

# Descarga Glow

Di Filippo, Juan; Kuperman, Martín; Sandá Seoane, Rosa.

Laboratorio 5, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Mayo de 2015

## Resumen

En el presente trabajo, se estudió la descarga Glow en un tubo con aire. Se obtuvo la curva de voltaje interelectródico en función de la corriente, así como el voltaje de ruptura, para diferentes distancias entre electrodos y presiones (se trabajó siempre en el rango del vacío medio). Los mencionados datos se ajustaron mediante el modelo de Paschen, obteniéndose los parámetros correspondientes al mismo. Dichos parámetros resultaron  $a = (1437 \pm 205) Vcm^{-1}Torr^{-1}$  y  $b = (2,39 \pm 0,07)$ , mientras que los tabulados son  $a = 365 Vcm^{-1}Torr^{-1}$  y  $b = 1,18$ . Es notorio que no solapan los valores obtenidos con los tabulados, y en particular, uno de ellos difiere en un orden de magnitud. Asimismo, se analizó cualitativamente el fenómeno, verificándose la existencia de la serie alternada de zonas luminosas y oscuras características de este tipo de descarga.

## 1. Introducción

La descarga glow es un fenómeno de descarga eléctrica en gases. Se produce cuando en un medio gaseoso se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos confinados en un tubo cerrado. Si se eleva la tensión, comienza a circular corriente entre los electrodos. Si se continúa elevando el voltaje, se llega a un valor crítico o de ruptura, a partir del cual se produce un notorio aumento de la corriente entre electrodos y se observa una luminiscencia, correspondiente a lo que llamamos descarga glow.

La descarga ocurre gracias a electrones semilla que son introducidos al tubo por rayos cósmicos o radiación UV, que son excitados por el campo eléctrico presente entre los electrodos, hasta que adquieren una energía tal, que son capaces de ionizar moléculas del gas. A partir de este momento se genera un efecto avalancha en los electrones, que depende de la tasa de ionización, y de otros factores.

Es de utilidad analizar la relación entre el voltaje y la corriente interelectródicos. Una curva típica puede observarse en la fig. 1

Si realizamos un análisis de la figura 1, nota-

mos que entre los puntos A y D de la fig. 1 ocurre lo que se llama descarga oscura, nombre debido a que la excitación del gas es tan pequeña que no se observa emisión de luz[1].

En esta zona recién mencionada se destacan las siguientes subzonas:

A-B: Existe una corriente débil entre electrodos, provocada por el movimiento de cargas espurias producidas mediante fuentes externas de radiación.

B-C: Si se aumenta el voltaje lo suficiente, se produce una mayor colección de cargas espurias, aumentando así la corriente. Luego se llega un punto en el que aunque aumente el voltaje, la corriente permanece constante.

C-D: Si se sigue aumentando el voltaje, la corriente aumenta de forma exponencial. La energía que alcanza un electrón es suficiente para ionizar una molécula de gas. Si el campo entre electrodos es lo suficientemente intenso, el electrón producto de ionizar al gas puede ionizar a otra molécula, produciendo un efecto avalancha. Las corrientes típicas de esta región son de entre  $10^{-10}$  y  $10^{-5}$  A.

D: Esta es la zona de ruptura eléctrica. En este punto la corriente aumenta entre 4 y 8 órdenes de

magnitud.

La segunda región de importancia es la de descarga glow. En esta se observa una luminiscencia típica del fenómeno. La luminosidad se debe a que la energía y la densidad de las cargas son suficientes para provocar numerosas excitaciones en el medio gaseoso, cuya desexcitación produce emisión de luz.

La segunda zona de importancia puede ser dividida en las siguientes sub-zonas:

E-F: Se alcanza el régimen de glow normal. Aquí el voltaje interelectródico es prácticamente independiente de la corriente. A medida que aumentamos el voltaje de alimentación  $V_f$ , aumenta la corriente sin modificarse en voltaje  $V$  entre electrodos. Esto sucede puesto que aumenta el área a través de la cual fluye la corriente, manteniéndose inalterada la densidad de corriente.

F-G: Cuando el área del cátodo está cubierta por completo -punto F- la corriente aumenta a expensas de un aumento en  $j$  -su densidad-, con lo cual a partir de aquí aumenta  $V$ . Esta región es llamada glow anormal. Cabe destacar que si se parte del punto F, y se recorre la curva hacia la izquierda, es posible observar un ciclo de histéresis.

Si se supera G, cosa que sucede cuando la corriente es del orden de 1 A, se produce una descarga arco, cayendo fuertemente el voltaje  $V$  y aumentando la corriente.

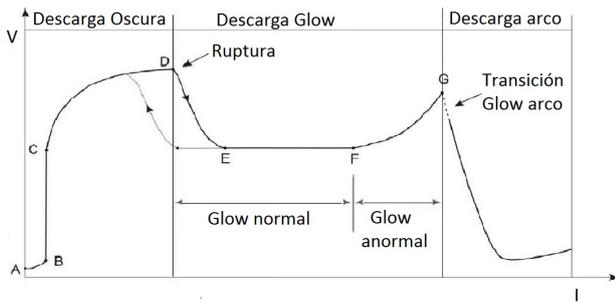


Figura 1: Voltaje interelectródico en función de la corriente. Se puede apreciar el voltaje de ruptura en el punto D, valor que separa la descarga oscura de la descarga glow normal, donde se observa la luminiscencia característica del fenómeno.

La ley de Paschen [2], recibe su nombre gracias a Friedrich Paschen, que la descubrió en 1889. Esta ley experimental, relaciona al voltaje de ruptura -punto D en la figura 1- con el producto entre la presión - $p$ - dentro del tubo con gas y la distancia - $d$ - entre electrodos. Cabe destacar que el voltaje

de ruptura depende además, del gas utilizado y del material de los electrodos. Esta relación recién mencionada, puede escribirse como

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

donde  $a$  y  $b$  son constantes dependientes del gas. La ecuación recién mencionada, presenta un mínimo en  $p \cdot d = e^{(1-b)}$ .

En la figura 2 se observan curvas de Paschen para diferentes gases.

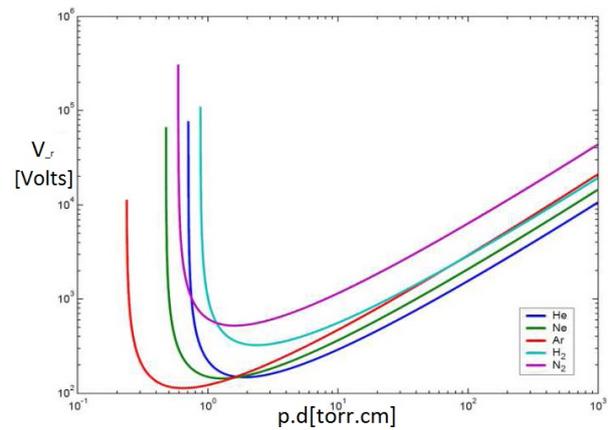


Figura 2: Curva de Paschen para diferentes gases, entre los cuales se encuentran el Helio, el Neón, el Argón, el Hidrógeno y el Nitrógeno. Esta curva presenta un mínimo, que sucede cuando los electrones poseen la máxima capacidad de ionización. Ambas variables del gráfico se encuentran en escala logarítmica.

Cuando se tiene una descarga glow en un tubo, se puede observar entre los electrodos una serie alternada de zonas luminosas y oscuras, cuyas características dependen de la energía ganada por los electrones en el campo eléctrico. En la figura 3 se muestra en forma esquemática la distribución y denominación de las distintas zonas.

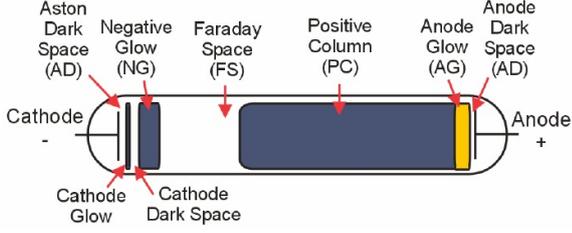


Figura 3: Distribución luminosa en la descarga glow. Se indica cada en negro cada una de las zonas luminosas características, y en blanco las zonas oscuras, con sus respectivos nombres.

La motivación inicial al comenzar este trabajo fue la de analizar, para un tubo cerrado con aire, la relación que el voltaje entre electrodos y la corriente poseen, fundamentalmente para las zonas comprendidas entre A y G, es decir entre la descarga oscura y glow anormal. Se centro el estudio en estas regiones pues ahí se encontraba la información de relevancia para luego, a partir de esto, obtener la curva de Paschen para diferentes distancias interelectródicas y presiones.

## 2. Desarrollo experimental

El circuito experimental utilizado se puede observar esquematizado en la Fig.4.

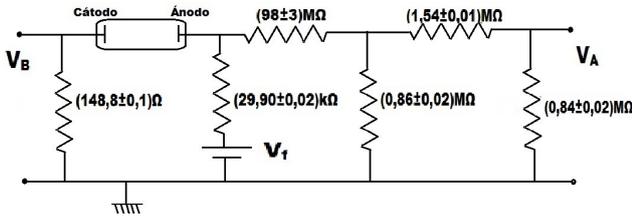


Figura 4: Esquema del circuito utilizado para generar la descarga Glow. Los electrodos se encerraron en un tubo con aire. El  $V_A$  del divisor de tensión sirvió para conocer el  $V_f$ , necesario para conocer el voltaje interelectródico. El  $V_B$ , dadas las magnitudes de resistencias utilizadas, por ley de nodos resulta proporcional a la corriente sobre los electrodos.

El mismo constó de un ánodo y un cátodo dentro de un tubo con aire, conectados a una fuente de alta tensión *Standford PS-325*. Dicha fuente se

conectó a su vez a un divisor de tensión con la finalidad de conocer el voltaje de la fuente ( $V_f$ , necesario para conocer el voltaje interelectródico) a partir de una señal de baja tensión ( $V_A$ ), por lo que en primera instancia se procedió a hacer una calibración entre los mismos. Variando el voltaje entregado por la fuente entre 50 y 1000 V aproximadamente, se midió el  $V_A$  con un multímetro *Agilent 34401A* en cada caso.

La fuente de tensión se conectó a un generador de funciones *Tektronix AFG 3021B* (el cual a su vez se conectó a la pc, para poder automatizar su manejo), por lo que se procedió a hacer una calibración entre el voltaje solicitado por el generador y el entregado en definitiva por la fuente de tensión  $V_f$ . Dado que esta calibración se utilizó con fines puramente operacionales, y no afectan los análisis posteriores del presente trabajo, basta decir que el  $V_f$  era aproximadamente 500 veces más grande que el voltaje solicitado desde el generador.

Para trabajar con presiones convenientes, el tubo de vidrio con los electrodos fue conectado a su vez a una bomba mecánica *Edwards*. La presión dentro del tubo se reguló además con una válvula aguja, y fue controlada mediante un sensor Pirani *Kurt J. Lesker*.

Se utilizó una placa de adquisición de *National Instruments NI-USB-6210*. Se usaron tres canales para medir el  $V_A$ , el  $V_B$  y el voltaje devuelto por el sensor Pirani, para poder conocer el voltaje interelectródico, la corriente y la presión respectivamente (por ley de nodos y ley de Ohm  $V_B$  resulta proporcional a la corriente interelectródica). La placa se conectó a la pc, para obtener mediante un programa de *Matlab* los datos. Este programa permitió hacer un barrido de voltajes para cada distancia entre electrodos y presión fijadas, mediante la comunicación establecida con el generador (conectado a su vez a la pc), para así obtener la curva de voltaje interelectródico vs. corriente en cada caso. Se seteó que el mismo generara una señal cuadrada de período de 1Ms, de manera de que durante el barrido sólo se tuviera la parte positiva de la señal. El barrido siempre se comenzó desde valores de voltajes para los cuales había descarga oscura, hasta voltajes para los cuales ya se observaba descarga Glow. Las distancias se variaron entre  $(1,0 \pm 0,1)$ cm y  $(4,0 \pm 0,1)$  cm, y la presión entre los 90 y los 500 mTorr aproximadamente.

Es importante aclarar que para setear el paso entre voltajes, se hicieron varias mediciones de prueba para una dada configuración, a partir de las cuales se concluyó que un paso de a 0,01 V en los cambios de amplitud de la señal del generador era suficiente: se observó que por más que se afinara ese paso para tener una mejor visualización de la zona de descarga Glow normal, el comportamiento complejo del plasma en esa zona no nos permitió sacar mayor información.

### 3. Resultados y Discusiones

La calibración entre el  $V_f$  y el  $V_A$  (necesaria para poder conocer el voltaje interelectrónico) se observa en la figura 5.

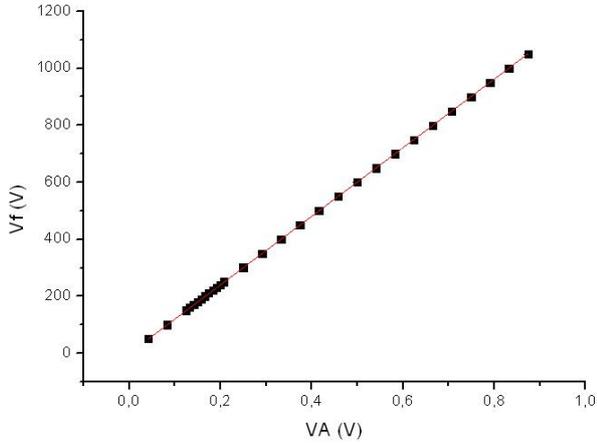


Figura 5: Voltaje de la fuente ( $V_f$ ) en función del voltaje del divisor de tensión utilizado ( $V_A$ ), necesario para conocer el voltaje interelectrónico. Notar que el ajuste es lineal, con una pendiente de  $(1202,9 \pm 0,4)$ .

Como ya mencionamos, la práctica consistió en registrar mediciones sobre la corriente y el voltaje interelectrónicos y sobre la presión en el tubo. En la figura 6 se observa una curva típica obtenida al analizar el voltaje en función de la corriente entre los electrodos.

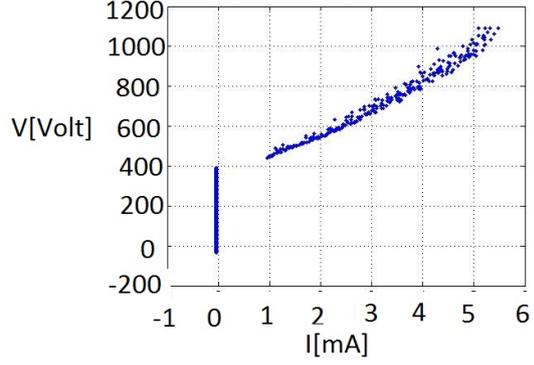


Figura 6: Curva típica registrada de voltaje vs corriente interelectrónica. Se puede observar que la corriente medida antes de la descarga Glow es despreciable con respecto a la medida posteriormente y la existencia de un voltaje de ruptura. Esta curva corresponde al caso  $d = (2 \pm 0,1)cm$  y  $P = (93 \pm 0,3)mTorr$ .

Denotamos que al comienzo del barrido, entre los 0 y los 400V para este caso en particular, la corriente es despreciable (en comparación a la medida posteriormente), puesto que el aire no es buen conductor bajo esas diferencias de potencial. A efectos prácticos, podemos considerar que no circula corriente entre los electrodos en ese rango de voltajes. También se observa la existencia de un voltaje de ruptura  $V_r$ , para el cual empieza a circular corriente entre los electrodos. Para calcular dicho voltaje de ruptura, tomamos el siguiente criterio: se consideraron los voltajes  $V_a$  y  $V_p$ , voltaje anterior y voltaje posterior (a la descarga), siendo estos el último voltaje medido en el cual la corriente es despreciable y el primer voltaje medido para el cual circula corriente, respectivamente. Tomamos  $V_r = (V_a + V_p)/2$  con un error respectivo  $Err(V_r) = V_r - V_a = V_p - V_r$ , con lo cual nos aseguramos de cubrir la franja de voltajes donde no se registraron mediciones.

Es notoria la diferencia presente entre el gráfico de la figura 6 y el de la figura 1, presentado en la introducción. Es de preocupar que el efecto a estudiar efectivamente se esté produciendo pero los análisis básicos del mismo no se correspondan con el modelo propuesto. En efecto, los gráficos mencionados no son contrapuestos con el modelo dado que lo que en realidad sucede es que la curva teórica presentada no se encuentra en escala. No fuimos capaces de reproducir dicha curva puesto que afinar las mediciones en un intervalo pertinente, cercano al voltaje de ruptura, no

implica que podamos obtener mayor información sobre el fenómeno, puesto que éste presenta una complejidad considerable en dicha zona (como ya se mencionó en el Desarrollo).

A su vez, se registró la variación de la presión al realizar el barrido de voltajes. En la figura 7 podemos observar la curva descrita para los mismos parámetros utilizados en la figura 6. Esta forma funcional se presentó en todas las mediciones realizadas.

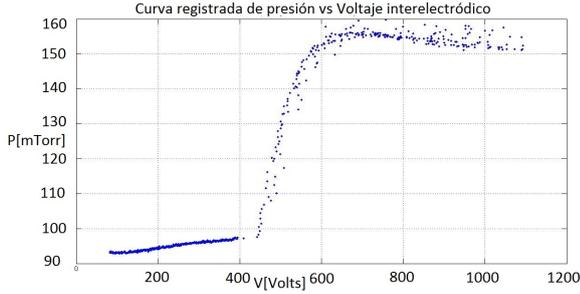


Figura 7: Presión en el tubo en función del voltaje interelectródico para el caso  $d = (2,0 \pm 0,1)cm$  y  $P = (93,0 \pm 0,3)mTorr$ . Se observa para voltajes mayores a 400V un aumento progresivo de presión, el cual se corresponde con el aumento progresivo de corriente entre los electrodos y por ende con el aumento de la temperatura del gas.

Para voltajes menores a 400 V, la máxima variación de presión es menor a 10 mTorr, la cual es notoriamente más chica que la variación máxima total, que es aproximadamente 65 mTorr. El voltaje de ruptura calculado para este caso es  $V_r = (466,6 \pm 35,7)V$ . El comienzo del aumento de presión se corresponde con dicho voltaje y por ende, con la circulación de corriente entre el cátodo y el ánodo. Si uno considera a la presión como energía por unidad de volumen, es consistente tener aumentos de presión, puesto que una vez que circula corriente en el tubo, al aumentar la diferencia de potencial entre los electrodos, varía el campo eléctrico y por lo tanto la energía. Dichos cambios de energía, inducen cambios de temperatura, los cuales se traducen en variaciones de la presión del gas.

Luego de realizar distintos barridos, procedimos a graficar el voltaje de ruptura en función del producto de la presión en el tubo por la distancia entre los electrodos. La curva descrita, conocida como curva de Paschen, se puede observar en la figura 8. La presión utilizada corresponde al voltaje de ruptura calculado. De igual forma que para  $V_r$ , se consideraron  $P_a$  y  $P_p$ , se tomó el promedio

y un error que se solape con ambos valores.

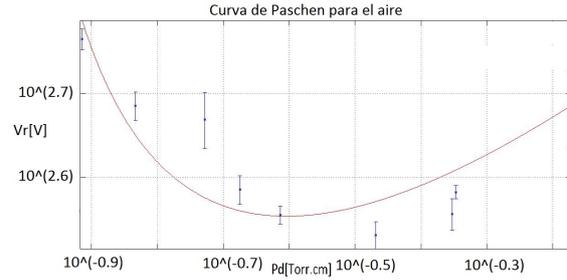


Figura 8: Curva de Paschen obtenida para el aire: voltaje de ruptura en función del producto presión por distancia entre electrodos. Ambos ejes se encuentran en escala logarítmica. La curva se ajustó con una función del tipo  $F(x) = ax/(\ln(x) + b)$  de acuerdo a lo establecido en la ecuación 1. Los parámetros del ajuste son  $a = (1437 \pm 205)Vcm^{-1}Torr^{-1}$  y  $b = (2,39 \pm 0,07)$ .

Los valores tabulados para el aire del ajuste realizado son  $a = 365Vcm^{-1}Torr^{-1}$  y  $b = 1,18$ . No sólo los valores obtenidos no se solapan con los tabulados, si no que  $a$  difiere en un orden de magnitud. Considerando que el cálculo de la distancia entre electrodos no presenta ningún tipo de dificultad al medirla, y que el valor de  $V_r$  calculado está sobrestimado (puesto que solo dijimos que se encuentra en un rango donde no tenemos mediciones), atribuimos estas diferencias a las mediciones de la presión. Cabe mencionarse que el sensor utilizado no funcionaba correctamente a presión ambiente, puesto que medía una presión de aproximadamente 5 Torr cuando debería medir, aproximadamente, 760 Torr. Se asumió durante la experiencia, que el mismo funcionaba correctamente a presiones menores a los  $10^{-1}Torr$  (pero fue sólo una hipótesis). Aún considerando que las presiones medidas son del orden correcto, esto pudo ser una fuente de error considerable y la causa de que los parámetros difieran tanto.

Finalmente, cabe destacar, que aunque no realizamos las mediciones pertinentes, se observaron cualitativamente las regiones de luminosidad características de la descarga glow, correspondiéndose las mismas con lo estipulado en la figura 3.

## 4. Conclusiones

Haciendo distintos barridos de voltaje (entre los 0 y los 1200 V aproximadamente), se observó que el aire dentro del tubo, entre el ánodo y el cátodo, que en un comienzo actúa como mal conductor, se vuelve buen conductor a partir de cierto

voltaje de ruptura (de un valor entre los 400 y los 500 V según la presión y la distancia entre los electrodos fijadas), propiciando la aparición del efecto Glow. Estudiando las curvas de voltaje en función de la corriente, se obtuvieron cuantitativamente los valores de los voltajes de ruptura pertinentes. Con dichos voltajes, y el producto entre las presiones correspondientes a los mismos y la distancia entre electrodos, se trazó la curva de Paschen para el aire. La misma fue ajustada con una ecuación del tipo  $F(x) = ax/(\ln(x) + b)$ . Los valores obtenidos fueron  $a = (1437 \pm 205)Vcm^{-1}Torr^{-1}$  y  $b = (2,39 \pm 0,07)$ , mientras que los valores tabulados para los mismos son  $a = 365Vcm^{-1}Torr^{-1}$  y  $b = 1,18$ . Hay una notoria diferencia entre los parámetros calculados y los tabulados, la cual atribuimos, principalmente, al funcionamiento poco confiable del sensor de presión. Debido a esto, no podemos garantizar la confiabilidad de los resul-

tados obtenidos para dicha parte del análisis.

Cualitativamente se pudo corroborar las zonas características de la descarga, pero al no realizar los análisis pertinentes no podemos exponer ningún resultado cuantitativo. Este tipo de análisis contribuirían a completar la experiencia y los estudios sobre el fenómeno. Como complemento a lo realizado, se podrían analizar la dependencia de cada zona luminosa con la presión y la distancia, así como también se podrían trazar las curvas de Paschen para distintos gases.

## Referencias

- [1] Apunte teórico: Guía Glow, Laboratorio 5, Departamento de Física, UBA.
- [2] <http://home.earthlink.net/jimlux/hv/paschen.htm>.