

DESCARGA GLOW

Antu Nehuen Gortari, Iván Lengyel
3 de mayo de 2011

Laboratorio 5, Departamento de Física J. J. Giambiagi, FCEyN, Universidad de Buenos Aires

En el presente trabajo se estudió la descarga Glow en un tubo cerrado con aire aplicando una tensión al circuito de descarga entre 0 y 600V y valores de presión por distancia entre 0,22mbar.cm y 1,28mbar.cm. Se obtuvieron las curvas de Voltaje-Corriente para cada caso y se analizó el fenómeno de histéresis, al igual que el punto de ruptura y el punto para el cual deja de haber descarga glow. Se ajustaron dichos valores según el modelo propuesto por Paschen determinando las constantes involucradas. Se analizó cualitativamente la dependencia de las franjas de distinta luminosidad con la presión encontrando las regiones características en este tipo de descarga.

I. INTRODUCCIÓN

La descarga glow es una descarga eléctrica autosostenida que se produce en un medio gaseoso al aplicar una tensión entre un par de electrodos ubicados en el interior de un tubo cerrado. Si el voltaje V_e que se le aplica al circuito es muy bajo, la corriente que circula por el gas es prácticamente nula y el voltaje interelectrónico V es el aplicado. Si aumentamos gradualmente V_e , a partir de un valor dado se produce una descarga a través del gas estableciéndose una corriente interelectrónica. Al superarse este voltaje crítico, no solo se produce un aumento de corriente sino que también se observan zonas luminosas y oscuras entre los electrodos, debido a este fenómeno se conoce a esta descarga como *descarga glow*.

La descarga se genera cuando electrones libres o electrones semilla (inyectados artificialmente o arrancados de las moléculas de gas debido a radiación UV o rayos cósmicos) son acelerados por el campo eléctrico generado por los electrodos y alcanzan una energía suficiente para ionizar a los átomos o moléculas del gas y obtener electrones secundarios. A partir de allí se inicia un proceso de avalancha electrónica cuya magnitud depende de factores como la tasa de ionización, pérdida de energía, pérdida de electrones. Al continuar aumentando la tensión V_e la relación de V con la corriente atraviesa distintos comportamientos como se muestra en la figura 1^[1].

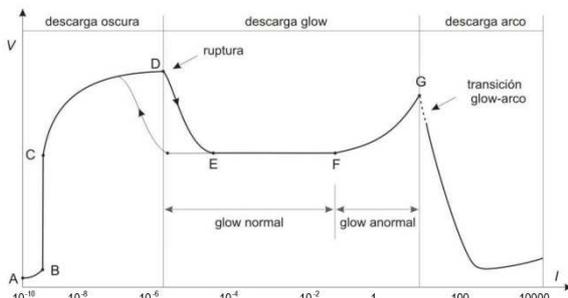


Figura 1. Curva típica del voltaje interelectrónico en función de la corriente a través del circuito.

A. Curva Voltaje corriente

Se conoce como zona de *descarga oscura* a la región debido de A-D debido a que la ionización es tan pequeña que no se observa emisión de luz^[2]. En dicha zona se delimitan las siguientes zonas:

A-B: se observa una corriente débil debida a la migración hacia los electrodos de cargas espurias. Si se aumenta el voltaje la corriente aumenta.

B-C: Si el voltaje aumenta lo suficiente se colecta la mayor cantidad de cargas espurias posibles y se alcanza una saturación en la corriente. En esta región la corriente permanece constante a pesar de que se aumente V .

C-D: la corriente comienza a aumentar exponencialmente. A energía que alcanza un electrón es suficiente para ionizar un átomo o molécula. Si el campo es suficientemente intenso los electrones secundarios pueden ionizar otros átomos o moléculas produciendo un efecto de avalancha. Esta región recibe el nombre de *descarga Townsend* y las corrientes típicas varían entre 10^{-10} - 10^{-5} A

D: Ruptura eléctrica. En este punto los electrones libres o semilla alcanzan a ionizar las partículas en el gas generando nuevos electrones que a su vez pueden ionizar nuevamente más partículas produciendo una reacción en cadena denominada *avalancha electrónica*. A partir de este punto la descarga es autosostenida. En esta instancia la corriente puede aumentar entre 4 y 8 órdenes de magnitud.

La segunda región es la de *descarga glow*, debe su denominación a que en se emite radiación visible. La luminosidad se debe a que la energía y densidad de las cargas son suficientes para provocar numerosas excitaciones en el medio, el cual al volver al estado natural irradia luz visible.

E-F: luego de la ruptura se alcanza el régimen de *glow normal*. En esta región el voltaje interelectrónico es prácticamente independiente de la corriente. A medida que aumenta V_e aumenta la corriente sin haber modificaciones en V . Esto se debe a que se produce un aumento del área a través de la cual fluye la corriente, sin cambio en la densidad de corriente j .

F-G: cuando el área del cátodo está cubierta completamente (punto F) la corriente se aumenta a expensas de un aumento en j , lo cual se traduce a un aumento en V . A esta región se la denomina *descarga de glow anormal*.

Si se supera G se produce una *descarga de arco* entre ambos electrodos. Se produce una fuerte caída de V y un aumento de I .

B. Curvas de Paschen

En 1889 Friedrich Paschen estudió la tensión de ruptura de un gas entre dos electrodos planos paralelos en

función de la presión del mismo y la distancia entre los electrodos. Encontró que para un determinado gas y material del cátodo la tensión de ruptura depende del producto $p \cdot d$ siendo p la presión del gas y d la distancia entre electrodos. Esta relación esta descrita por

$$V_r = \frac{a \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + b} \quad [1]$$

con a y b constantes dependientes del gas. La tensión de ruptura tendrá un mínimo cuando la presión y la distancia cumplan

$$p \cdot d = e^{1-b} \quad [2]$$

Como se observa en la figura 2 para algunos gases específicos esta curva tiene un valor mínimo para un valor dado de $p \cdot d$ y crece hacia ambos lados.

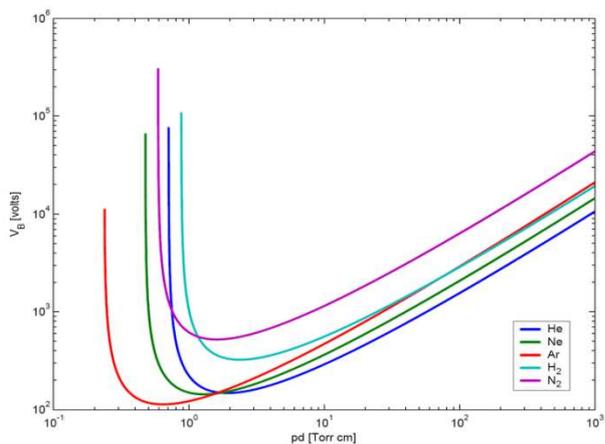


Figura 2. Curvas de Paschen para He, Ne, Ar, H_2 y N_2 . El voltaje como la relación pd están en escala logarítmica.

C. Histéresis

En un plasma de estas características existe un ciclo de histéresis por lo cual no es posible determinar en qué región se encuentra la descarga únicamente a partir de la tensión aplicada en ese instante. El potencial requerido para iniciar o interrumpir la avalancha electrónica (punto D en la curva de la figura 1) no es el mismo si no que depende del sentido en el cual se esté variando la tensión aplicada.

Si en una descarga que se encuentra inicialmente en la región de glow se reduce la tensión aplicada, la transición hacia descarga oscura se produce para un potencial inferior al requerido previamente para pasar hacia la región de glow desde descarga oscura.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El montaje utilizado para generar la descarga glow, esquematizado en la figura 3, consistió en un tubo de vidrio transparente con cuatro aperturas, dos enfrentadas en las cuales hay un ánodo fijo y un cátodo móvil y otras dos para conectar una bomba mecánica de vacío y un sensor de presión Pirani. El ánodo está conectado a una fuente de alta tensión a través de un divisor resistivo que se puede ver en la figura 4. Este divisor permite medir con dos multímetros señales de baja tensión proporcionales a la tensión entre electrodos y la corriente circu-

lando en la descarga. Ambos multímetros se conectaron a una computadora con un programa de adquisición en LabVIEW mediante una interfaz GPIB y la salida de la fuente de alta tensión fue controlada externamente mediante un generador de funciones a fin de poder realizar el barrido representado por la figura 5 desde $0V$ hasta V_{MAX} en 350 segundos. Esta función permite alcanzar valores de tensión elevados rápida y progresivamente, si se pasa de 0 a $200V$ pero no progresivamente puede suceder que se produzca una avalancha electrónica a pesar de que el punto de ruptura se encuentre a un voltaje superior. Lugo del incremento rápido de la tensión tanto en la subida como en la bajada de la curva se utilizaron rectas con menos pendiente para poder obtener la mayor resolución en los resultados. El valor de V_{MAX} aplicado dependió de las condiciones de p y d de cada medición individual a fin de alcanzar su tensión de ruptura en la segunda zona de aumento de voltaje de la figura 5.

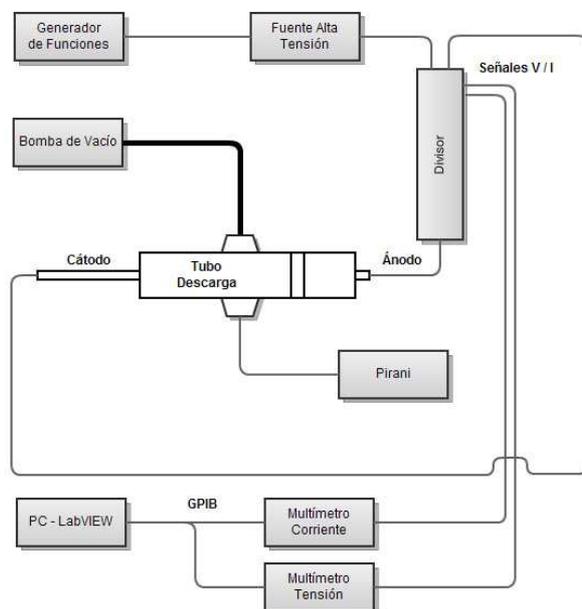


Figura 3. Montaje experimental para descarga Glow.

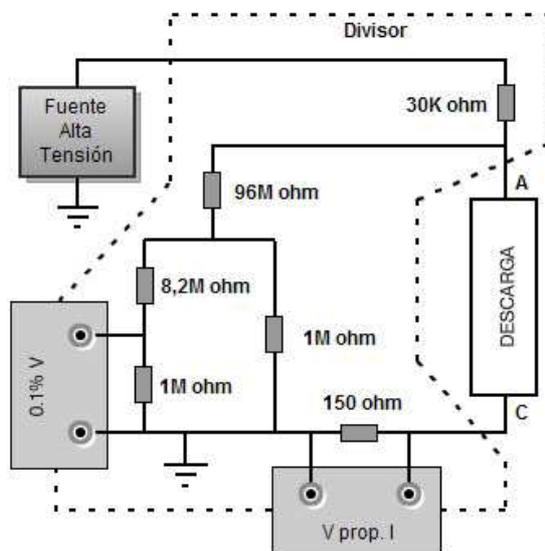


Figura 4. Esquema del divisor resistivo utilizado para medir las señales proporcionales a la tensión interelectródica y la corriente que circula por el circuito.

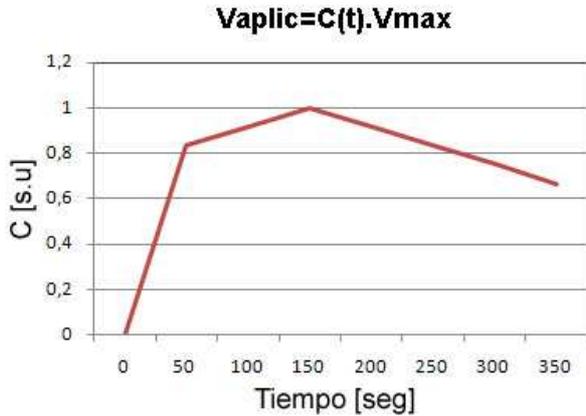


Figura 5. Evolución temporal del voltaje entregado por la fuente de alta tensión al circuito.

Para diferentes distancias entre electrodos y presiones (desde $p.d=0,22\text{cm.mbar}$ hasta $p.d=1,28\text{cm.mbar}$) se realizó el barrido en la tensión aplicada por la fuente midiendo en simultaneo la corriente y la tensión entre electrodos. En el instante en el que se alcanza la tensión de ruptura se observa un incremento abrupto en la corriente, un rápido decremento en la tensión interelectródica y se produce una luminiscencia violeta, la cual es cada vez más intensa al continuar aumentando la tensión aplicada. La tensión de ruptura es la tensión máxima alcanzada antes de dicha caída.

Se realizaron tres mediciones para cuatro valores distintos de $p.d$ a fin de verificar coherencia y reproducibilidad entre mediciones consecutivas para los mismos parámetros. Al corroborar la equivalencia entre las tres mediciones para cada caso procedimos a medir una única vez para los siguientes valores de $p.d$.

Para analizar el ciclo de histéresis de la descarga, una vez superada la tensión de ruptura y producida la descarga glow, se midió la tensión para la cual se interrumpe la avalancha electrónica.

Se analizó también la dependencia de las franjas a lo largo del tubo con la presión. Para esto se fotografió lateralmente el tubo con una distancia entre electrodos constante de 4cm , para valores discretos de presión variando entre un mínimo de $0,22\text{mbar}$ y un máximo de $0,47\text{mbar}$.

D. Distribución luminosa

La distribución luminosa en la descarga tiene una interpretación cualitativa, ver figura 6, en términos de la energía ganada por los electrones del campo eléctrico. Los electrones son emitidos del cátodo con energías $< 1\text{eV}$, que son insuficientes para excitar átomos. Como resultado, se forma el espacio oscuro de Aston. Cuando el campo acelera a los electrones hasta una energía adecuada para excitar, aparece el glow catódico, que puede tener una estructura de dos o tres capas (de diferentes colores) correspondientes a la excitación de diferentes niveles atómicos (o moleculares) de energía creciente. Cuando la energía de los electrones excede a los potenciales de excitación, se forma el espacio oscuro catódico. Aquí es donde tienen lugar la mayoría de las ionizacio-

nes: los nuevos iones creados se mueven muy lentamente, y se desarrolla una elevada carga espacial positiva, siendo los iones los principales portadores de la corriente. En la región final del espacio oscuro catódico, el flujo de electrones se hace grande. El campo eléctrico ya no es muy grande, y va cayendo. La energía de los electrones vuelve a hacerse próxima a las energías de excitación, y entonces aparece el glow negativo, que también puede tener una estructura de capas, pero con potenciales de excitación decrecientes. A medida que los electrones disipan su energía aparece el espacio oscuro de Faraday. En esta región, el campo longitudinal se incrementa gradualmente hasta alcanzar el valor de la columna positiva. En esta columna los electrones se encuentran termalizados (con $T_e < 1-2\text{eV}$) excepto por una suave asimetría en la función de distribución introducida por la deriva hacia el ánodo. La cola de alta energía de esta distribución es la responsable de la excitación atómica y por lo tanto de la luminiscencia de la columna. Finalmente, en la región del ánodo, los electrones son atraídos y los iones rechazados, formándose una región de carga espacial negativa, cuyo campo acelera los electrones. El resultado de esto es la formación de un glow anódico.

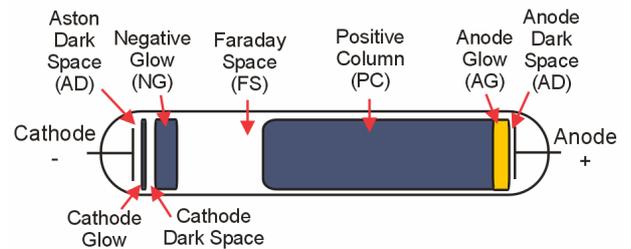


Figura 6. Distribución luminosa en la descarga glow.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Curva de Voltaje-Corriente

A fin de verificar la coherencia y la reproducibilidad de las mediciones se realizaron 3 barridos con los mismos parámetros de voltajes para 4 valores distintos de $p.d$. En la figura 7 se observa la curva V-I para el producto $p.d=(0,48\pm 0,1)\text{mbar.cm}$. Se realizaron 3 mediciones similares para otros $p.d$ dejando fijo los parámetros del voltaje.

Tanto en la figura 7 como en las otras curvas obtenidas, se observa que a lo largo de toda la curva los valores de las tres mediciones quedan superpuestos. Los voltajes de ruptura se encuentran en un intervalo de 15V de diferencia entre sí en el peor de los casos, mientras que el resto de los valores se encuentran en un intervalo de 5V . Para las otras mediciones se encontraron resultados similares. Por este motivo se consideró que los resultados en las mismas condiciones son reproducibles. El único cuidado que se tuvo que tener en cuenta es el tiempo entre barridos consecutivos; se observó para esta misma medición que si se realizaba un barrido a continuación del otro sin esperar al menos dos minutos entre ambos, los resultados no eran reproducibles, por ejemplo el voltaje de ruptura bajó desde $(300\pm 15)\text{V}$ hasta $(268\pm 15)\text{V}$. Se consideró que este fenómeno se debe a

factores tales como la temperatura en el medio. Si se espera el tiempo suficiente, dichas condiciones vuelven a los valores iniciales similares a las otras mediciones y se ve el resultado de la figura 7.

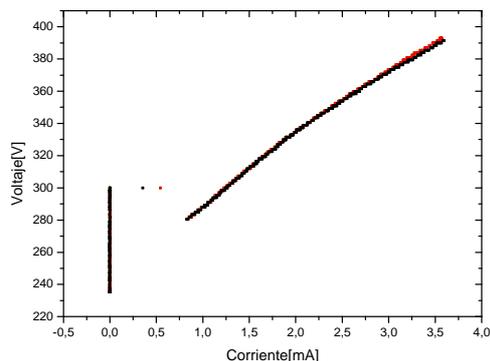


Figura 7. Curva del voltaje interelectrónico en función de la corriente a través del circuito para tres barridos diferentes (rojo, negro y verde) con $p.d=0,48\text{mbar.cm}$.

En cuanto a las zonas de la descarga descritas en la introducción se pueden observar en la figura 8. Si comparamos esta figura con la figura 1, el punto 1 corresponde a los puntos A y B y el punto 2 corresponde a los puntos C y D; se observa un aumento del voltaje sin que la corriente varíe (de B a C) y para el mismo valor de corriente se encuentra el punto de ruptura punto D. La región de descarga oscura se encuentra en un intervalo lo suficientemente chico para apreciarse como un punto en las mediciones. El último punto de la recta es el punto de ruptura, punto para el cual se alcanza el voltaje máximo. Una vez superado ese punto se entra en el régimen de descarga glow. Debido a que el voltaje no se mantiene constante a partir del P4 sabemos que estamos en la zona de glow anormal y debido a que no hay una zona de voltaje constante para la subida no se pudo localizar la zona de glow normal, que debe ubicarse en alguna región entre P2 y P4, probablemente esta región sea muy pequeña y no se puede resolver con el dispositivo experimental utilizado.

Mirando la vuelta, es decir la curva de $V-I$ a medida que se baja el voltaje, se puede observar que la región de glow anormal se extiende hasta P3, punto en el cual no hay más avalancha electrónica, debido a que en ningún intervalo el voltaje se mantiene constante. La región de glow normal entonces debería ubicarse entre P3 y P2.

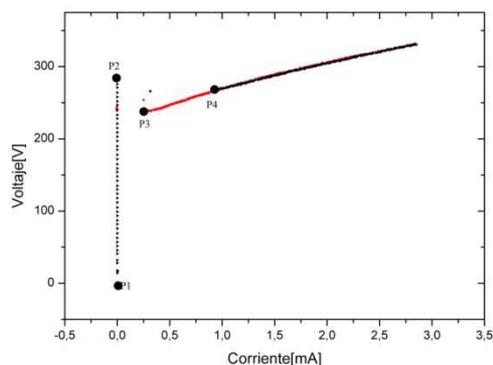


Figura 8. Curva del voltaje interelectrónico en función de la corriente a través del circuito para $p.d=(0,52\pm 0,1)\text{mbar.cm}$,

en negro se muestra el barrido cuando sube la tensión y en rojo cuando baja.

B. Curva de Paschen

En el análisis de la curva de Paschen se obtuvieron los valores figura 9. Dicha curva se ajustó por la función (1).

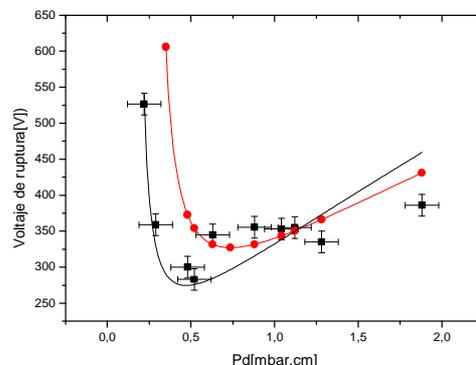


Figura 9. Curva de Paschen. En rojo la curva teórica para aire, en negro los valores obtenidos de las mediciones. Se ajustó por la función $f(x) = \frac{Ax}{\ln(x)+B}$ con un coeficiente de correlación $R=0,591$, $A=(580\pm 30)V/(mbar.cm)$, $B=1,75\pm 0,03$.

Los valores devueltos por el ajuste no coinciden con los teóricos de $A=445$ y $B=1,31$, aunque los órdenes de magnitud corresponden. Se consideró que la diferencia entre los resultados se debe a que los valores elegidos para analizar el punto de ruptura no fueron lo suficientemente alejados del mínimo de la curva. Se deberían haber realizado más mediciones para valores de $p.d$ de al menos un orden de magnitud superior al mínimo, para intentar obtener un valor más preciso. En estos puntos el voltaje estimado es de $500V$, dicho valor está dentro del límite de voltaje que se puede alcanzar por nuestro dispositivo.

C. Histéresis

En todos los casos se observó un ciclo de histéresis al aumentar y luego disminuir la tensión aplicada. Para diferentes valores de $p.d$ se midió la tensión para la cual se interrumpe la descarga glow tal como se observa en la figura 10.

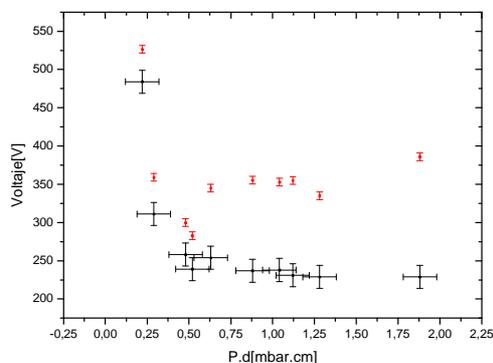


Figura 10. Voltajes para los cuales deja de haber glow (negro), en rojo la curva de Paschen, ambos para los mismos valores de $p.d$.

En todos los casos se observa que el voltaje para el cual se interrumpe la avalancha electrónica es inferior al de ruptura. La causa de esta diferencia se debe a que la energía de los electrones libres está regida por una distribución maxwelliana^[3]. En dicha distribución existe una cola de alta energía, por lo cual un pequeño porcentaje de los electrones libres en el gas van a tener la suficiente energía para ionizar las partículas presentes. En la rampa de subida, este porcentaje se aplica únicamente a los electrones libres generados naturalmente por radiación UV y rayos cósmicos principalmente mientras que en la rampa de bajada, con la avalancha electrónica producida, se aplica a una gran cantidad de electrones libres. Esto se traduce en una cantidad mayor de electrones con energía suficiente de ionización, los cuales son los responsables de mantener la descarga glow a tensiones inferiores a la tensión de ruptura.

Se deberían realizar mediciones adicionales para valores más elevados de $p.d$, al igual que lo visto en la curva de Paschen, con el fin de caracterizar con mayor precisión el comportamiento de este fenómeno y poder compararlo con el punto de ruptura.

Para verificar que los puntos en los cuales deja de haber descarga glow son independientes del voltaje máximo alcanzado en el barrido, se realizaron 4 barridos dejando fija la presión y la distancia entre los cátodos pero variando el voltaje máximo al cual se llega en el barrido, los resultados se ven en la figura 11.

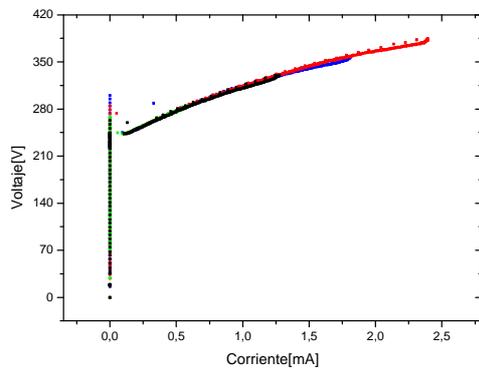


Figura 11. Voltajes para los cuales deja de haber variando el voltaje máximo del barrido. Verde $V_e \text{max}=375V$, Negro $V_e \text{max}=450$, azul $V_e \text{max}=500$, negro $V_e \text{max}=550$.

Para los cuatro casos el voltaje para el cual deja de haber glow es de $(244 \pm 5)V$. Por lo tanto se concluye que dicho valor no depende de la tensión máxima entregada durante el barrido.

D. Distribución luminosa

En todos los casos se observó entre una y tres franjas más brillantes. La franja principal siendo el glow negativo es visible para todas las presiones. En las fotografías a presiones más bajas aparece una franja de menor intensidad que corresponde al glow catódico. Al aumentar la presión ésta se desvanece mientras que aparece una delgada franja brillante en el extremo, el glow anódico. Los perfiles de intensidad relativa y fotografías se observan en la figura 12.

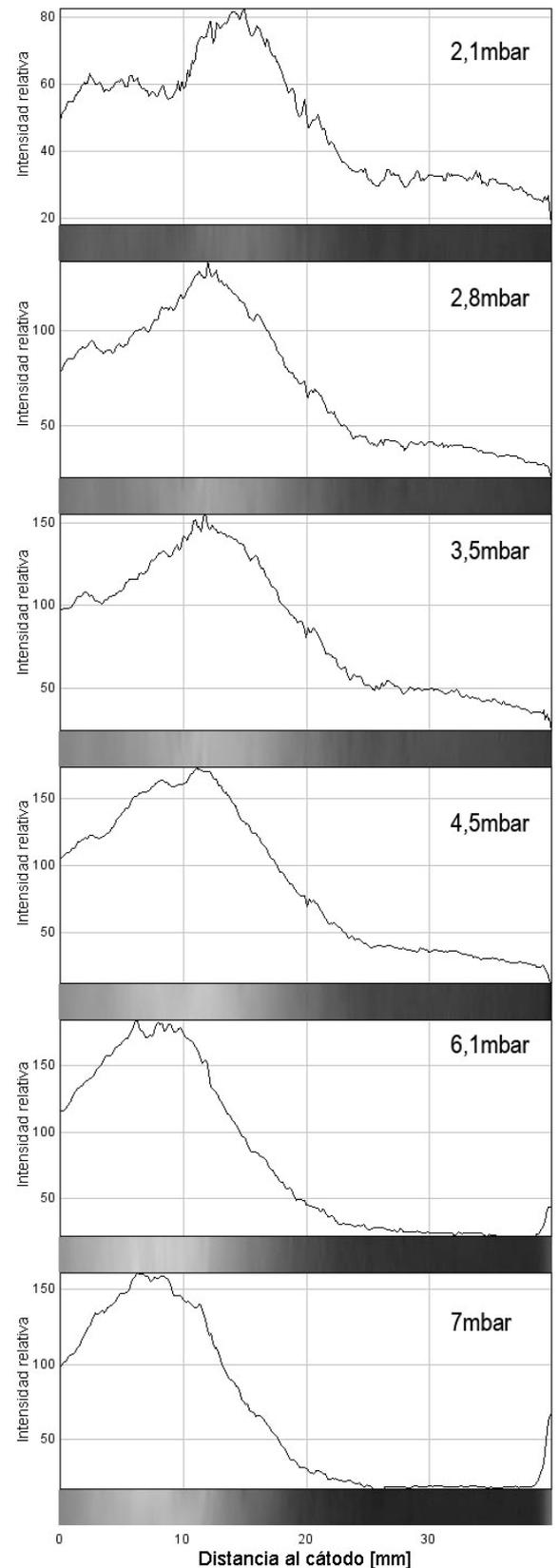


Figura 12. Perfil de la intensidad relativa junto con una fotografía en escala de grises de la descarga glow en el tubo de vidrio $d=4cm$ y un $V_e=500V$.

IV. CONCLUSIONES

En cuanto al el objetivo de asegurar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados de este experimento se encontró equivalencia en cuatro mediciones realizadas repetidas veces con los mismos parámetros. Por consiguiente se realizó una única medición para los siguientes parámetros, dado que se obtendrían resultados equivalentes al realizar múltiples mediciones.

Se obtuvieron las curvas de tensión en función de la corriente para diferentes valores de $p.d$ las cuales mostraron un comportamiento similar al propuesto en la teoría. En dichas curvas no se llegó a observar la zona de descarga oscura debido a la mínima resolución del instrumental así como tampoco se obtuvieron valores para la zona de descarga normal a causa de la velocidad de la transición de un régimen al siguiente. A fin de caracterizar el comportamiento detallado en esta zona se podría medir con mayor velocidad de adquisición.

Al intentar reproducir la curva de Paschen y ajustarla por el modelo propuesto no se obtuvieron los parámetros correspondientes para el aire. Consideramos que esto se debe a que no fue buena la elección de los puntos $p.d$ para el análisis. Dichos puntos se encontraban muy cerca del mínimo de la curva en una zona donde dichos valores no difieren entre sí. Para valores superiores a donde se encuentra el mínimo de la curva, el voltaje de ruptura vuelve a aumentar permitiendo ajustar con más precisión la curva.

Se observó el fenómeno de histéresis en todas las mediciones registrándose siempre que voltaje del punto de ruptura es mayor que el punto donde deja de haber glow debido a que la energía de las partículas está regida por una distribución maxwelliana y el número de electrones libres con energía suficiente de ionización es diferente en cada sentido de la transición. Por el mismo motivo que no se pudo predecir el comportamiento de la curva de Paschen tampoco se realizó un modelo para estos puntos.

En cuanto a la distribución luminosa en el tubo de descarga se logró observar las franjas brillantes aunque no todas para las diferentes presiones. Al incrementar la presión hay un corrimiento de la franja del “glow negativo” hacia el cátodo y aparece una nueva franja sobre el ánodo, el “glow anódico”. Si bien estos fenómenos se pudieron visualizar no se contrastó con ninguna teoría existente, para lo cual habría que extender en análisis en experimentos adicionales.

V. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Descarga Glow, Laboratorio 5, Departamento de Física, UBA.
- [2] La descarga Glow, Laboratorio 5, Departamento de Física, UBA.
- [3] Apunte teórico, Laboratorio de Física del Plasma, Departamento de Física, UBA