

Descarga Glow

Facundo Sanchez y Candela López Porto

Octubre 2021

Laboratorio 5 - Grupo 2

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Resumen

Se estudió el fenómeno de descarga Glow sobre un tubo con aire a baja presión. Para ello se indujo corriente entre un ánodo-cátodo dentro del tubo mediante una fuente de alta tensión. El cátodo era libre de moverse de modo de poder regular la distancia con el ánodo y se disponía de una válvula para regular la presión dentro del tubo. Luego se registraron indirectamente la tensión y corriente sobre el ánodo-cátodo haciendo uso de un divisor resistivo y de distintos aparatos de adquisición. Particularmente se compararon las virtudes y defectos de utilizar multímetros o un osciloscopio. De estas mediciones se halló el voltaje de ruptura (voltaje a partir del cual comienza a circular una corriente no despreciable en el aire) y se intentó verificar la dependencia de este con la presión dentro del tubo y la distancia entre los electrodos. Sin embargo debido a una serie de errores experimentales estas mediciones se vieron comprometidas, de modo que no fue posible afirmar o negar los modelos teóricos.

1 Introducción

La descarga glow es un fenómeno eléctrico que ocurre en medio gaseosos. Se trata de una descarga autosostenida que ocurre cuando electrones "semilla" son acelerados por un campo eléctrico y alcanzan la energía suficiente para ionizar los átomos o moléculas del gas, generando un proceso de avalancha electrónica.

Cuando se tiene una descarga glow entre electrodos en un tubo se pueden observar zonas alternadas de luminosidad y oscuridad en el mismo.

Para que la descarga ocurra el voltaje entre el ánodo y el cátodo tiene que superar un umbral al que se llama **voltaje de ruptura**. Cuando esto ocurre, el tubo permite el paso de corriente. La curva de voltaje en función de la corriente se muestra en la Figura 1. En la curva se observan regiones con diferentes comportamientos, que se explican a continuación:[1]

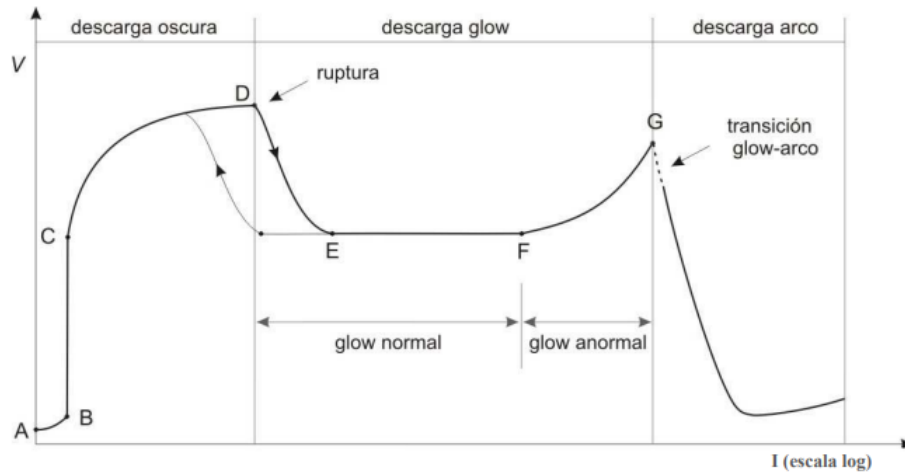


Figura 1: Curva típica de voltaje interelectródico en función de la corriente a través del circuito.[1]

Descarga Oscura: régimen entre los puntos A y D de la Figura 1. La excitación del medio gaseoso es pequeña y no se observa emisión de luz.

- **A-B:** se observa una corriente debido a la migración de cargas espurias entre los electrodos.
- **B-C:** el voltaje aumenta y se alcanza una saturación en la corriente. La corriente permanece constante aunque se aumente el voltaje.
- **C-D:** si se sigue aumentando el voltaje la corriente comienza a crecer exponencialmente. La energía que alcanza un electrón inicial es suficiente para ionizar un átomo o una molécula del gas. Si el campo es suficientemente intenso el electrón secundario (producto de esa ionización) puede ionizar otro átomo o molécula, produciendo un efecto de avalancha. Esta región recibe el nombre de *descarga Townsend*. Las corrientes típicas de esta región varían entre 10^{-10} y 10^{-5} A.

Descarga Glow: régimen entre los puntos D y G de la Figura 1. En esta región se observa emisión de luz, y es la que se estudiará en este trabajo. La luminosidad se debe a que la energía y densidad de las cargas son suficientes para provocar numerosas excitaciones en el medio gaseoso, cuya desexcitación produce emisión de luz.

- **E-F:** después de una transición abrupta entre D y E se alcanza el régimen de descarga glow normal. En esta región el voltaje interelectródico es prácticamente independiente de la corriente. A medida que aumentamos el voltaje de alimentación 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 de la densidad de corriente.
- **F-G:** cuando se cubre el área del cátodo totalmente (punto F), la corriente se aumenta a expensas de un aumento en la densidad de corriente, lo cual se traduce en un aumento de V . A esta región se la denomina descarga glow anormal. Si se parte del punto F y se recorre la curva hacia la izquierda se observa un ciclo de **histéresis**.

Descarga Arco: régimen siguiente a G en la Figura 1. Cuando la corriente alcanza valores típicos de 1 A la descarga glow precipita en un arco. En esta zona de la curva se produce una fuerte caída de V y un aumento de I .

Como ya se mencionó este fenómeno no solo depende de la tensión instantánea aplicada sobre el tubo sino también del estado del mismo en tiempos anteriores, es decir que puede observarse una histéresis. 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.

El valor del voltaje de ruptura en el tubo, punto D en la Figura 1 depende del gas utilizado, su presión y de la distancia entre los electrodos y el material del que estén contruidos. Las **curvas de Paschen** modelan la dependencia de este voltaje con la presión y la distancia entre electrodos para un determinado gas. La forma de la curva está dada por:

$$V_r = \frac{Apd}{\ln(pd) + B} \quad (1)$$

Donde V_r es el voltaje de ruptura, A y B constantes dependientes del gas, p la presión y d la distancia entre electrodos. Notar que la dependencia es con el producto de la presión y la distancia.

En la Figura 2 se muestran algunos ejemplos de estas curvas para distintos tipos de gases. Se observa en la curva un mínimo que corresponde electrones poseen la máxima capacidad de ionización. Para valores de pd menores que este punto la probabilidad de colisión entre los electrones y las partículas del gas es muy pequeña y, por lo tanto, es necesario aumentar el campo eléctrico para lograr una amplificación que desencadene una descarga autosostenida. Para valores grandes de pd el aumento de V_r es causado por un aumento de las pérdidas de electrones en el sistema.

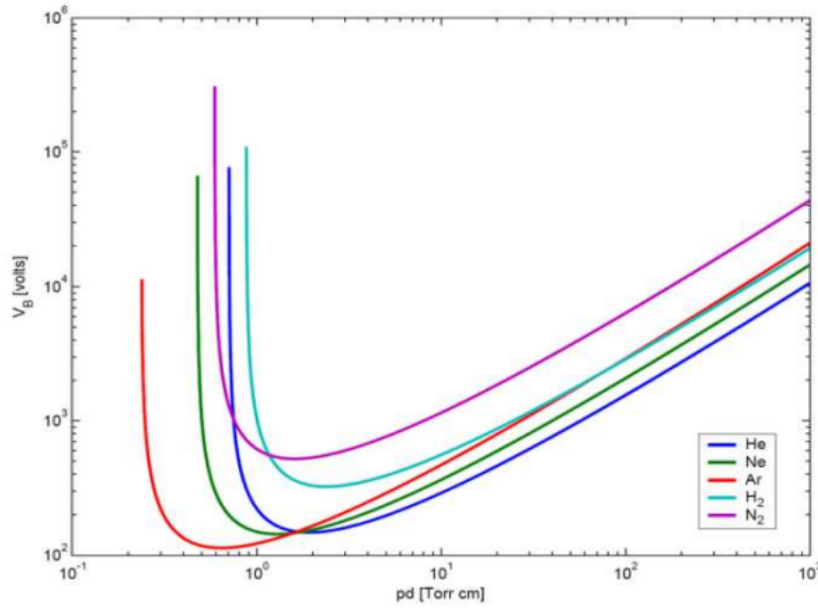


Figura 2: Curvas de Paschen de voltaje de ruptura en función del producto presión por distancia pd para He, Ne, Ar, H_2 y N_2 . Tanto el voltaje como el producto pd están en escala logarítmica. [2]

Este trabajo se centra en la descarga glow en un tubo con aire, en el cual se tuvo control sobre la presión y la distancia de los electrodos. El objetivo fue obtener el voltaje de ruptura para diferentes configuraciones de dichas variables, y estudiar la curva de Paschen para este gas, buscando estos voltajes con diferentes procedimientos de medición. Además se busco detectar el fenómeno de histéresis.

2 Montaje experimental y calibración

El montaje experimental se muestra en la Figura 3. Se contó con un tubo de vidrio en forma de cruz con cuatro aberturas: en una de las direcciones se encontraron los electrodos (ánodo y cátodo), en la otra dirección se colocó de un lado una bomba de vacío y del otro un sensor de presión Edwards WRG-S KF25. En ese mismo lado también se disponía de una válvula regulable para controlar el ingreso de aire al sistema y así manejar la presión. El ánodo estuvo fijo y se controló la posición del cátodo, pudiéndose medir la distancia entre ambos con una hoja milimetrada. Ánodo y cátodo se conectaron a un divisor resistivo formando un circuito como se muestra en la Figura 4, alimentado con una fuente de alta tensión Stanford research systems, modelo PS325 2500v-25w. Esta fuente se controló con un generador de funciones Tektronix modelo AFG3021B. El divisor resistivo permite medir tensiones proporcionales a la corriente y la caída de tensión en el ánodo-cátodo pero ordenes de magnitud más pequeñas, de modo que no se dañen los equipos.

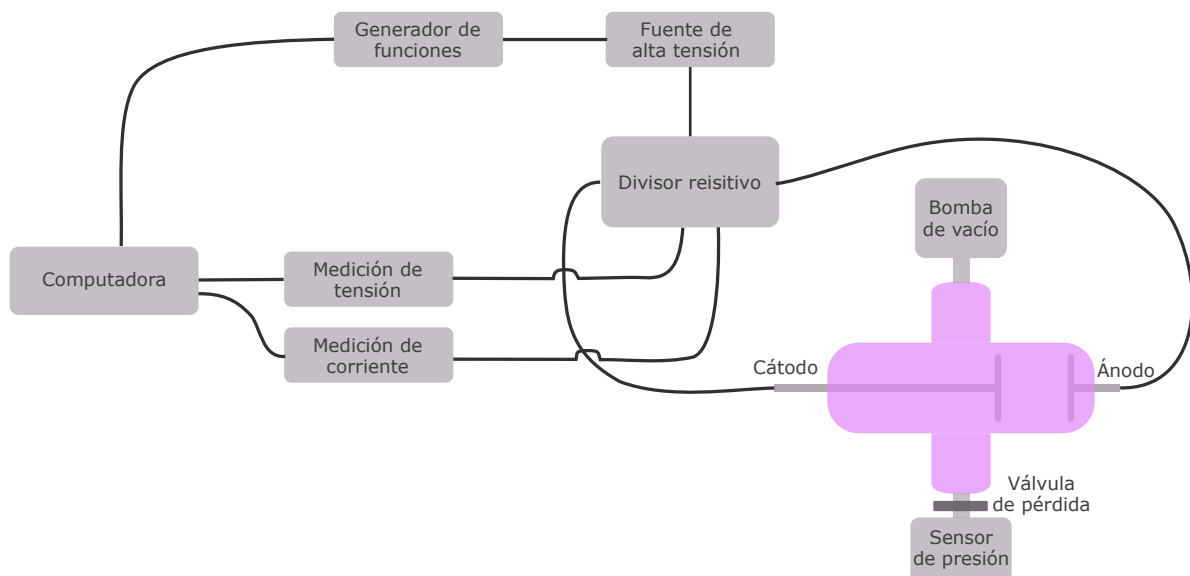


Figura 3: Montaje experimental. El dispositivo donde ocurría la descarga fue un tubo de vidrio con dos electrodos (ánodo y cátodo, cátodo movable), una bomba de vacío, una válvula de escape y un sensor de presión. Estos elementos permitieron controlar la presión dentro del tubo y la distancia entre los electrodos (ambos factores que modifican el voltaje de ruptura de la descarga). El dispositivo se conectó a un divisor resistivo que lo integra a un circuito en el cual pueden hacerse mediciones proporcionales a la caída de tensión electrodos y la corriente en el circuito. Estas mediciones se realizaron en un caso con multímetros de banco y en otro caso con un osciloscopio, siempre controlando los aparatos desde la computadora. Al circuito se lo alimentó con una fuente de alta tensión controlada por un generador de funciones. Al generador de funciones también se lo controló desde la computadora.

El esquema de la Figura 4 es útil para notar las proporcionalidades entre las mediciones reales que se hacen sobre el circuito y los valores que se quieren obtener. La *medición de corriente* es una medición de la caída de tensión sobre la resistencia R_i , que está en serie con el tubo donde ocurre la descarga glow. Por lo tanto, la corriente sobre el tubo y sobre esta resistencia son iguales. Basta medir la caída de tensión sobre esta y dividirla por su resistencia para obtener el valor de la corriente. Los resultados obtenidos para cada resistencia están en la Tabla 1, fueron medidos con un multímetro de mano Uni-t, modelo Ut51. Por ende para transformar estas mediciones de tensión en mediciones de corriente se las dividió por un factor $(153 \pm 4) \Omega$.

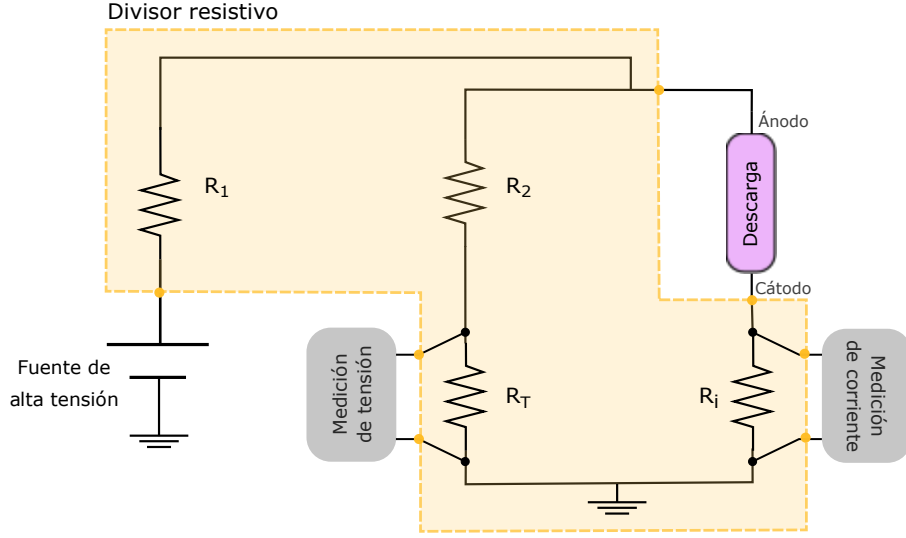


Figura 4: Esquema del circuito que queda al conectar el tubo al divisor resistivo. Se tiene un resistor R_1 que actúa como limitador de la fuente de alta tensión y luego un paralelo. En una rama una resistor R_T permite medir la caída de tensión en el paralelo, el resistor R_2 tiene una resistencia de un orden de magnitud mayor que R_T para amortiguar la tensión sobre R_2 y bajar el riesgo de arruinar instrumentos al medir. En la otra rama queda conectado el tubo (por fuera del divisor resistivo) en serie con un resistor R_i que permite calcular la corriente sobre la rama a partir de la caída de tensión sobre la misma (conociendo su resistencia). Teniendo la caída de tensión en el paralelo y la caída de tensión en el resistor R_i puede calcularse la tensión entre los electrodos del tubo donde ocurre la descarga y la corriente por el mismo.

Para saber la proporcionalidad entre la caída de tensión sobre el ánodo-cátodo y la *medición de tensión* se alimentó al circuito con voltajes entre 100 V y 200 V y se midieron ambas tensiones con multímetros de mano (misma marca y modelo antes mencionadas) y se obtuvo la proporcionalidad como la pendiente de un ajuste lineal a estos puntos, que fue de (1062 ± 3) . En el rango de voltajes en el que se midió la descarga glow no ocurre, es decir que son voltajes en el régimen de descarga oscura. Esto es importante, ya que en este régimen la corriente que circula por la rama del tubo es despreciable y toda la tensión se acumula en los electrodos. Pero cuando ocurre la descarga, la caída de tensión de la rama se reparte entre el tubo y la resistencia R_i , por lo tanto esta medición en realidad es proporcional a la caída de tensión en toda la rama. Para recuperar la tensión entre el ánodo-cátodo habrá que restar la tensión que se mide en la *medición de corriente*. En resumen: para transformar las *mediciones de tensión* en la tensión entre el ánodo-cátodo se le restó la *medición de corriente* y se la multiplicó por (1062 ± 3) .

Resistencia	Valor medido
R_1	$(30 \pm 2) \text{ M}\Omega$
R_2	$(58 \pm 3) \text{ M}\Omega$
R_i	$(153 \pm 4) \Omega$
R_T	$(55 \pm 1) \text{ k}\Omega$

Tabla 1: Valores de resistencia medidos para los resistores del divisor resistivo. Se midieron con un multímetro de mano Uni-t, modelo Ut51.

3 Mediciones y Resultados

Las mediciones consistieron en alimentar al circuito con voltajes linealmente crecientes en función del tiempo y medir en cada caso tensión y corriente entre los electrodos. La manera de

lograrlo fue controlando la fuente con un generador de funciones, y configurar el mismo para que envíe una tensión periódica de forma triangular. Se aprovechó la bajada de la tensión en la onda triangular para observar la histéresis. La fuente tiene una medida de seguridad que provoca que corte el funcionamiento si la corriente que circula en el circuito es mayor a 10 mA. Como en el armado experimental la corriente depende de la distancia entre electrodos y la presión del aire en el tubo, para cada medición hubo que fijarse cual era el máximo voltaje que podía entregar la fuente sin cortar su funcionamiento y configurarlo como máximo de la onda triangular. Las amplitudes de las triangulares fueron distintas en cada medición por este motivo, y en cada caso se configuró un offset de la mitad de la amplitud para que la tensión entregada fuera mayor o igual cero. Hubo dos protocolos de medición: uno en el que se mide con multímetros y otro con un osciloscopio.

3.1 Mediciones con multímetro

Se comenzó midiendo con dos **multímetros** Agilent 34401A, controlados de manera remota a través de Python, la tensión y la corriente entre el ánodo-cátodo para las configuraciones de presión y distancia que se muestran en la Tabla 2. Los multímetros se configuraron para adquirir con $4\frac{1}{2}$ dígitos, lo que implica el menor tiempo de integración posible del aparato, sin embargo la adquisición remota demora aproximadamente 1 segundo. Se configuró un periodo para la triangular de 600 segundos y se midieron 550 tensiones y corrientes para cada configuración *pd* (presión-distancia), de modo que el periodo de la triangular se cubrió casi completamente. En la Figura 5 se muestran lo obtenido para la configuración 4 de la Tabla 2. En esta se observa la evolución temporal de la tensión entre electrodos (voltaje en función de numero de medición) y la relación voltaje en función de corriente. Los datos negros corresponden a descarga glow normal (voltajes crecientes en el tiempo) y los rojos a histéresis (voltajes decrecientes en el tiempo). En la evolución temporal de cada caso puede verse como el comportamiento tiene un quiebre en su pendiente, redondeado en verde. Este quiebre se produce cuando aparece (o desaparece) la descarga y hay circulación de corriente (o deja de haber). Es decir, en el voltaje de ruptura. En los gráficos de voltaje en función de corriente puede observarse el salto que hace la corriente luego de superar este voltaje de ruptura. La corriente pasa de valores del orden de 10^{-5} mA (asociados a corrientes espurias) a valores del orden de los miliamperes. Notese que el salto es abrupto, la baja resolución temporal del multímetro no permite detectar las corrientes intermedias.

El voltaje de ruptura en la histéresis en la medición 4 que se muestra en la Figura 5 fue de (344 ± 1) V. Resultó mas bajo que el de la descarga normal, que fue de (376 ± 1) V. Esto ocurrió para las seis mediciones realizadas y se corresponde con la predicción teórica de la Figura 1.

Medición	Presión [mBar]	Distancia [cm]
1	0.120 ± 0.018	2.00 ± 0.01
2	0.160 ± 0.024	2.00 ± 0.01
3	0.260 ± 0.039	2.00 ± 0.01
4	0.640 ± 0.096	2.00 ± 0.01
5	0.960 ± 0.144	2.00 ± 0.01
6	0.860 ± 0.129	3.00 ± 0.01

Tabla 2: Configuraciones de presión en el tubo y distancia entre los electrodos para cada una de las mediciones realizadas con los multímetros de banco. Para cada medición se varió el voltaje uniformemente desde 0 V hasta voltajes del orden de los cientos de Volts. Por medición se realizaron 550 adquisiciones de tensión entre los electrodos y corriente en el circuito, buscando el voltaje de ruptura.

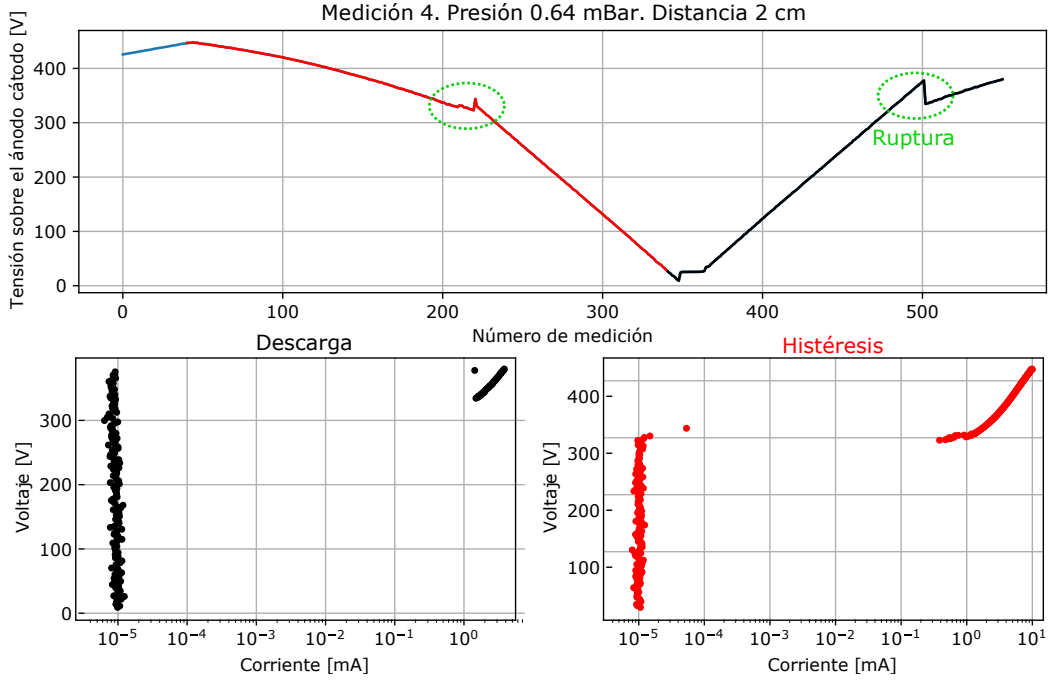


Figura 5: Adquisiciones realizadas con los multímetros para la medición 4, en la que la presión fue de (0.640 ± 0.096) mBar y distancia entre electrodos de (2.00 ± 0.01) cm. En el gráfico superior se observa una evolución temporal de las adquisiciones para la medición de tensión entre los electrodos (tensión medida en función del número de adquisición). En rojo se señala lo que corresponde a la histéresis y en negro la descarga normal. Abajo de este, para cada caso, se grafica voltaje en función de la corriente. En verde se señaló un quiebre en el comportamiento del sistema, que corresponde al voltaje de ruptura. El mismo voltaje es el máximo para el cual la corriente permanece en valores bajos sin cambiar, luego aumenta entre 4 y 5 órdenes de magnitud y comienza a crecer rápidamente.

Para encontrar los voltajes de ruptura de cada medición se analizó la región en la que el voltaje crece en función del tiempo (pintada de negro en la Figura 5). Se tomaron los datos de voltaje en función de corriente y se buscó el voltaje máximo medido para la región en la que la corriente es menor a 2×10^{-4} A. El error que se asoció al voltaje de ruptura es la menor de las distancias entre voltajes consecutivos medidos. Se tomó este criterio para el error para compensar la lenta adquisición de los multímetros en el entorno del voltaje de ruptura.

Una vez calculados los voltajes de ruptura para cada configuración pd se los ajustó con la ley de Paschen (ecuación 1) con la función `curve_fit` de la librería `scipy.optimize` de Python, obteniendo lo que se observa en la Figura 6. Si bien la tendencia de los datos pareciera ir acorde a la ley, es notable como el ajuste no se adapta a ellas, lo cual se confirma al calcular el $p\text{-value}=0$. Se observa como ajustan mejor los puntos que tienen pd menor al mínimo de la función, pero se aleja de los puntos con pd mayor al mínimo. Este tipo de ajuste no tiene en cuenta los errores en x , que podrían forzarlo a que ajuste mejor la parte con pd mayor al mínimo. Por ende se realizó un segundo ajuste minimizando la suma de las distancias, tanto en la dirección vertical como en la horizontal, de los puntos del ajuste con las mediciones pesadas por su error (cuadrados mínimos en x y en y). La forma de minimizarla fue con la función `minimize` (también de `scipy.optimize`), sin embargo se volvió a obtener $p\text{-value}=0$. Esto mismo también ocurre si calcula el $p\text{-value}$ sobre la curva de Paschen generada por los parámetros teóricos[3] por lo cual se puede afirmar que nuestros resultados no siguen dicha ley. Los parámetros que se esperaban obtener eran de $A = 430 \frac{V}{mBar.cm}$ y $B = 1.27$ sin embargo para el primer ajuste el se tuvo $A = (630 \pm 50) \frac{V}{mBar.cm}$ y $B = 1.68 \pm 0.03$, y para el segundo $A = 860 \pm 70 \frac{V}{mBar.cm}$ y $B = 2.02 \pm 0.04$. Los parámetros hallados tampoco superponen con el modelo o entre si.

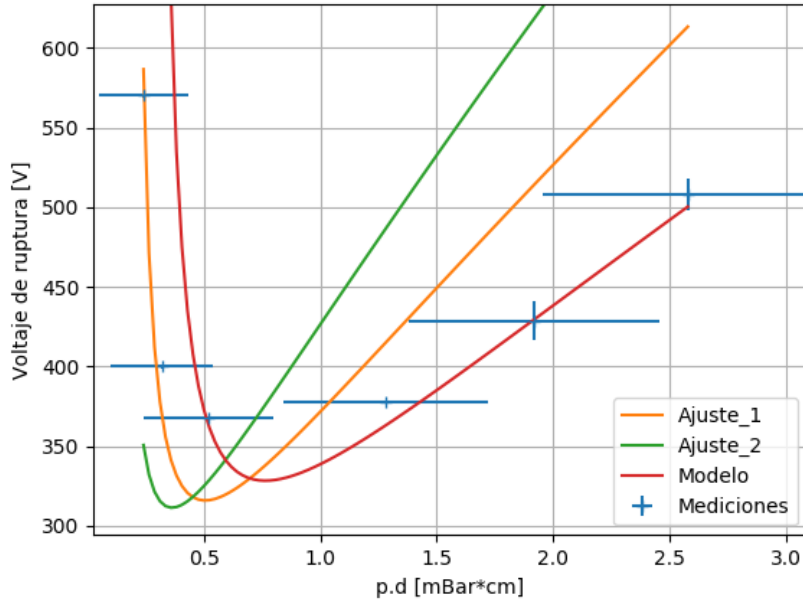


Figura 6: Ajustes por la curva de Paschen (ecuación 1) del voltaje de ruptura en función del producto pd (presión en el tubo por distancia entre electrodos). El primero se realizó minimizando las diferencias en el eje vertical y el segundo en ambos ejes. Se observa que ambos ajustes priorizan las mediciones de pd menores al mínimo, pero se alejan de las que están en pd mayor al mínimo. A su vez se ve que el modelo teórico ajusta muy bien los puntos con $pd > 0.5$ mBar cm pero presenta un polo sobre los primeros dos puntos. En todos los casos el p -value fue 0.

En estas mediciones se puede observar que, si bien los multímetros cuentan con una alta precisión para medir el voltaje de ruptura, la lenta adquisición comparada con la duración de la descarga provocó que no se haya podido caracterizar adecuadamente el entorno a la descarga. Esto podría explicar las diferencias significativas entre los datos y el modelo teórico. A su vez, el rango de voltajes en el que se barrió fue muy amplio (desde 0 V hasta el máximo que pudiese el amplificador), lo que provocaba que cada medición durara mucho tiempo y entorpecía su sistematización.

3.2 Mediciones con osciloscopio

En una segunda instancia se realizaron las mismas mediciones con un **osciloscopio** Tektronix modelo TDS1002B. Este aparato posee menor resolución que los multímetros (8 bits), pero con mayor frecuencia de muestreo (2500 registros por pantalla y 1 Gsample/seg). La triangular en este caso se configuró para que tenga un periodo de 10 segundos para realizar mediciones más rápidas. Se usó esta misma señal del generador de funciones como trigger externo para el osciloscopio y se adquirieron pantallas del osciloscopio a través de Python midiendo con la opción *single sequence*. En la Figura 7 se muestra una de las pantallas adquiridas. Al graficar el voltaje en función de la corriente para estas mediciones se observa una mayor densidad de puntos en la zona de ruptura que en el análisis anterior de la misma dependencia, como se puede ver en la Figura 8a. Esto es porque la resolución temporal del osciloscopio es mayor que la del multímetro. Sin embargo no en todos los casos resultó suficiente, como se enseña en la Figura 8b. A la par, se observa una discretización en las corrientes mas pequeñas, por la baja resolución en voltaje del osciloscopio. Dicha resolución también se vio afectada por barrer en un rango de voltajes demasiado amplio y enfocar con la pantalla del osciloscopio la totalidad de ese rango cuando la zona de interés era la del voltaje de ruptura.

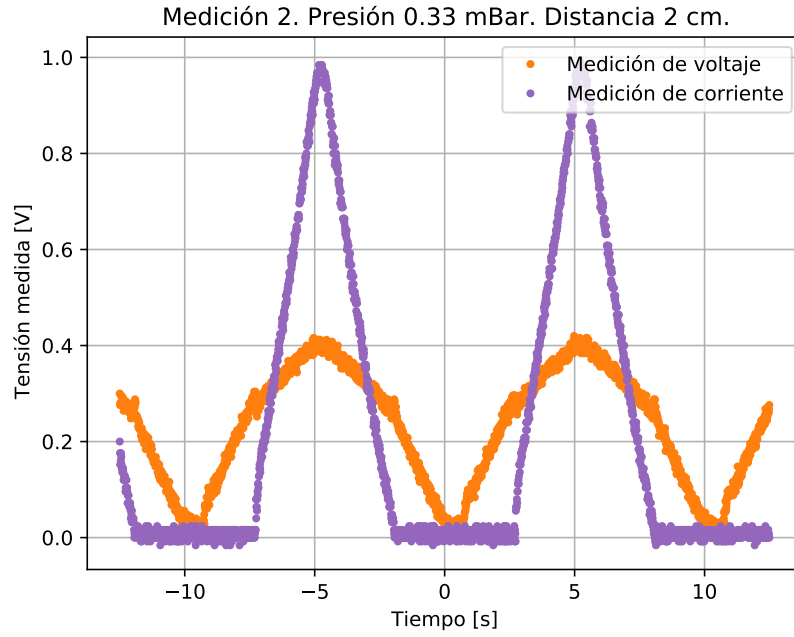


Figura 7: Pantalla del osciloscopio adquirida para la medición 2, en la que la presión fue de (0.33 ± 0.05) mBar y distancia entre electrodos de (3.00 ± 0.01) cm. En naranja las mediciones que son proporcionales a la caída de tensión entre electrodos. En violeta las mediciones proporcionales a la corriente en la rama del tubo. Se observa, al igual que en el caso del multímetro, un quiebre en el voltaje en función del tiempo cuando ocurre la descarga.

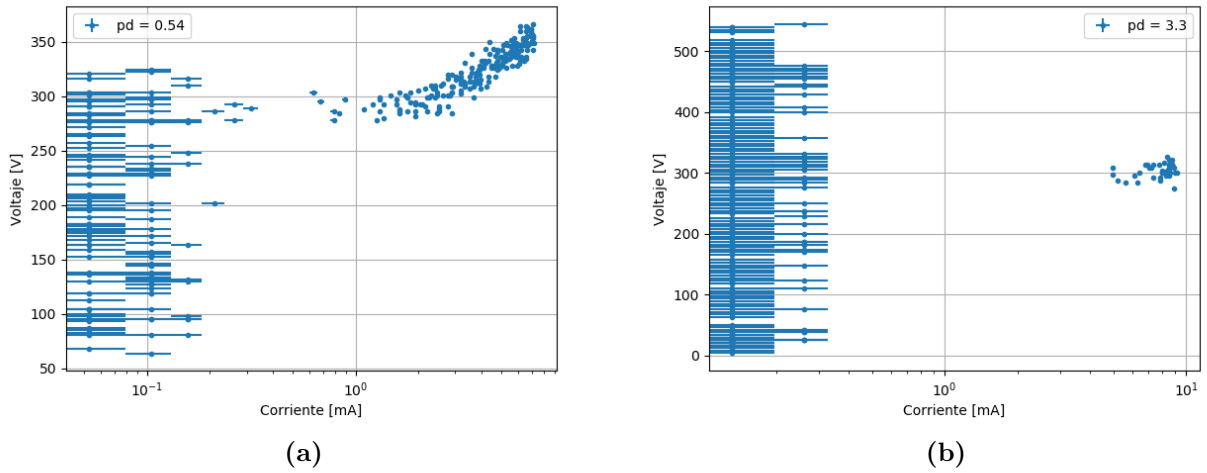


Figura 8: Gráficos de la corriente sobre el ánodo-cátodo en función de la caída de tensión sobre el mismo. Dichos gráficos se realizaron con mediciones adquiridas por un osciloscopio. Debido a su alta frecuencia de muestreo se mejoró la caracterización del entorno al voltaje de ruptura para algunos casos como se muestra en (a). Sin embargo esto no fue suficiente para todos los casos, como se muestra en (b). Por otro lado queda expuesta la discretización de las mediciones debido a la menor resolución en voltajes del mismo.

La rápida adquisición del osciloscopio permitió que se realizaran mediciones para 18 configuraciones de presión y distancia. Se variaron estos parámetros de la siguiente manera: se eligió una primera distancia de (3.00 ± 0.05) cm y se midió con seis presiones distintas entre 0.1 mBar y 1.1 mBar. Lo mismo se hizo para (2.00 ± 0.05) cm de distancia con presiones entre 0.11 mBar y 1.1

mBar, por último para (1.00 ± 0.05) cm de distancia y presiones entre 0.21 mBar a 1.0 mBar. En la Figura 9 se muestran los voltajes de ruptura obtenidos para cada caso en función del producto pd (presión por distancia), diferenciando los puntos que corresponden a distancias iguales. Haciendo esta diferenciación se observa que las mediciones para distintas distancias, pero igual producto con la presión, parecen caer en un único comportamiento. Esto es compatible con la hipótesis inicial de las curvas de Paschen, que supone de que el voltaje de ruptura depende del producto entre presión y distancia y no de cada parámetro por separado.

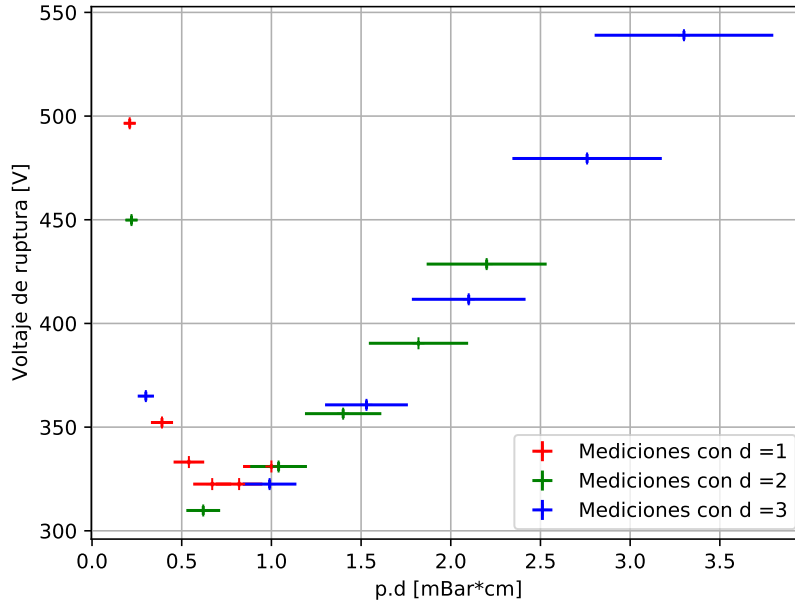


Figura 9: Mediciones del voltaje de ruptura en función de pd diferenciadas por la distancia en la que se midieron. Para realizarlas se fijó inicialmente una distancia y se barrió en un rango similar de presiones para todos los casos (aproximadamente desde 0.1 mBar hasta 1 mBar). El máximo de este rango (a distancia fija) coincidía con el límite en el cual se se podía generar efecto glow. Pasado este límite la corriente del efecto era mayor de la que podía entregar la fuente. Esto se puede ver en el gráfico al observar que cuanto menor la distancia, menor el máximo pd medido.

Se los ajustaron los voltajes de ruptura por la función de Paschen utilizando cuadrados mínimos en ambos ejes como antes, obteniendo lo que se observa en la Figura 10. En la figura se muestran dos gráficos: uno para todas las mediciones y otro descartando las primeras cuatro a los que se les superpuso el ajuste lineal y el modelo teórico. Lo que se observó fue que estos primeros puntos están forzando al algoritmo por tener errores mas chicos que el resto de los puntos. El ajuste tiene que sacrificar a todos los demás puntos para que estos queden dentro. Si se los descarta el ajuste mejora notablemente. Se probó inicialmente quitando solo el primero, luego los dos primeros, luego 3 y por último los cuatro primeros como se muestra en la Figura 10b. Se observó que el ajuste mejoraba progresivamente. Además el ajuste que se consigue excluyendo a estos puntos toma valores negativos para esos pd . Estos cuatro puntos corresponden a:

- La primer medición realizada con distancia (1.00 ± 0.01) cm. Presión: (0.110 ± 0.017) mBar
- La primer medición realizada con distancia 2cm. Presión: (0.210 ± 0.032) mBar
- La primer medición realizada con distancia 3cm. Presión: (0.100 ± 0.015) mBar
- La segunda medición realizada con distancia 1cm. Presión: (0.390 ± 0.059) mBar

Son la primer medición realizada con cada distancia, y los puntos de presiones más bajas.

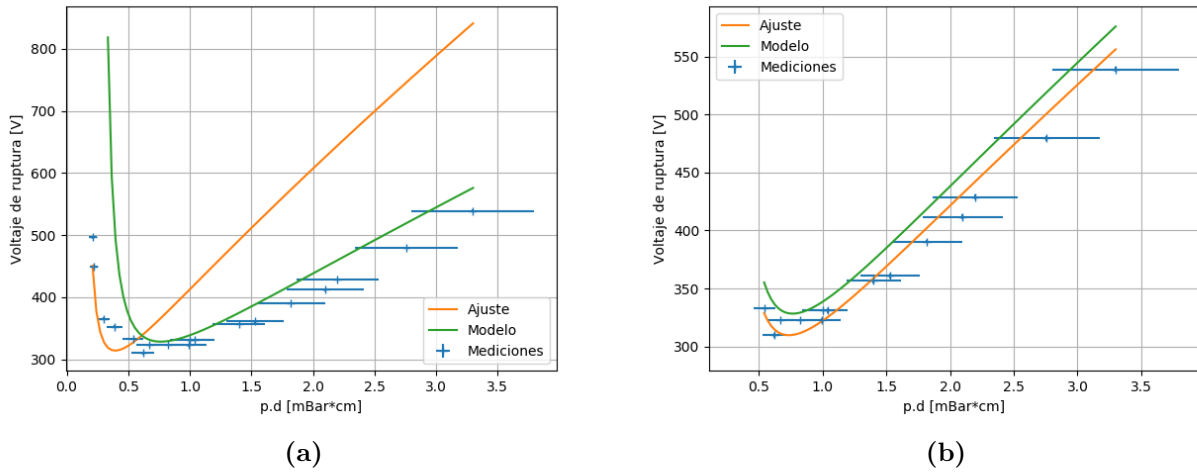


Figura 10: En esta figura se muestran dos ajustes sobre las mediciones con osciloscopio de voltaje de ruptura en función de pd . La primera (a) con todas las mediciones, la segunda (b) borrando los primeros 4 puntos con pd más bajos. Se observa una clara mejora del ajuste en (b), lo que indicaría que el algoritmo se ve forzado por estos primeros cuatro puntos, y termina por sacrificar los demás para que estos no queden afuera.

En la Tabla 3 se pueden ver los parámetros hallados para el ajuste con todas las mediciones y los que se hallaron para el ajuste al que se le removieron 4 mediciones, además se muestran los parámetros esperados[3]. Si bien para el segundo ajuste el parámetro A solapa y el B solo presenta diferencias significativas del 1.5%, el p -value fue 0 para todos los casos.

	A [$V/mBar.cm$]	B
Modelo	430	1.27
Ajuste 1	800 ± 30	1.93 ± 0.03
Ajuste 2	420 ± 20	1.31 ± 0.02

Tabla 3

Una posible explicación para estas discrepancias es que al no haber frenado la estimulación del tubo entre barrido y barrido, la actividad dentro del mismo no haya podido estabilizarse. Específicamente los resultados a partir del segundo ciclo estarían subestimados contra los del primero. De este modo al dejar la fuente emitiendo una señal de 10 segundos de periodo y medir, los resultados hallados no se verían relacionados con la ley de Paschen y se encontrarían subestimados (lo cual es coherente al comparar el modelo teórico con las mediciones).

4 Conclusiones

Finalizado este trabajo se encuentran varias formas para intentar mejorar las mediciones. En primer lugar podría variarse mas lentamente el voltaje en la zona de la descarga, para medir mas precisamente la curva de voltaje en función de la corriente en ese rango y mejorar la exactitud sobre el voltaje de ruptura. Además se considera que es importante que el tubo este estabilizado al realizar la medición, es decir que no haya ocurrido en él una descarga anteriormente en el corto plazo. Sería importante también encontrar cuál es el tiempo de espera óptimo entre descarga y descarga.

Respecto a los instrumentos, el osciloscopio puede realizar los ciclos de medición a mayor velocidad, pero no consigue resolver correctamente las corrientes bajas si no se lo enfoca en un rango adecuado. Además su frecuencia de muestreo puede no ser suficiente para caracterizar correctamente el entorno al voltaje de ruptura, una vez más debido al incorrecto enfoque. Por otro lado el multímetro tiene mejor resolución pero demora más tiempo entre medición y medición, por lo que aparece una incerteza desconocida sobre el instante asignado a cada medición. A su vez dicha frecuencia de adquisición deja lugar a que la descarga se realice por completo entre el intervalo de mediciones.

El comportamiento de los voltajes de ruptura en función del producto pd parece respetar Paschen, sin embargo no se consiguió en ningún caso ajustar correctamente los datos a esta función. Se observó en todos los casos que los valores de pd menores al mínimo de la función se ajustan bien por su lado, y los mismo para los mayores. Además, debido al mayor error relativo que se tiene en el eje x contra el del eje y , se sugiere invertir computacionalmente la ley de Paschen y calcular los parámetros de bondad sobre dicha inversión (es decir sobre pd).

Bibliografía

- [1] “*Guía: Descarga Glow. Laboratorio 5 - Dept. Física, FCEyN, UBA,*” 2021. <http://materias.df.uba.ar/15b2019c2/files/2012/07/guia-descarga-glow.pdf>.
- [2] A. N. Gortari and I. Lengyel, “*Descarga Glow,*” 2011. http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/G1glow.pdf.
- [3] “*Ley de Paschen.*” https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Paschen.