

Estudio de descargas tipo Glow en aire, helio y argón

G. Bellomo y C. Prudkin Silva

FCEN, Universidad de Buenos Aires
20 de octubre de 2009

Resumen

En este trabajo se intenta caracterizar una descarga Glow en aire a bajas presiones ($10^{-4} - 10^1$ torr). Se hace especial incapié en la relación entre el voltaje interelectródico y la corriente dentro del tubo de descarga, para determinar los potenciales de ruptura (V_t). De allí se obtiene la relación de V_t con el producto entre la presión y la distancia cátodo-ánodo, y de su ajuste por la ley de Paschen se obtienen los valores mínimos, que son contrastados con los tabulados en bibliografías del tema. Los valores resultan del orden de los esperados pero no coinciden, y las discrepancias se atribuyen principalmente a los efectos no considerados en este estudio (como la temperatura del gas o la composición del material del cátodo y su pureza.)

Además, se muestran los resultados del estudio para descargas en Ar y He, las cuales no fueron satisfactorias por las fugas del dispositivo experimental que impidieron estudiar las descargas sin aire en el tubo.

Para el aire, se muestra el efecto de histéresis sobre el potencial de ruptura producido cuando el proceso de descarga se recorre en ambos sentidos: aumentando o disminuyendo la corriente.

I. INTRODUCCIÓN

La *ruptura eléctrica* de distintos gases se logra a través de la aplicación de campos eléctricos suficientemente intensos entre un par cátodo-ánodo. El elemento fundamental del proceso es la *avalancha electrónica*: cuando “electrones semilla” (inyectados artificialmente o provenientes de rayos cósmicos o radiación uv) ganan suficiente energía del campo para acelerarse e ionizar los átomos/moléculas del gas.

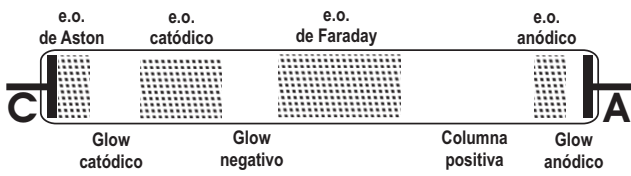


Fig. 1: Esquema de las regiones visualizables durante la descarga Glow (e.o.=espacio oscuro).

En la *descarga Glow* de un gas en un tubo, como resultado del bombardeo iónico sobre un cátodo frío, se distinguen diversas zonas (fig. 1). En la región catódica, se forma una lámina positiva con una considerable caída de tensión ($\sim 100 - 400$ V) llamada caída catódica, y cuyo espesor es inversamente proporcional a la presión del gas. Si la separación interelectródica es lo suficientemente grande, se forma entre el ánodo y la lámina catódica una región de plasma (eléctricamente neutro) con campo eléctrico pequeño, y cuya region central (relativamente homogénea) es llamada columna positiva. Esta columna no es una parte esencial de

la descarga, y se une al ánodo a través de una lámina anódica (negativa). A veces, pueden darse las condiciones para que la lámina catódica ocupe todo el tubo de descarga, y entonces la columna positiva no existe. Si en cambio no existe espacio para que se forme la lámina catódica, la descarga glow no se desarrolla.

Las curvas características V vs. I (tensión interelectródica vs. corriente) están representadas en el esquema de la figura 2.

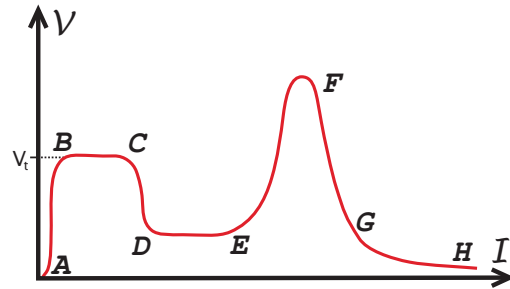


Fig. 2: Esquema de la curva característica V vs. I de una descarga Glow.

Cuando la corriente alcanza valores de $10^{-10} - 10^{-5}$ A el proceso se vuelve autosostenido y el potencial permanece constante, independiente de I (tramo BC). Ese valor del potencial se denomina de ruptura (V_t). En BC la ionización es aún insuficiente para emitir luz visible. Aumentando la corriente, para un dado valor de I el potencial sufre una abrupta caída para luego permanecer constante en todo el régimen de descarga denominado Glow normal (DE). Allí, I crece a medida que la

descarga involucra sectores cada vez más amplios del cátodo, mientras que la densidad de corriente no se altera. Cuando toda el área catódica es cubierta por la descarga, la corriente aumenta a expensas del aumento en V (Glow anormal, EF). Si se aumenta aún más el valor de I , se llega a la región de transición en que la descarga precipita en un arco (FGH).

El umbral de ruptura está determinado por el *potencial de ruptura* –o de *breakdown/ignición*– (V_t) a partir del cual el proceso se torna *autosostenido*, es decir que la corriente generada sigue fluyendo aún en ausencia de una fuente externa. V_t depende del gas, del material del cátodo, de la presión del gas (p) y de la distancia interelectródica (d), y su relación está descrita por la *Ley de Paschen* (ec. 1):

$$V_t(p, d) = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)} \quad (1a)$$

$$C = \ln \left(\frac{A}{\ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right)} \right) \quad (1b)$$

con A y B constantes, y γ un coeficiente denominado *de emisión secundaria* [1].

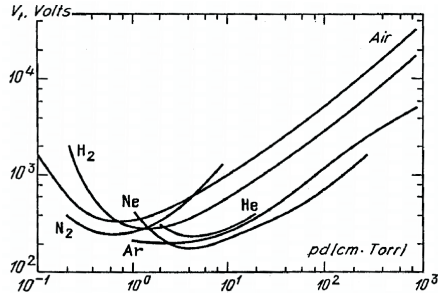


Fig. 3: Curvas de Paschen para algunos gases. [2]

Las curvas de V_t vs. pd se llaman de Paschen (fig. 3). Para cada gas, existe un potencial mínimo de la curva de Paschen $-V_m$ para $pd = (pd)_m$ correspondiente al caso en que los electrones alcanzan la máxima capacidad de ionización. V_m depende además del material del cátodo (tab. 1) [2].

Cátodo \ Gas	Aire	He	Ar	N ₂	O ₂
Al	229	140	100	180	311
Cu	370	177	130	208	—
Fe	269	150	165	215	290

Tab. 1: Valores mínimos de V_t (en V) para las curvas de Paschen de distintos gases y cátodos.

Una vez alcanzado el régimen de descarga autosostenida, la energía necesaria para mantenerla es menor que la necesaria para iniciar la descarga. Esto se traduce en un efecto de histéresis por el cual la descarga se sostiene para valores de corriente y tensión menores que los asociados al valor de ruptura.

En este trabajo, se estudian las etapas de la descarga en aire y su curva de paschen, y se realizan mediciones que permiten observar la histéresis del sistema. Se realizan observaciones acerca de las dificultades en el estudio del mismo proceso para otros gases (He y Ar).

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para esta experiencia haremos uso de un tubo de descarga con electrodos de aluminio, de dos multímetros (Agilent y Hp 34401), un manómetro Pirani (BOC-Edwards), un divisor de tensión, una bomba de vacío y una fuente de alta tensión. Los multímetros se conectan a una pc donde, a través de un programa creado en Labview, se registran V e I en función del tiempo. El divisor de tensión permite medir la alta tensión interelectródica con uno de los multímetros y la corriente interelectródica con el otro (fig. 4).

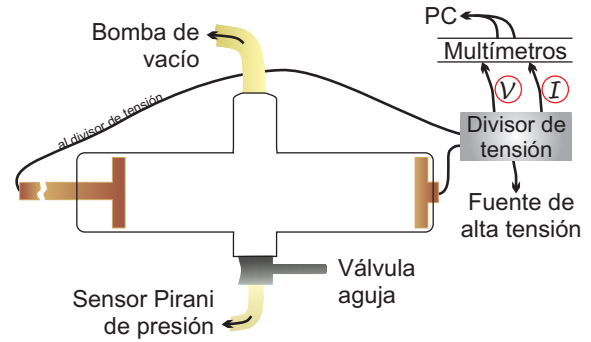


Fig. 4: Dispositivo experimental empleado para estudiar las descargas.

La experiencia requiere la constancia de la p a lo largo de cada medición. Para lograrlo, las fugas del dispositivo obligaron a mantener encendida la bomba de vacío constantemente. El tubo de descarga posee adjunta una válvula aguja que permite regular el flujo, de modo que para cierta apertura de la válvula el flujo alcanza un régimen estacionario a una presión dada. Para aperturas menores/mayores, el sistema se estabiliza a una presión menor/mayor.

La fuente de tensión permite regular la tensión externa aplicada a los electrodos para así iniciar la descarga y luego, variando manualmente el aumento de esta tensión, se modifica la corriente para estudiar su dependencia con la tensión interelectródica.

Se registraron los valores de V vs. I para el aire, para distintas presiones y distancias ánodo-cátodo. Se trazaron las curvas V vs. I y de allí se obtuvieron los valores de V_t . Las mismas mediciones se realizaron para He y Ar, incorporando al dispositivo experimental un globo lleno del gas en cuestión a la boca de salida de la válvula aguja.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las curvas de V vs. I se evidencia una primera zona, donde la corriente es despreciable ($\sim 10^{-7}$ mA), que termina al producirse un salto abrupto en V . Allí comienza la segunda región, donde V e I aumentan de manera progresiva (fig. 5). Identificamos la segunda región como la de descarga Glow normal (ver fig. 2), y el promedio de los valores de tensión en el salto entre regiones como la tensión de breakdown (V_t).

De los valores de V_t para diversas presiones y distancias entre electrodos se obtiene la curva de Paschen para el aire (fig. 6).

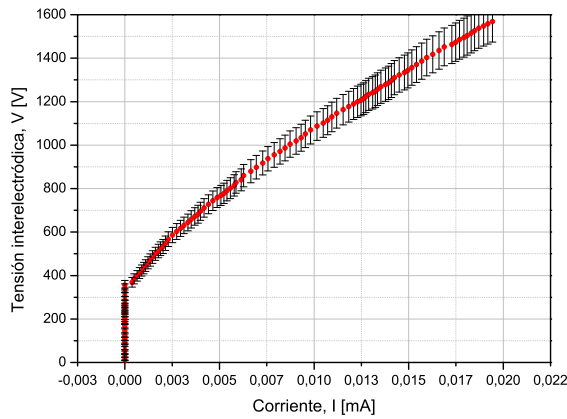


Fig. 5: Curva característica de la descarga en aire, para $d = 35$ mm y $p = 0,17$ torr.

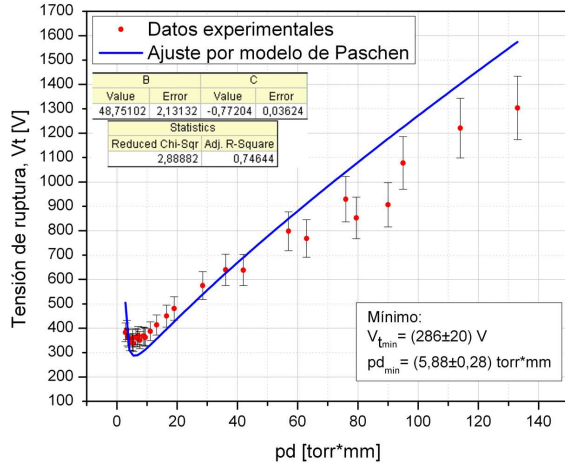


Fig. 6: Curva de Paschen obtenida de las mediciones de descargas en aire. Ajuste por la Ley de Paschen (ec. 1).

Los datos experimentales se ajustan por el modelo propuesto por la Ley de Paschen (ec. 1). Del ajuste, se calcula el valor mínimo de la curva resultando: $V_m = (286 \pm 20)$ V y $(pd)_m = (5,88 \pm 0,28)$ torr*mm. Estos valores no coinciden con los tabulados en [2]: $V_m = 229$ V y $(pd)_m = 2,5$ torr*mm, con los cuales difieren en un 15 % y un 75 %, respectivamente. Sin embargo, la variabilidad de éstos con la temperatura

del gas y el material del cátodo hace que los diversos valores tabulados en las bibliografías sean muy distintos.

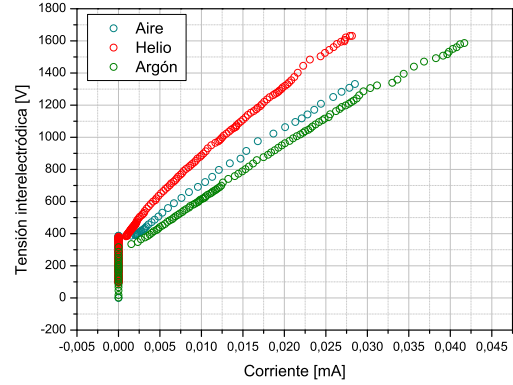


Fig. 7: Gráficos de V vs. I para aire, He y Ar; $p = 0,7$ torr y $d = 15$ mm.

Repetiendo las mediciones y cálculos para las experiencias con He y Ar se obtuvieron curvas características que diferían en general respecto de las registradas para el aire a iguales p y d (fig. 7).

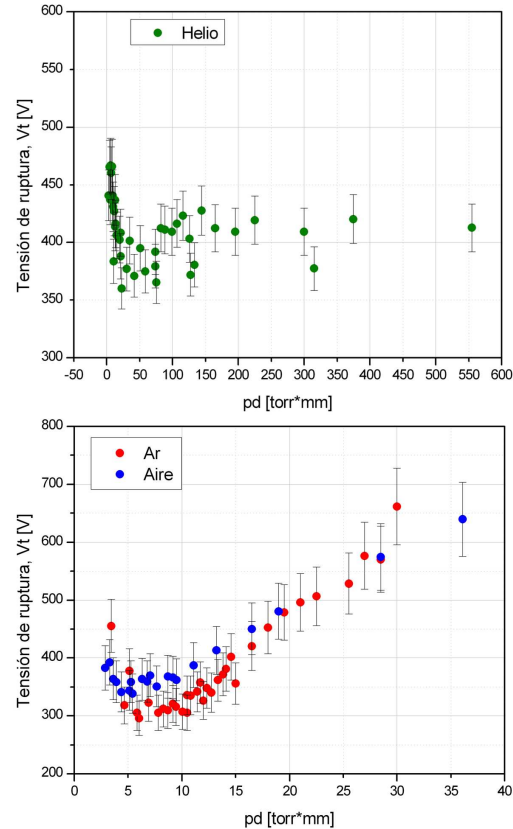


Fig. 8: Gráficos de V_t vs. pd para He, Ar y aire.

Al graficar V_t vs pd para He (fig. 8) no se obtuvo algo coherente con el modelo de Paschen ni con los valores tabulados para V_t (ver tab. 1). Para el Ar, los datos experimentales podrían ajustarse por el modelo

de Paschen, pero la observación de la curva en comparación con la del aire hace evidente que las mediciones no concuerdan con lo esperado. En ambos casos (Ar y He), el valor mínimo de V_t es muy cercano al obtenido para el aire (~ 300 V), aunque se espera que sean de aproximadamente 100 V (ver tab. 1).

De la observación de los gráficos de V_t vs. pd puede inferirse que las descargas no se produjeron en Ar o en He puros sino en una mezcla de éste con aire, predominando éste último. Ello explicaría la similitud entre las curvas de aire y Ar, y los valores también similares de tensión mínima de ruptura entre el He y los anteriores.

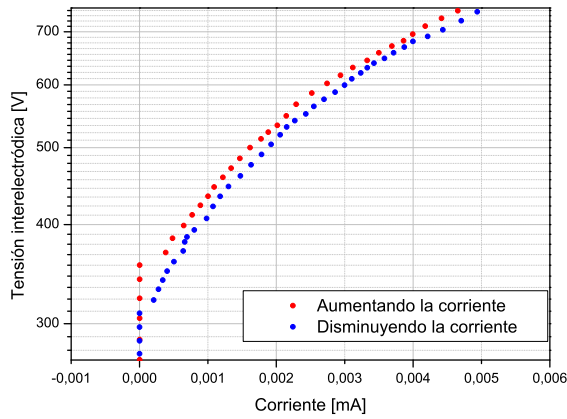


Fig. 9: Histéresis en la curva característica del aire ($p = 0,17$ torr y $d = 35$ mm).

Para valores grandes de pd (≥ 100 torr*mm, hasta ~ 600 torr*mm), el He exhibe un comportamiento extraño: V_t fluctúa en torno a los 400 V, sugiriendo que la proporción aire-He dependía de la presión del sistema.

En resumen, la descarga no se efectuaría sobre un único gas sino sobre una mezcla, haciendo muy difícil su estudio, considerando además que las proporciones de la mezcla no son constantes.

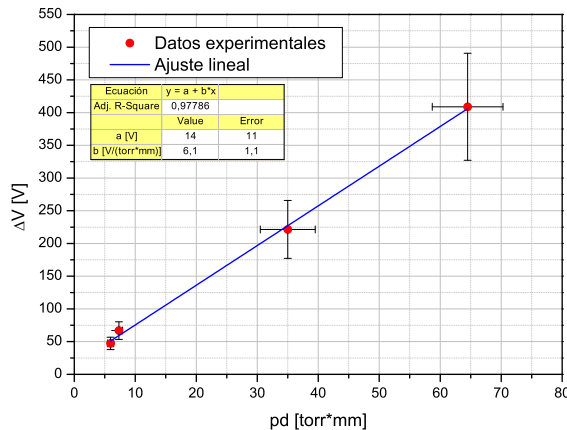


Fig. 10: Gráfico y regresión lineal de ΔV vs. pd para el aire.

En la figura 9 se puede observar el efecto de histéresis en aire al recorrer la curva V vs. I en ambos sentidos. Con el fin de estudiar la relación entre este efecto y los

parámetros del sistema, se graficó la diferencia entre los valores de tensiones de ruptura de ida y vuelta (ΔV) vs. pd (fig. 10). Dada la tendencia lineal observada, se realizó un regresión lineal de los datos obteniéndose un factor $R^2 = 0,97786$ en el rango de pd de 6 – 65 torr*mm.

La tendencia lineal de ΔV en el rango estudiado se adjudica en parte a la tendencia (también lineal) observada en ese rango para V_t (ver fig. 6).

IV. CONCLUSIONES

Se registraron satisfactoriamente las curvas V vs. I que corresponden a la fase de descarga Glow en aire. Los valores de corriente y tensión (externa) empleados no permitieron, sin embargo, la observación de la totalidad de las etapas de la descarga. La variación manual de los valores de tensión externa dificultó el ajuste fino necesario para observar en detalle el entorno de la tensión umbral. Para $V \geq V_t$ el potencial resultó monótonamente creciente, aunque el modelo indica que debe ser constante hasta alcanzar la etapa de descarga Glow anormal. De todas maneras, observando que la superficie cubierta por la descarga sobre el cátodo aumentaba progresivamente luego de producirse la ruptura, asociamos lo visto a la etapa de Glow normal. No se logró dar una interpretación física teórica a este efecto donde se combinan tanto el incremento en V como el aumento de la sección superficial del cátodo involucrada en el proceso, ambos progresivos.

Los valores de V_t para el aire se ajustaron por la ley de Paschen obteniendo $V_m = (286 \pm 20)$ V y $(pd)_m = (5,88 \pm 0,28)$ torr*mm, valores que no coinciden con los tabulados en [2]. Cabe mencionar que éstos dependen del material del cátodo y de la temperatura del gas, y que entonces se observan valores muy dispares en las distintas bibliografías. Por ejemplo, en [3] los valores tabulados para el aire son $V_m = 327$ V y $(pd)_m = 5,7$ torr*mm, que se asemejan mucho más a los obtenidos.

De las curvas Paschen obtenidas para He y Ar se determinó que el dispositivo experimental utilizado no presentaba las condiciones necesarias para el uso de gases distintos al aire, siendo que la similitud entre las curvas muestra que las mediciones no se realizaron sobre He o Ar puros sino contaminados por el aire que ingresaba al tubo por su falta de hermeticidad. Aconsejamos para futuras prácticas una mejora sustancial en la calidad del sellado de todas sus partes. Probablemente, un adecuado estudio teórico de las descargas en una mezcla de gases conllevaría a la correcta interpretación de los resultados, pero dicho análisis excede los objetivos del presente trabajo. Se esperaría también que un análisis espectroscópico de las emisiones durante las descargas trabajadas con He y Ar permitiera determinar cuáles son en verdad los gases predominantes

en el sistema, tarea que queda pendiente para futuras mediciones.

En el estudio del efecto de histéresis en el potencial de ruptura para el aire, en el rango de pd de 6 – 65 torr*mm (para $d \sim 30$ mm), se evaluó la amplitud ΔV del salto en V_t en función de pd . La relación presentó una tendencia lineal. En la curva de Paschen obtenida para el aire (fig. 6) se observa que en el rango pd evaluado las descargas están por sobre el valor mínimo de V_t , y a partir de allí V_t aumenta progresivamente con pd . Esto explicaría el carácter creciente de ΔV vs. pd , pero la tendencia lineal en un rango tan amplio de pd no se deduce directamente de ello. Mediciones de ΔV para valores de pd por debajo de $(pd)_m$ otorgarían una ayuda en la interpretación de este efecto.

REFERENCIAS

- [1] Se trata del número neto de electrones secundarios producidos por partícula incidente (ion positivo, fotón, partícula excitada o metaestable).
- [2] H. Kelly, *Curso de descargas en gases (caps. 4 y 5)*, <http://www.lfp.uba.ar/new/notas.html>, Instituto de Física del Plasma, FCEN, UBA.
- [3] *High Voltage Experimenter's Handbook*, <http://home.earthlink.net/~jimlux/hv/hvmain.htm>.