.º 25, p. 254102, dic. 2015, doi: 10.1063/1.4938541.
- [8] K. A. Vokhmyanina *et al.*, «Transport of accelerated electrons through dielectric nanochannels in PET films», *J. Instrum.*, vol. 15, n.º 04, p. C04003, abr. 2020, doi: 10.1088/1748-0221/15/04/C04003.
- [9] A. R. Milosavljević *et al.*, «Charging dynamics in electron transmission through Al₂O₃ capillaries», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 279, pp. 190-193, may 2012, doi: 10.1016/j.nimb.2011.10.034.
- [10] N. Stolterfoht y Y. Yamazaki, «Guiding of charged particles through capillaries in insulating materials», *Phys. Rep.*, vol. 629, pp. 1-107, abr. 2016, doi: 10.1016/j.physrep.2016.02.008.

- [11]H.-D. Nguyen, J.-P. Wulfkühler, J. Heisig, y M. Tajmar, «Electron guiding in macroscopic borosilicate capillaries with large bending angles», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, abr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-87156-4.
- [12]K. A. Vokhmyanina *et al.*, «Guiding of a beam of 10keV electrons by micro size tapered glass capillary», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 355, pp. 307-310, jul. 2015, doi: 10.1016/j.nimb.2015.02.068.
- [13]K. Vokhmyanina *et al.*, «Modeling the process of interaction of 10 keV electrons with a plane dielectric surface», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 422, pp. 91-93, may 2018, doi: 10.1016/j.nimb.2018.03.008.
- [14]K. A. Vokhmyanina *et al.*, «The dynamics of the interaction of fast electrons with dielectric surfaces at grazing incidence», *Phys. Lett. A*, vol. 379, n.º 5, pp. 431-434, feb. 2015, doi: 10.1016/j.physleta.2014.11.041.
- [15]S. Das, B. S. Dassanayake, N. Stolterfoht, y J. A. Tanis, «Sample deterioration in electron guiding through PET nanocapillaries», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 194, n.º 13, p. 132015, nov. 2009, doi: 10.1088/1742-6596/194/13/132015.
- [16]A. Macková, V. Havránek, V. Švorčík, N. Djourellov, y T. Suzuki, «Degradation of PET, PEEK and PI induced by irradiation with 150keV Ar+ and 1.76MeV He+ ions», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 240, n.º 1, pp. 245-249, oct. 2005, doi: 10.1016/j.nimb.2005.06.124.
- [17]S. P. Núñez Bravo, «Caracterización del haz de electrones emitido por la pistola de electrones egg-3101c con energías entre los 100 ev y 10 kev.», bachelorThesis, Quito : EPN, 2022, 2022. Accedido: 13 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22835>

4 ANEXOS

ANEXO I. Vista de pantalla fosforescente P11 después de los experimentos realizados



ANEXO II. Imágenes de la mancha producida por el haz de electrones a diferentes corrientes de emisión

