

# Descarga glow en aire

Laboratorio 5 - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Ramiro Severino, Joaquín de Jesús

Septiembre de 2015

## Resumen

Se realizó una experiencia para observar el fenómeno de descarga glow en aire. Para caracterizar el fenómeno se tomaron datos con vistas a obtener una curva  $I=I(V)$  de forma de determinar que zonas de descarga son observadas. Luego, con los datos se realizó un ajuste para reproducir la curva de Paschen. Se obtuvo un valor de  $A=701,2\pm 116,4 \frac{V}{\text{Torr.cm}}$  y  $B=1,306\pm 0,074$  frente a los tabulados de  $A=365 \frac{V}{\text{Torr.cm}}$  y  $B=1,18$

## 1. Introducción

La descarga glow es un fenómeno de descarga eléctrica en un medio gaseoso. Ocurre cuando se somete un gas a baja presión (del orden de los 0,1 Torr o menos) confinado en un tubo a un alto voltaje (del orden de los 1000 V) producido por dos electrodos. En la figura 1 puede verse un esquema del dispositivo experimental típico utilizado para estudiar la descarga.

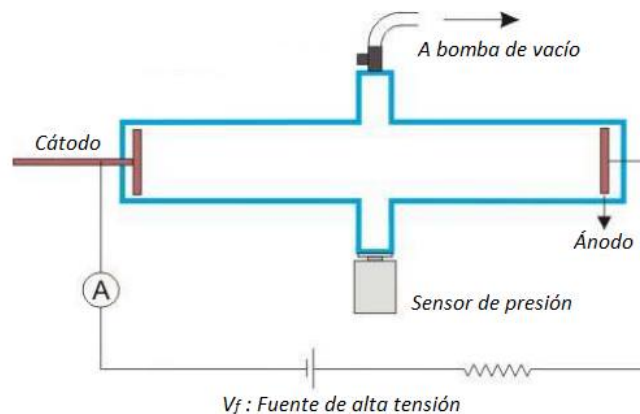


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental típico para producir la descarga glow.

Si el voltaje  $V_f$  que entrega la fuente es muy bajo, no hay conducción apreciable de corriente a través del gas por lo que el voltaje entre electrodos es prácticamente igual a  $V_f$ . A medida que se va aumentando  $V_f$ , eventualmente se llega a un voltaje de ruptura a partir del cual el campo eléctrico entre electrodos es lo suficientemente intenso como para ionizar el gas. A partir de ese momento se produce una descarga autosostenida, es decir, una corriente interelectródica conducida por el medio gaseoso. Esta descarga se origina cuando electrones inyectados o producidos por rayos cósmicos, llamados electrones *semilla*, son acelerados por el campo eléctrico presente entre los electrodos hasta alcanzar una energía suficiente para ionizar las moléculas del gas. A partir de ese punto, se inicia un proceso de avalancha electrónica cuya magnitud depende de la tasa de ionización, pérdida de energía, pérdida de electrones, entre otros factores.

Para entender mejor el proceso es conveniente valerse de la figura 2, que muestra la curva voltaje interelectródico vs corriente del circuito.

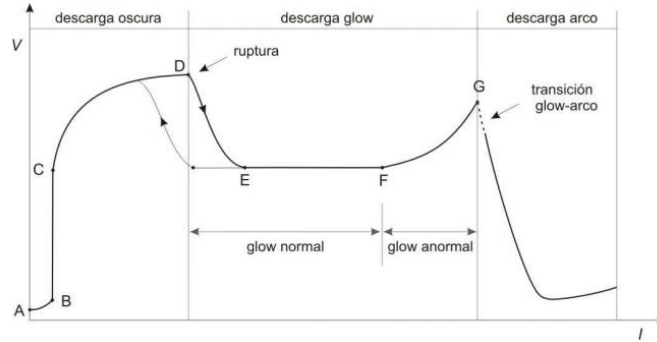


Figura 2: Curva de voltaje interelectródico en función de la corriente circulante en el circuito.

## Descarga oscura

La zona comprendida entre los puntos A y D recibe el nombre de *descarga oscura*, debido a que la excitación del gas no es lo suficientemente intensa como para generar luz. Entre los puntos B-C, se alcanza una saturación en el valor de la corriente, por lo que ésta permanece constante a pesar de que se aumente  $V$ . La curva C-D recibe el nombre de *descarga Townsend*. Al continuar aumentando el voltaje, la corriente comienza a crecer exponencialmente debido a un efecto avalancha en el que los electrones comienzan a tener la energía suficiente para ionizar debilmente el gas. El punto D es el punto de ruptura eléctrica, donde comienza la *descarga glow*. En este punto la corriente puede aumentar entre 4 y 8 ordenes de magnitud.

## Descarga glow

Esta zona recibe el nombre de *descarga glow* (que en ingles significa *brillo*) debido a que la energía y densidad de las cargas son suficientes como para emitir radiación visible, generando la luminosidad característica de la descarga. Es importante notar que entre los puntos D y E hay una caída de potencial interelectródico debido al repentino flujo de corriente, así como un fenómeno de histéresis en la transición de *descarga oscura* a *descarga glow*, que produce una curva distinta dependiendo si se está aumentando o disminuyendo el voltaje. En la zona E-F se alcanza el régimen de *descarga glow normal*, en el que el voltaje es independiente de la corriente: se puede ir aumentando la tensión de alimentación  $V_f$  aumentando así la corriente circulante, pero no se registra un aumento en la tensión entre electrodos. Esto se debe a que se produce un aumento del área a través de la cual fluye corriente, sin cambio en la densidad de corriente. La curva F-G recibe el nombre de *descarga glow anormal*. Se llega a esta etapa una vez que es cubierta toda el área del cátodo, por lo que la corriente aumenta a expensas de un aumento en la densidad de corriente, produciendo así un aumento en el voltaje interelectródico.

## Descarga arco

Por último, cuando la corriente alcanza valores cercanos a 1A la *descarga glow* precipita en un arco, produciéndose una fuerte caída en  $V$  junto con un aumento en la corriente.

## Curvas de Paschen

El potencial de ruptura  $V_t$  (punto D de la figura 2) depende del material de los electrodos, la distancia  $d$  entre ellos, el gas utilizado y la presión en el tubo  $p$ . Una forma de modelar esta dependencia fue propuesta por Paschen:

$$V_t = \frac{A \cdot (pd)}{B + \ln(pd)} \quad (1)$$

Donde A y B son constantes a determinar experimentalmente que dependen del gas utilizado y el material de los electrodos. Según este modelo,  $V_t$  depende del producto  $pd$ . Las curvas  $V_t$  en función de  $pd$  se denominan *curvas de Paschen*. En la figura 3 pueden verse las curvas para algunos gases.

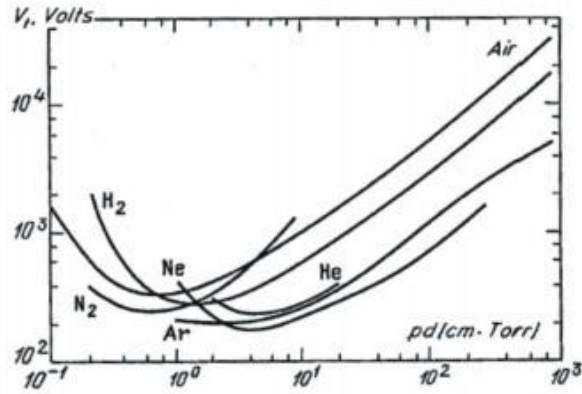


Figura 3: Curvas de Paschen para distintos gases.

## 2. Armado experimental

Se utilizó un tubo de vidrio con aire, con un cátodo y un ánodo adentro, con dos salidas, una hacia una bomba mecánica de vacío, y otra hacia un sensor de presión de rango completo (*BOC Edwards WRG-D1470*) como el de la figura 1. Debido a la necesidad de trabajar con altas tensiones (entre 100 y 1000 V), se usó un divisor de tensiones para que los voltajes medidos directamente sean bajos (del orden de los 0,5-1V) y no presenten riesgo ni para nosotros ni para el instrumental.

Por lo expuesto arriba, no es posible medir directamente ni el voltaje interelectródico, sino a través de la medición del voltaje de salida del divisor. Procedimos entonces a calcular el factor de conversión entre el voltaje interelectródico y el voltaje medido del divisor. Para ello, armamos la configuración de la figura 4. Fuimos variando el voltaje de la fuente de alta tensión (*Stanford - Modelo PS325*) desde los 100 hasta los 1000 V y registrando para cada caso el voltaje saliente  $V_a$  del divisor con un multímetro (*Agilent 3440 1A*). Habiendo verificado visualmente que a presión ambiente en ese rango de voltajes no hay descarga, asumimos que el voltaje de la fuente es igual al voltaje interelectródico. De esa forma, podemos graficar el voltaje de la fuente en función del voltaje saliente del divisor y obtener el factor de proporcionalidad a través de un ajuste lineal.

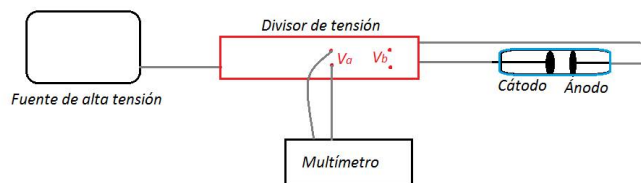


Figura 4: Esquema del armado experimental utilizado para hallar el factor de conversión entre el divisor y el voltaje entre electrodos.

Para la medición de la corriente, medimos la resistencia entre los conectores del  $V_b$  (ver figura 4) con todo el instrumental apagado con un multímetro *Protek 506* arrojando un valor  $R_b = 148,8 \pm 0,1 \Omega$ . La corriente circulante entonces se calcula haciendo  $\frac{V_b}{R_b} = I$ .

Teniendo todos los factores de conversión necesarios, procedimos al estudio de la descarga glow. En la figura 5 puede verse un esquema del armado experimental.

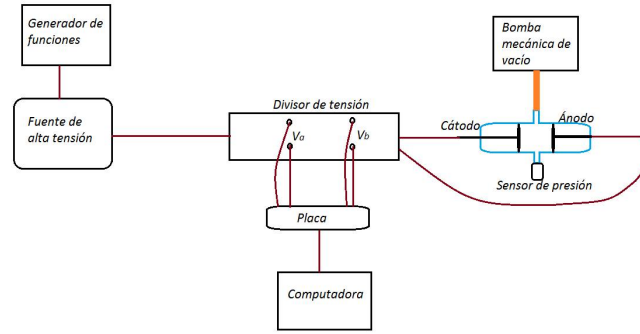


Figura 5: Esquema del armamento experimental utilizado para estudiar la descarga glow.

Conectamos el generador (*Tektronix - Modelo AFG3021B*) a la fuente para poder ir variando el voltaje de ésta de manera automática. El manual estipula que si se le conecta un voltaje (de entre 0 y 10 V) a la fuente, ésta entrega como salida un porcentaje del valor límite de tensión al que trabaja la fuente. Por ejemplo, si el valor límite seteado en la fuente es de 1000 V y se le entrega una señal de 8 V, la fuente da como output un voltaje de 800 V, es decir, el 80 % del valor límite.

Alimentamos a la fuente con una señal triangular de período de 60 segundos para poder ir variando suavemente el voltaje de la fuente mientras registramos el voltaje interelectródico (a través de  $V_a$ ) y la corriente (a través de  $V_b$ ) con una placa de adquisición *National Instruments - 6210*. El proceso de adquisición se automatizó con la computadora mediante un programa de Matlab. Es importante mencionar que no pudimos conectar a la placa el sensor de presión debido a que el simple hecho de conectarla generaba un offset de alrededor de 0,8 V en las mediciones de  $V_a$  y  $V_b$ . Es por esta razón que no pudimos medir la evolución de la presión de forma exacta, sino simplemente anotamos los valores máximos y mínimos de ésta que veíamos en el display del sensor para tener una idea del orden de magnitud de las variaciones de presión durante la experiencia.

### 3. Resultados y Analisis

Previo a realizar las mediciones, necesitamos calibrar los instrumentos pues al utilizar un divisor de tensiones, los voltajes que seteabamos en la fuente no era directamente el que mediamos en el divisor. Tomamos varios puntos de voltaje de la fuente y medimos el voltaje en el divisor con un multímetro. La relacion obtenida fue lineal, de la forma

$$V_d = 8,28 \times 10^{-4} V_f \quad (2)$$

con  $V_f$  el voltaje de la fuente y  $V_d$  el voltaje medido en el divisor. El error segun el ajuste es del orden de  $10^{-8}$  por lo que lo consideramos despreciable. Para los calculos, usamos la relacion inversa. En la figura 6 se ven las mediciones y el ajuste.

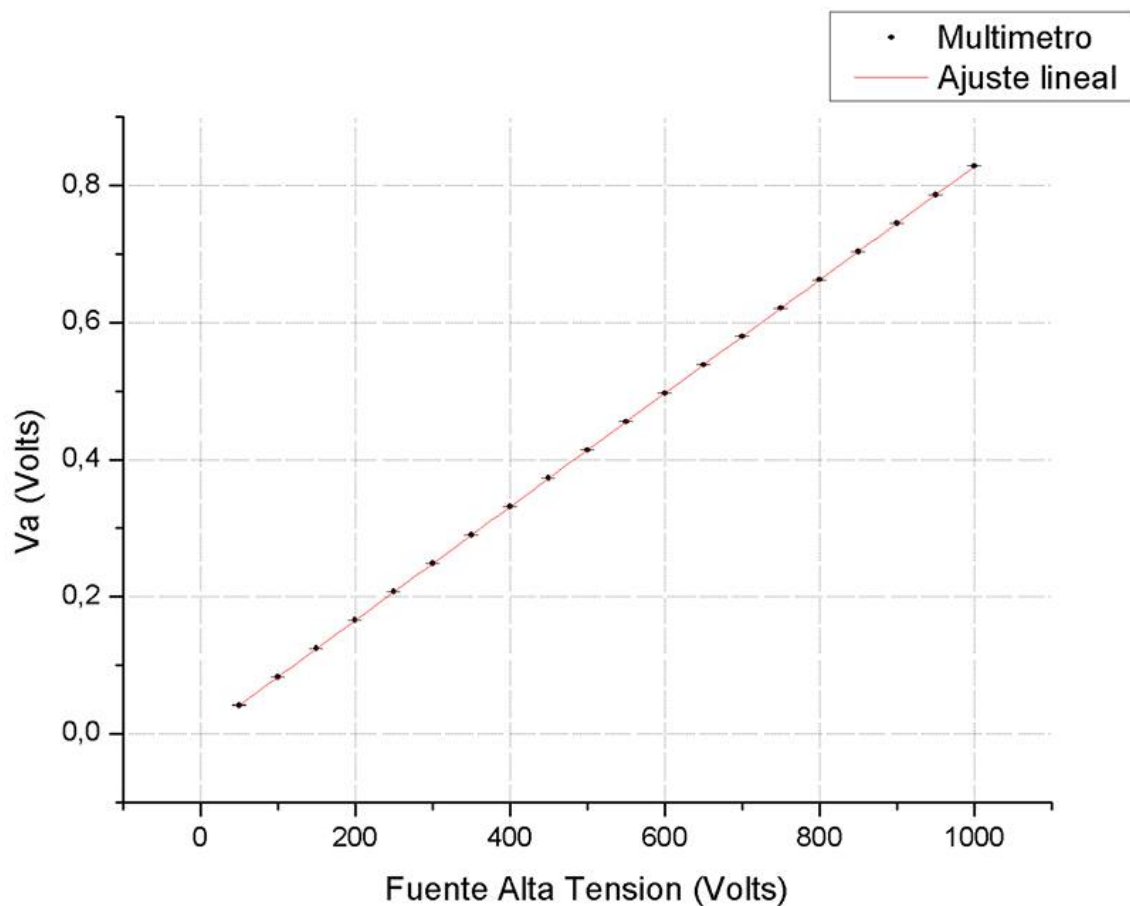
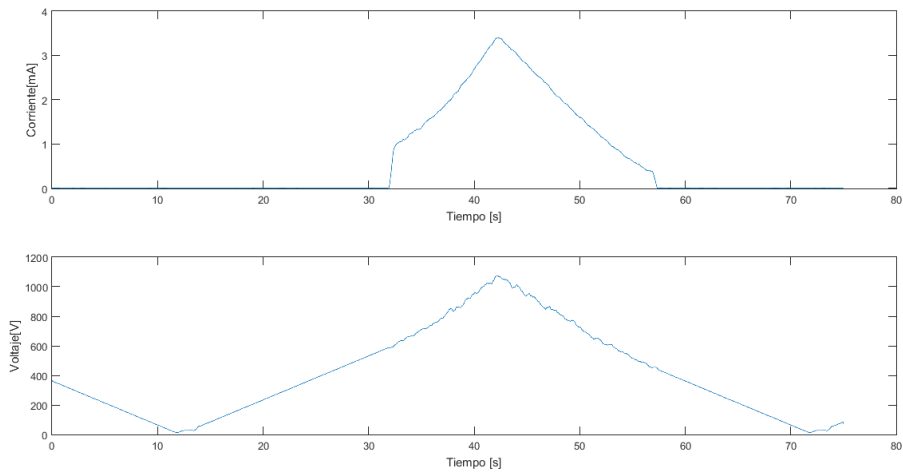
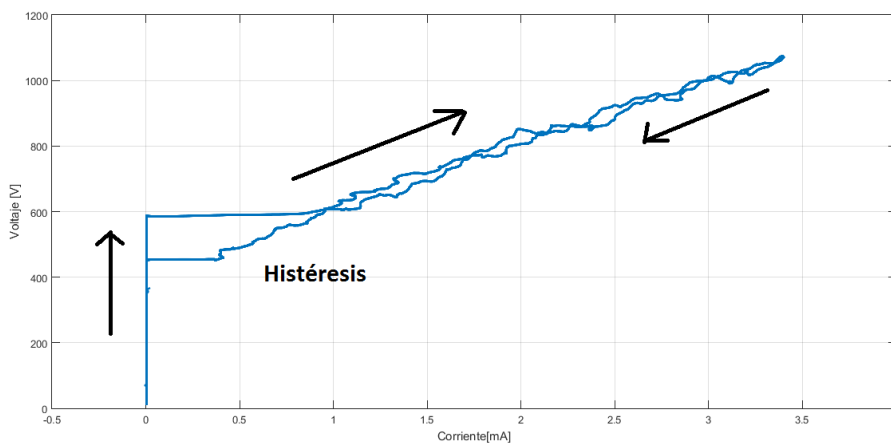


Figura 6: *Calibración de los instrumentos utilizados. La constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes es  $8,28 \cdot 10^{-4}$*

Una vez obtenida la calibración, tomamos datos de corrientes y voltajes como fue expuesto anteriormente y realizamos distintos gráficos. La idea era poder tener una curva V-I para poder comparar con la curva teórica que teníamos. En primera instancia, tomamos los datos para una distancia de 3 centímetros. Los datos crudos y el gráfico V-I se pueden observar en la figura 7.



(a) Voltaje y corriente en el tubo en función del tiempo

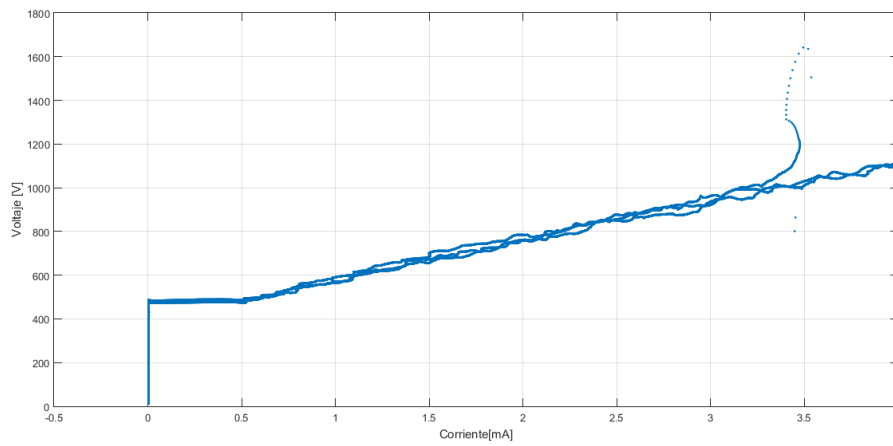


(b) Curva de histéresis  $V=V(I)$  para una rampa de voltaje con distancia entre electrodos de 3 centímetros

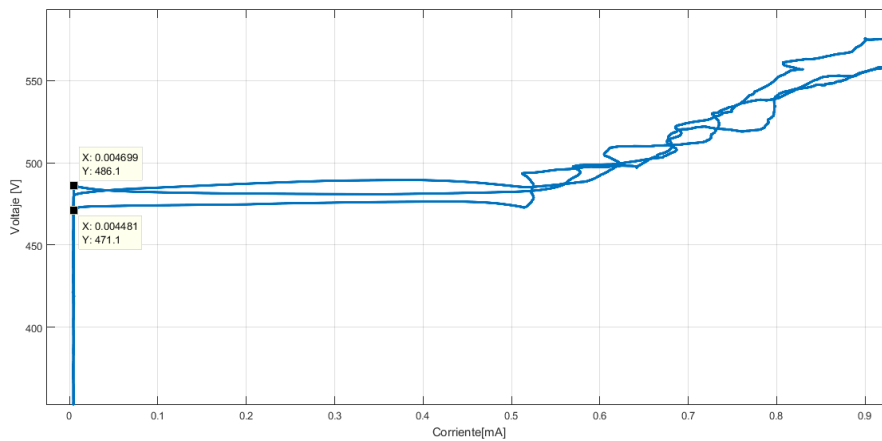
Figura 7: Ploteos de los datos crudos y los datos procesados de voltajes y corrientes en el tubo. En ambos casos se promediaron los datos cada 2000 puntos para obtener curvas mas suaves.

En la figura 7b podemos observar el ciclo que realiza la corriente. Se produce una histéresis debido a que tomamos los datos con una rampa de voltaje, es decir, recorrimos los valores de voltaje de manera creciente y luego decreciente. Teniendo en mente la figura 2, estamos haciendo un ciclo entre los puntos BDEFGFEDCB. Hay zonas de la descarga que no estamos observando porque son una transición muy rápida (la figura 2 no está a escala). Pasamos por zona de descarga oscura hasta llegar al voltaje de ruptura (de nuevo, la transición entre C y D es muy chica en valores de voltaje) de ahí a la zona de descarga glow anormal y volvemos al voltaje de ruptura. De este punto, se vuelve al voltaje original en el que se dio la primera ruptura.

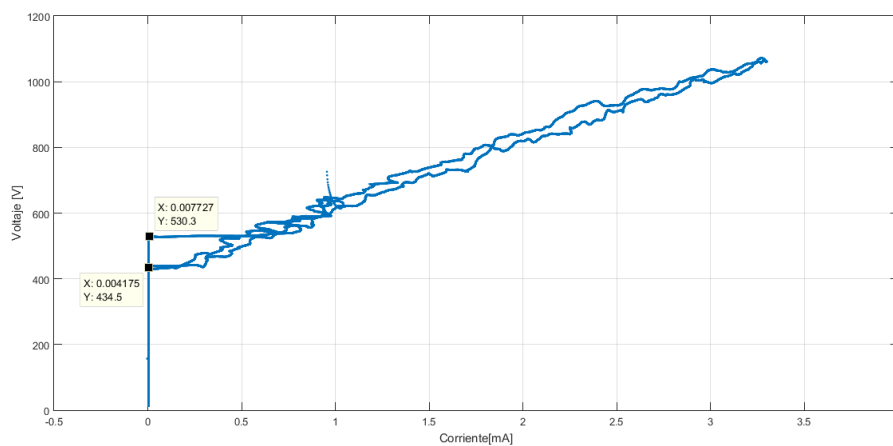
Estas curvas de histéresis se tomaron para distintas distancias para ver si existía algún patrón o variabilidad, dado que el voltaje de ruptura efectivamente depende del producto presión-distancia (recordemos que la presión se mantenía prácticamente constante; mejor dicho, las variaciones en presión eran despreciables frente al aumento o disminución de la distancia). Observemos en la figura 8 las curvas para el caso de 3,75cm y 2,5cm.



(a) Curva de histéresis  $V=V(I)$  para una rampa de voltaje con distancia entre electrodos de 2,5 centímetros



(b) Detalle del ciclo de histéresis para 2,5 cm



(c) Curva de histéresis  $V=V(I)$  para una rampa de voltaje con distancia entre electrodos de 3,75 centímetros

Figura 8: Graficos de curvas de corriente-voltaje para dos distancias distintas, marcando los puntos en los que hay ruptura. Se observan ciclos de histéresis. Notar que se observa mas de un ciclo por rampa. Los puntos aislados que parecen irse del grafico corresponden a la finalización repentina de la rampa una vez concluido el período.

Notemos que se observa un descenso marcado de la distancia en voltaje que hay entre los puntos de ruptura para la distancia mas chica. Esto es clara evidencia de que los valores de voltaje de ruptura dependen de la distancia y que se achican al achicar la distancia. Por ultimo, realizamos la comparacion, para la misma distancia de 3,75 cm, de dos rampas distintas, una lenta (de periodo de 180segundos) y una rápida (de período de 60 segundos) con la misma amplitud de voltaje. En la

figura 9 se observan los datos recolectados. En azul se observa el período largo y en rojo el corto. A primera vista se observa un incremento de la corriente y también un aumento de la distancia entre los voltajes de ruptura de histéresis de aproximadamente dos veces el original. No sabemos si esto es resultado del experimento o algún error en la medición. Necesitaríamos recolectar mas datos con distintos períodos para intentar encontrar algún patrón.

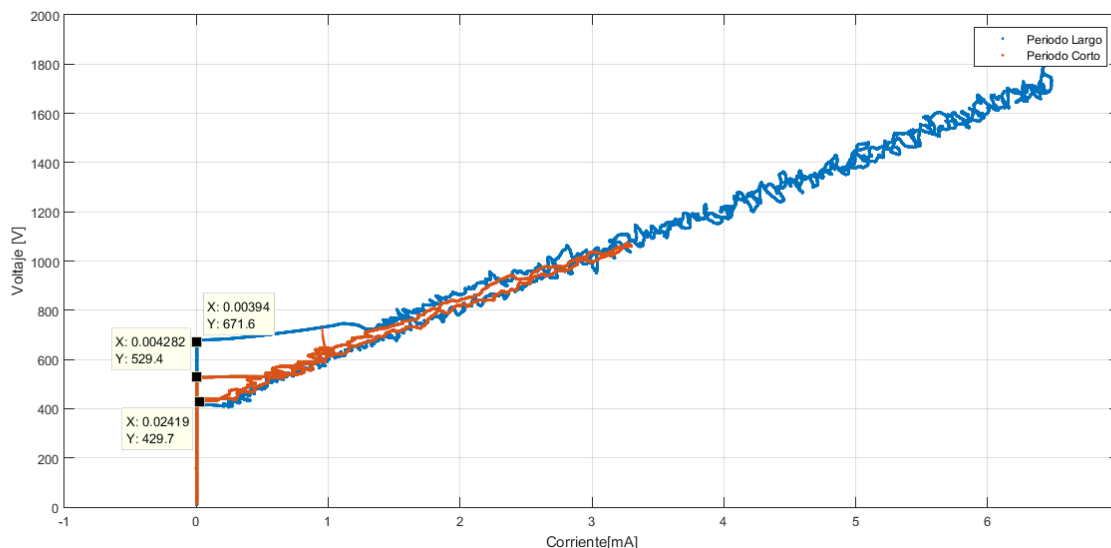


Figura 9: Comparación de dos rampas de voltaje de período largo (de 180 segundos, en azul) y de período corto (de 60 segundos, en rojo). Notemos el aumento de corriente y distancia de ruptura en aproximadamente dos veces el valor original.

Pasamos ahora a analizar la curva de Paschen. Calculamos los voltajes de ruptura en función del producto presión-distancia. Para tomar el punto de ruptura, tomamos como criterio el valor máximo de voltaje antes de que la curva empiece su pendiente. Este valor lo tomamos en la parte donde empieza a cambiar el comportamiento del voltaje (ver figura 10). En todo momento la presión se mantuvo constante entre 0,23 y 0,26 Torr, por lo que tomamos una presión promedio de 0,245 Torr. Las variaciones se hicieron desde una distancia de 1,5 cm a 3,75 cm. En la figura 11 podemos ver el resultado de los datos tomados y el correspondiente ajuste según la ecuación 1

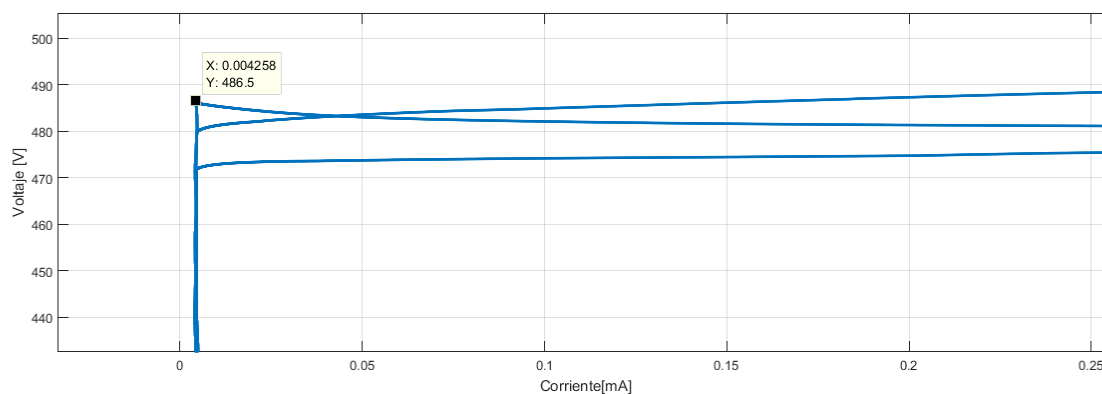


Figura 10: Ejemplo de cómo tomamos los puntos de ruptura de voltaje. Consideramos el máximo como el punto de ruptura y los demás los atribuimos a partes de un ciclo de histéresis.



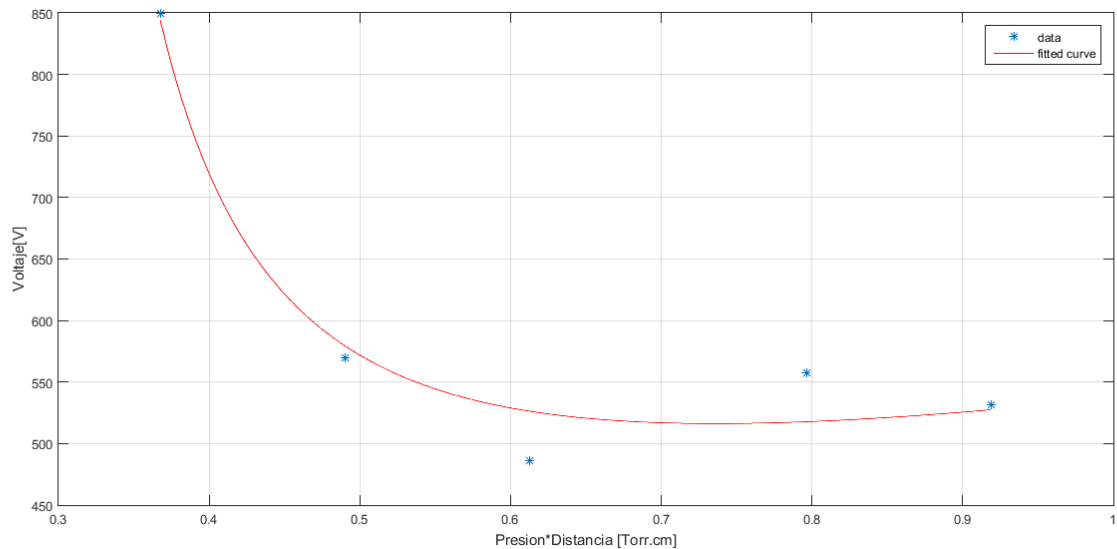


Figura 11: En asteriscos azules tenemos los datos tomados y en rojo el ajuste hecho en MatLab. Los valores de los parametros son  $A=701, 2 \frac{V}{\text{Torr.cm}}$  y  $B=1,306$ . Los intervalos de confianza para  $A$  y  $B$  son, con un 95 por ciento de nivel de confianza,  $A \in (584, 8; 817, 6)$  y  $B \in (1, 232; 1,380)$  respectivamente

Si comparamos esta curva contra la forma de las curvas de 3 notamos que la forma es la adecuada pero que nos faltaron puntos para poder completar la forma de la curva. De esta forma no podemos decir donde, o si hay, un minimo. Necesitamos mas datos para poder concluir. De todas formas, los ordenes de magnitud y los valores son cercanos a los tabulados.

## 4. Conclusiones

La experiencia se desarrollo con varios problemas, desde problemas con el tubo de descarga (había fugas de aire que impedían realizar el vacío correcto) hasta problemas en la adquisición de los datos. Estos problemas hicieron que perdiéramos mucho tiempo y no pudimos recolectar datos suficientes para reproducir bien la curva de Paschen. Sin embargo, se observa cualitativamente el fenómeno de descarga glow. Comprobamos que hay descarga glow anormal y además aprendimos que para poder observar una curva suave como las de la figura 2 tendríamos que hacer distintos barridos, afinando o empeorando la precisión en función de que zona se quiera observar. A pesar de esto, pudimos reproducir una forma cualitativamente correcta de la curva de Paschen, obteniendo valores correctos de los parámetros, al menos en orden de magnitud (además, para  $B$  obtuvimos un valor cercano al tabulado de 1, 18).

Un efecto que quedó por analizar mejor es el tema de los ciclos de histéresis y que variables son las que juegan en este proceso. Queda para futuros grupos explorar la dependencia con la velocidad de las rampas, con la presión y con la distancia. En principio, obtendríamos que existe alguna relación entre el período y el ancho de la histeresis, pero con una sola medición, no podemos decir nada concluyente.

## Referencias

Guía Teórica Descarga Glow, Laboratorio 5