

Descarga glow

Grupo 17 - Flores Leandro*-Arias Daniel**

Resumen—El propósito de este trabajo es en primera instancia obtener las curvas de tensión vs corriente para un tubo con aire a una presión p menor que la ambiental, sobre el cual se aplica una diferencia de potencial mediante de dos electrodos colocados en su interior a una distancia d uno respecto del otro. Además dado que el sistema posee una tensión de ruptura a partir de la cual la corriente se dispara en varios ordenes de magnitud, se busca determinar la curva que relaciona ésta tensión de ruptura con el producto pd también conocida como ley de Paschen. Para esta curva, se determino el voltaje mínimo de ruptura para el producto pd el cual fue: $V_{rmin_{med}} = (343,5 \pm 22,2)V$.



En condiciones normales un gas contiene un determinado numero de electrones e iones. La aplicación de una diferencia de potencial constante (tensión DC) entre dos electrodos colocados dentro de un tubo de vidrio con gas a baja presión produce una corriente debida al movimiento de los iones y electrones ya existentes. El terminal al que se conecta el voltaje más alto es el ánodo del tubo y el otro terminal es el cátodo. Los electrones que se originan en el cátodo se moverán a lo largo de un camino desde un punto de alto voltaje hacia un punto de bajo voltaje y los iones positivos cerca del ánodo se moverán en dirección opuesta. El voltaje a través del tubo de gas, valor de V_p , es una función altamente no lineal de la corriente, I (flujo de carga). Esto se observa en la figura 1.

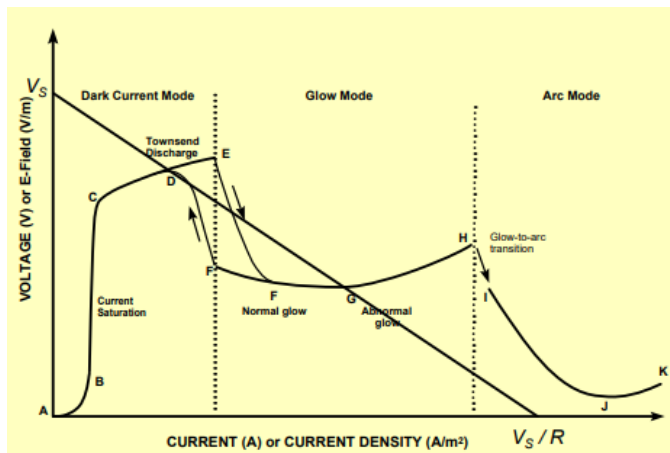


Figura 1. : curva típica del voltaje entre electrodos en función de la corriente a través del circuito. Esta representada también recta de carga, con pendiente V_S/R que determina el punto de trabajo.

Si la corriente es muy pequeña, no afectaría el equilibrio del gas, y su valor solo dependería de la velocidad con la cual los iones y los electrones llegan a los electrodos; así, esta aumenta casi linealmente con el potencial aplicado. Aumentando más el voltaje aplicado V_S , podemos romper el equilibrio, debido a la cantidad de electrones e iones que

llegan a los electrodos y son neutralizados, aumentando el ratio de recombinación y reduciendo el número de partículas cargadas en el gas. Bajo esta situación, el incremento de la corriente con el potencial decrece gradualmente hasta el punto en el cual el número de partículas cargadas producidas por el gas es igual al número que llega a los electrodos; a partir de este momento nos encontramos en la región de saturación, en la cual la corriente de la descarga es independiente del potencial aplicado. Continuando a lo largo de la región de saturación, con aumentos sucesivos del potencial, llegaremos a un incremento exponencial de la corriente con la tensión, debida a la presencia de electrones con energía suficiente para producir nuevos iones y electrones por colisión con los átomos neutros. Además, si el potencial es lo suficientemente alto, los iones son acelerados hacia el cátodo, chocando con él y extrayendo electrones secundarios de su superficie.

Aumentos adicionales del potencial incrementarán la producción de cargas por choques de electrones con los átomos neutros del gas y por emisión secundaria de los electrodos, lo cual lleva a un incremento sobre-exponencial de la corriente, seguido de un colapso del potencial a través de la descarga. Esta repentina transición se denomina ruptura, y se caracteriza por incrementos de varios órdenes de magnitud en la corriente con casi ningún incremento en el potencial por encima de la tensión de ruptura.

A partir de la ruptura tenemos una descarga autosostenida o también llamada descarga glow, pues el número de electrones secundarios producidos en el cátodo es suficiente para mantener la descarga, que, además, empieza a hacerse visible.

Comenzando en el punto G y reduciendo el valor de corriente (moviéndose hacia la izquierda en el gráfico), se observa una forma de histéresis en la curva interelectrodica. En el camino de regreso, la descarga luminosa visible se mantiene a corrientes considerablemente más bajas que en el punto F original y solo entonces, en un nuevo punto E, hace una transición de regreso a la región de Townsend en el punto D; esta región de aumento de la corriente es tal que el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte como para que los electrones inicialmente presentes en el plasma puedan adquirir suficiente energía cinética, antes de alcanzar el ánodo, para ionizar átomos neutros.

*leannicolasflores@gmail.com

**max.daniels77@gmail.com

Cada punto de la curva de la figura 1 representa un par de valores (V_P, I) que satisfacen lo que requiere del circuito entre los terminales de electrodos, el plasma contenido dentro del tubo. Una línea recta trazada desde el origen de la figura 1 hasta cualquier punto particular de la curva, (V_P, I) , tiene una pendiente igual a V_P/I , que es la resistencia aparente efectiva del plasma cuando está operando en ese punto.

En el laboratorio, cualquier circuito que se disponga posee una resistencia óhmica R la cual establece un límite para la corriente alcanzable para un dado valor de voltaje de alimentación aplicado. Dado que el valor de la corriente de descarga determina que tipo de descarga se alcanza, el valor de R determina finalmente el tipo de descarga. En la Fig. 1 además de la curva de voltaje interelectrónico se indica además la recta de carga (ec. 1).

$$V_S = V_P - R I \quad (1)$$

Cualquier punto (S) de intersección de la gráfica de la línea de carga y la gráfica de voltios-amperios no lineal del plasma indica posibles pares de valores (V_P, I) en los que la descarga podría realizarse. Solo en tales puntos de intersección se satisfacen los requisitos sobre los valores simultáneos de V_P e I en ambas mitades del circuito. Estos se denominan "puntos de trabajo".

Considere lo que sucedería si ahora mantenemos la fuente de voltaje, V_S , constante pero aumentamos el valor de la resistencia, R . La intersección de la "línea de cargarecta con el eje horizontal se movería hacia la izquierda mientras que la intersección de la línea de carga con el eje vertical permanece fijo. De esa manera, el punto de operación podría reposicionarse, por ejemplo, en el punto C, y esta sería la única ubicación posible en la que el circuito podría operar, existiendo solo una intersección entre la línea de carga y la gráfica V-I del plasma para esos valores de V_S y R .

Por el contrario, reducir el valor óhmico de R podría hacer que el punto J se convierta en un posible punto de funcionamiento. De hecho, debido a que los plasmas intentarán reducir la fuerza sobre cada partícula cargada, el punto J sería el resultado probable. Si los electrodos no estuvieran diseñados para soportar una corriente de esta magnitud, bien podría ocurrir un derretimiento del tubo. Variando juiciosamente los valores de V_S y/o R , se puede trazar todo el diagrama de características del plasma no lineal. (Recordando siempre no seleccionar valores que puedan ubicar involuntariamente un punto de operación en el rango del arco).

Las características eléctricas de la descarga, como el voltaje de ruptura al que la descarga se hace visible (punto E de la Figura 1), la forma general de la curva característica voltio-amperio y la estructura de la descarga dependen de la geometría de los electrodos, la distancia entre cátodo y ánodo, la forma del recipiente, el gas particular utilizado, su presión, temperatura y el material del electrodo.

Existe una relación bien conocida (ec. 2), llamada Ley de Paschen, que cuantifica la compensación entre las tres can-

tidades determinantes: entre la separación distancia entre electrodos (d), la presión (p) y el voltaje de ruptura (V_t).

$$V_t = \frac{A(p d)}{\ln(p d) + B} \quad (2)$$

Las curvas representadas por esta ecuación tienen un mínimo que corresponde al mínimo voltaje de ruptura del gas que corresponde al punto en que los electrones poseen la máxima capacidad de ionización.

El dispositivo para este trabajo, el cual se describe en la sección siguiente, trabaja en el régimen de la descarga luminiscente, y su comportamiento V vs. I será estudiado para el caso en que el gas sea aire a una determinada presión. Nos relacionamos con los instrumentos que hacen posible la alimentación del circuito para que se produzca descarga, los instrumentos de medición en laboratorio para obtener el voltaje y la corriente y la adquisición automática de datos. También se estudiara el comportamiento del voltaje de ruptura cuando se varíe el producto de la presión con la distancia V_t vs. $p d$.

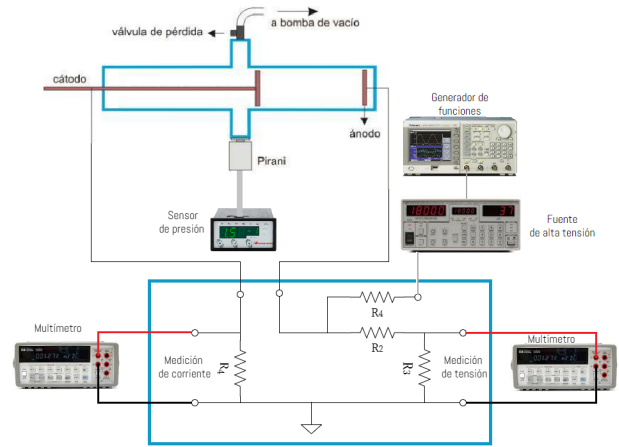


Figura 2. En el siguiente esquema experimental se puede observar en celeste, el tubo dentro del cual se encuentran dos electrodos, éste tiene conectado en uno de sus lados una bomba de vacío y en el otro, un sensor Pirani junto a un conversor ADC *Edwards Standard controller MKII Enhanced* para medir la presión. Además consta de un divisor resistivo (enmarcado en azul) conectado 2 multímetros de banco HP 34401A con el objetivo de monitorear caídas de tensión y corriente entre los electrodos a baja tensión. Finalmente el sistema posee una fuente de alta tensión Stanford PS325 para la alimentación del circuito, la cual es controlada mediante un generador de funciones Tektronix AFG 3021B.

Parte experimental

Para la experimentación se armó un dispositivo como el representado en el esquema de la figura 2.

Dado que para obtener los perfiles de corriente vs voltaje como para las curvas de Paschen es necesario conocer tensión y corriente entre ánodo y cátodo, se optó por utilizar 2 multímetros de banco HP 34401A. Para este fin y puesto que las tensiones involucradas en el experimento se encuentran en el rango 0-1000V, se utilizó un dispositivo (provisto en el laboratorio) el cual mediante un divisor resistivo, permite monitorear en baja tensión las caídas de potencial y la corriente entre ánodo y cátodo. Para poder determinar los

factores de escala inducidos por el divisor, se procedió a desarmar la caja, el circuito interno puede apreciarse en la parte inferior de la figura 2.

Para determinar el factor de escala en la corriente es necesario medir la caída de tensión (V_4) sobre la resistencia R_4 , la cual fue medida entre los bornes de la caja marcados con el nombre de *corriente* con el multímetro de banco y luego, dado que la resistencia $R_4 = (149,0 \pm 0,1)\Omega$ se llegó a la ecuación 3 la cual fija el factor de escala es aproximadamente $1/149$.

$$I_{med} = \frac{V_4}{R_4} \quad (3)$$

Para determinar el factor de escala en la caída de tensión entre electrodos, se partió de la tensión de la fuente V y teniendo en cuenta que los valores de las resistencias $R_3 = (56,1 \pm 0,1)k\Omega$ y $R_2 = (57 \pm 0,1)M\Omega$, se pasa del sistema de ecuaciones 4 a la ecuación 5 lo que permite concluir que el factor de escala a la salida del borne llamado *tensión* genera una tensión aproximadamente 1018 veces más chica que la tensión de la fuente de alto voltaje (5).

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{V}{R_2 + R_3} \\ I &= \frac{V_{med}}{R_3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{med} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) V \quad (4)$$

$$V_{med} = \left(\frac{1}{1018} \right) V \quad (5)$$

La fuente de alto voltaje Stanford PS325 posee en su canal de control un rango de $0 - 10V$ el cual samplea en él todo el rango de salida $0 - 2500V$. Puesto que el objetivo es trabajar en el rango de $0 - 1000V$, el voltaje máximo que emitirá el generador de funciones se fijó en $3.6V$, este valor corresponde al máximo utilizado durante toda la experimentación, aunque para las mediciones se trabajó en rangos inferiores. Para automatizar la toma de datos, se fijó la fuente en modo *rear* (control remoto) y se desarrolló un script, el cual permitió determinar el tiempo de adquisición el cual fue de aproximadamente $1s$ para la medición de corriente y voltaje. Este fue un paso importante ya que al tener una frecuencia de adquisición tan lenta fue un paso crucial para determinar la frecuencia del generador de funciones.

El registro de los datos se realizó en etapas a fin de caracterizar el perfil de V vs I en todo el rango incluso en la zona donde el salto en corriente es sobre-exponencial y en particular de varios ordenes de magnitud. Para esto, se procedió en primera instancia a realizar un barrido de voltajes enviando desde el generador de funciones una señal de rampa simétrica hacia el canal de control de la fuente de alta tensión, permitiendo durante el flanco de subida de la rampa, registrar el proceso de encendido del glow, mientras que en su descenso el de apagado. La frecuencia de la rampa se fijó en $25mHz$ con el fin de que el tiempo en las rampas tanto de subida como de bajada sea de 200 segundos. Esto permitió, dado el tiempo de adquisición de los datos, obtener 200 puntos para cada una de las mediciones 1 y 2, las cuales corresponden a flancos de subida, éstas mediciones pueden apreciarse en la figura 3.

Dado que uno de los principales objetivos era registrar al máximo posible el comportamiento en la región donde el

crecimiento en corriente era sumamente rápido (de varios ordenes de magnitud) fue necesario dividir la toma de datos en 3 regiones o formas operativas de toma de datos. Dos de estas fueron realizadas haciendo uso de la rampa previamente descriptas para distintos rangos de voltaje, estos rangos fueron seleccionados de manera que para la primera medición se registre el fenómeno completo, desde el momento en que la tensión de salida de la fuente era nula, hasta el punto donde el brillo del glow aparentaba ser máximo, para este rango el voltaje medido entre los electrodos estaba en el rango de $0-407V$. Mientras que para la segunda medición, se acotó el rango, el cual se encontraba entre $325-383V$, estas mediciones se pueden apreciar en la figura 3 bajo los nombres mediciones 1 y 2, en ellas se puede observar que la brecha entre la columna izquierda y los datos se ve reducida gracias a la segunda medición. Para poder caracterizar el intervalo que va de $0 - 0,4mA$ fue necesario recurrir a otro método ya que el crecimiento abrupto de la corriente no podía ser caracterizado utilizando el método anterior. Para esto, se procedió a variar el voltaje de salida de la fuente de alta tensión mientras que al mismo tiempo se limitaba la corriente de salida, este proceso fue manual, por lo que la cantidad de puntos obtenidos fue menor, pero permitió dar cuenta de una región la cual en la bibliografía consultada, se describía de manera representativa. Cabe destacar que los voltajes de ruptura difieren para las mediciones 1 y 2, $383V$ para la primera y $348V$ para la segunda, una posible explicación a esto puede ser durante la adquisición, de la segunda medición, el gas todavía estaba ionizado, o que el overshoot de la fuente haya tenido alguna implicación.

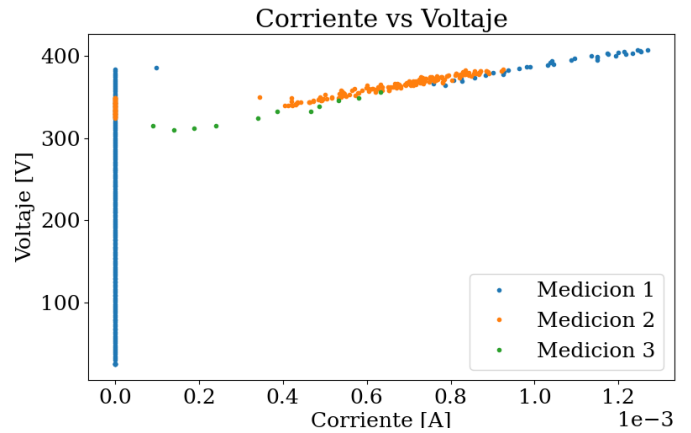


Figura 3. En esta figura se pueden apreciar las 3 mediciones para los distintos rangos, y métodos, en ellas se puede observar que en los intervalos en los que se solapan las mediciones, se observa un comportamiento aparentemente lineal.

Para adquirir los valores de voltaje de la curva de Paschen el control de la fuente fue manual, se setó la fuente en *mon* (el led *rear* tiene que estar apagado). El proceso para registrar los datos fue el siguiente, se partió de un voltaje de salida tal que no se registre corriente en el circuito y se fue aumentando gradualmente hasta observar el salto de corriente, se consideró como voltaje de ruptura el voltaje para el cual la corriente se disparaba. Posteriormente se realizaron 2 ajustes no lineales haciendo uso de la ecuación 2. Tanto las mediciones como los ajustes correspondientes

se ven reflejados en la figura 4, es importante mencionar que la toma de puntos para este experimento fue insuficiente, dado que se tomaron 2 tandas de datos, la que se presenta a presión fija y distancia variable y otra a presión variable y distancia fija, el problema radicó en que las 2 mediciones operan en intervalos similares y dado que no hay una mejora relevante en la información, se decidió utilizar la medición a distancia variable. Otro punto a tener en cuenta es que como se puede observar en el gráfico, se realizaron ajustes por 2 métodos distintos, el primero utilizando el paquete *curve_fit* de la librería *scipy*, el cual utiliza un algoritmo de cuadrados mínimos; este ajuste se puede observar a simple vista que no es el más óptimo dado que la curva se desvía hacia abajo, este motivo aunque importante, no es suficiente para descartar de pleno el ajuste. Siguiendo la línea anterior, y como un argumento más válido, se puede observar que el error en el eje x es mayor que el del eje y, esto llevó a realizar otro tipo de ajuste minimizando la función χ^2 , tomando como input los parámetros a ajustar y los puntos en el eje x; este método, al considerar los puntos en el eje x y mediante el paquete *minimize* de la librería *scipy*, *Optimize* permitió obtener una curva que representa mejor los datos. Para ambos métodos los voltajes de ruptura mínimos se hallaron fueron $V_{rmin_{cf}} = (338,7 \pm 12,7)V$ para el ajuste con *curve_fit* y de $V_{rmin_m} = (348,2 \pm 31,7)V$ para el caso de *minimize*. Con un valor medio de $V_{rmin_{med}} = (343,5 \pm 22,2)V$.

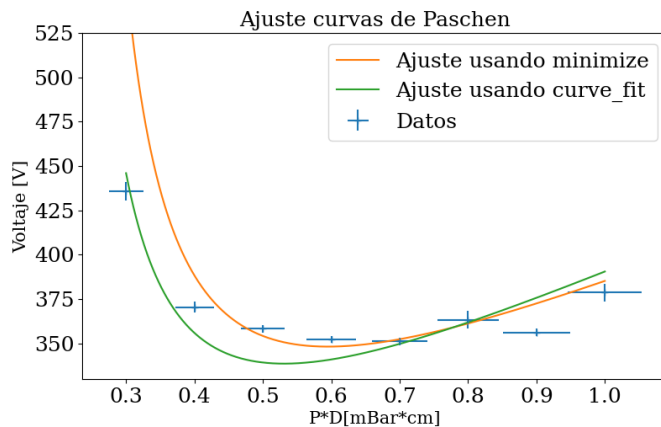


Figura 4. En la figura se pueden apreciar los ajustes correspondientes a los 2 métodos usados, para el caso del ajuste utilizando *minimize*, se observa un comportamiento anómalo en la región izquierda, ya que presenta una diferencia de aproximadamente 100V respecto a los datos, mientras que el ajuste con *curve_fit* pese a no representar en la región derecha de igual manera que el otro método, no presenta este comportamiento.

Conclusiones

Respecto al perfil de voltaje vs corriente, el resultado fue satisfactorio, aunque un punto importante a solventar es la diferencia en voltajes de ruptura para las mediciones 1 y 2.

Debido a un problema técnico. Los datos para armar la curva de histéresis no fueron concluyentes.

Respecto a las curvas de Paschen se puede observar de las mediciones una curva que posee un valor mínimo de voltaje de ruptura para un valor *pd* de acuerdo con la ley de Paschen. Aún así, queda en evidencia la necesidad de

adquirir más datos con distintas combinaciones de *pd* a fin de tener una curva que represente mejor la dependencia del producto de la presión del gas y la distancia entre electrodos. Por otro lado, respecto de la anomalía en la región izquierda con el ajuste de utilizando *minimize*, es posible que se solucione con una toma mayor de datos.

REFERENCIAS

- [1] Scott D.E. Primer on "Gas Discharges"
- [2] Guía descarga Glow, Material de clase.
- [3] Descripción descarga Glow, Material de clase.
- [4] J. F. Cepeda Grimaldosa, A. Sarmiento Santosa, I. Supelano García, Low Pressure Glow Discharge I vs. V Behavior Study, in a DC and Pulsed DC in a Calorimeter Type Reactor.