

## Potencial de Ionización

Amaro Colín Alan Gabriel

alan.amaro@ciencias.unam.mx

---

### Resumen

Este trabajo presenta una propuesta experimental para la caracterización del primer potencial de ionización de un gas dentro de un bulbo de vacío 2D21. Se describe el fenómeno físico de ionización de gases, donde un campo eléctrico provoca la liberación de electrones, y el estudio se basa en la medición del flujo de corriente a través de dicho gas. Utilizando la ley de Langmuir-Child, se modela el comportamiento de la corriente hasta alcanzar el voltaje de ruptura, momento en que el gas comienza a ionizarse. Los datos experimentales obtenidos permiten calcular una constante de proporcionalidad y el voltaje de ruptura, así como el potencial de ionización, identificado como  $12,227 \pm 0,9\%$  V. Este valor concuerda con el potencial de ionización del xenón, lo que sugiere que el gas contenido en el bulbo corresponde a este elemento. Los resultados están en concordancia con los valores reportados en la literatura, validando la metodología empleada.

**Palabras clave:** potencial, ionización, bulbo, Langmuir, Child.

### Abstract

This paper presents an experimental proposal for the characterization of the first ionization potential of a gas inside a 2D21 vacuum tube. The physical phenomenon of gas ionization is described, where an electric field causes the release of electrons, and the study is based on the measurement of current flow through the gas. Using the Langmuir-Child law, the behavior of the current is modeled until the breakdown voltage is reached, at which point the gas begins to ionize. The experimental data obtained allow for the calculation of a proportionality constant and the breakdown voltage, as well as the ionization potential, identified as  $12,227 \pm 0,9\%$  V. This value matches the ionization potential of xenon, suggesting that the gas contained in the tube corresponds to this element. The results are consistent with values reported in the literature, validating the methodology employed.

**Keywords:** ionization, potential, vacuum, tube, Langmuir, Child.

---

## 1. Introducción

En las ciencias físicas y químicas el entendimiento de las propiedades de la materia es fundamental, dado que permite el avance tecnológico en aplicaciones de uso inmediato. Una de las tecnologías fundamentales del siglo XXI corresponde al diodo, este dispositivo electrónico se compone a partir de dos juntas semi-conductoras que, a determinado voltaje, permiten el flujo de cargas.

El tener un componente electrónico que permita el flujo de cargas a partir de una señal eléctrica es

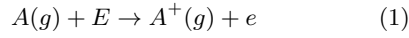
pieza clave en el desarrollo tecnológico, dado que nos permite tener una señal definida de ceros y unos, pieza clave en el desarrollo de la programación a partir de la lógica booleana y el trabajo de Alan Turing<sup>4</sup> en la computación moderna.

Previo al diseño del diodo se incorporaba un *pre-diodo* denominado como bulbo de vacío. Este contenía en su interior un par de placas junto con un gas a baja presión que a determinada diferencia de potencial entre las placas permitía el flujo de cargas mediante la ionización del gas en su interior.

El entendimiento del fenómeno físico que llevó

al desarrollo del bulbo es el tema de estudio que reportamos en este trabajo. Al fenómeno de liberación de cargas en un gas a partir de la interacción con un campo eléctrico generado por una diferencia de potencial en las placas se le conoce como *ionización del gas*, y el voltaje mínimo al cual se ioniza el gas se denomina **primer potencial de ionización**.

El potencial de ionización corresponde a la energía mínima, reportada en eV o  $kJ/mol$ , que debe aplicarse un átomo o molécula en su estado base y gaseoso para removerle un electrón, convirtiendo al elemento o molécula en un ion positivo. Al considerar un átomo en su estado fundamental, podemos representar este fenómeno por medio de la expresión:



Donde  $A(g)$  representa el átomo en estado gaseoso,  $E$  representa a la energía,  $A^+$  a su estado como ion positivo y  $e$  a un electrón. El potencial de ionización está altamente relacionado con la reactividad química del elemento en cuestión, esto dado que a un menor potencial de ionización se requiere menos energía aplicada sobre el elemento para hacerlo reaccionar con otro.

La ley de Langmuir-Child describe el flujo de cargas a partir de la diferencia de voltaje en un gas. Esta ley considera el tamaño finito de las placas y la baja presión del gas.

$$J = \left[ \frac{4\epsilon_0}{9d^2} \left( \frac{-2q}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \right] V^{\frac{3}{2}} \rightarrow I = kV^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Esta ley modela correctamente el flujo de cargas hasta alcanzado un *voltaje de ruptura*, en este voltaje el gas al interior comienza a ionizarse, provocando un compartimiento no lineal al interior del bulbo.

A su vez, dentro del bulbo de vacío se da un efecto conocido como *carga espacial*, este corresponde a la acumulación de electrones en el ánodo. Conforme los electrones se acumulan ejercen un campo eléctrico repulsivo que limita el flujo de los electrones.

Experimentalmente, conforme variamos el voltaje, la corriente estará descrita por la expresión de Langmuir hasta alcanzar el voltaje de ruptura. A partir de dicho voltaje la corriente presentará un comportamiento no lineal hasta alcanzar un máximo. El potencial a partir del cual se observe un máximo en la corriente corresponde al potencial de ionización.

A partir de lo anterior, en este trabajo presentamos una propuesta experimental para la caracterización de un gas al interior de un bulbo 2D21 por medio de la obtención de su primer potencial de ionización, a su vez presentamos los resultados correspondientes a las aproximaciones a la expresión de Langmuir y el voltaje de ruptura.

## 2. Metodología

Para la caracterización del potencial de ionización empleamos una tabla de conexiones (Fig 1) que contiene al bulbo 2D21 (Información completa en relación al material empleado puede consultarse en la sección suplementaria S2[6.2]).



Figura 1: Tabla de conexiones empleada.

Este bulbo soporta voltajes de hasta 650 V de corriente directa, lo que lo hace ideal para la medición de los potenciales de ionización. Además de la incorporación de un filamento resistente a las altas temperaturas que permiten la obtención de electrones por medio de la emisión termo-iónica, e incorpora una serie de rejillas que permiten la reducción de la carga espacial, tal como se mencionó en la introducción, la carga espacial puede limitar el flujo de cargas dando lugar a una medición incorrecta del potencial de ionización. El montaje experimental empleado es mostrado en la figura 2, en la figura 3 presentamos el diagrama de conexiones.

## Laboratorio de Física Contemporánea II

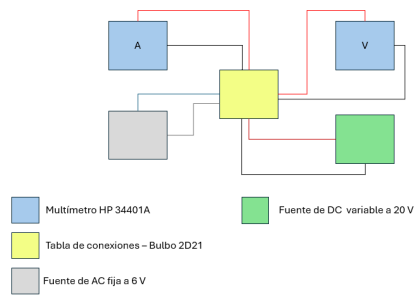


Figura 2: Ilustración de la interconexión de los elementos empleados

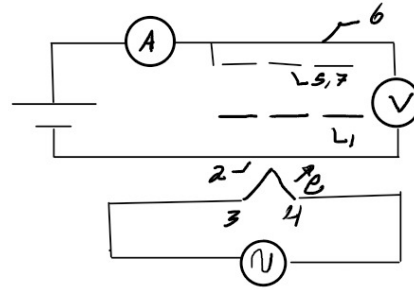


Figura 3: Diagramas de conexiones

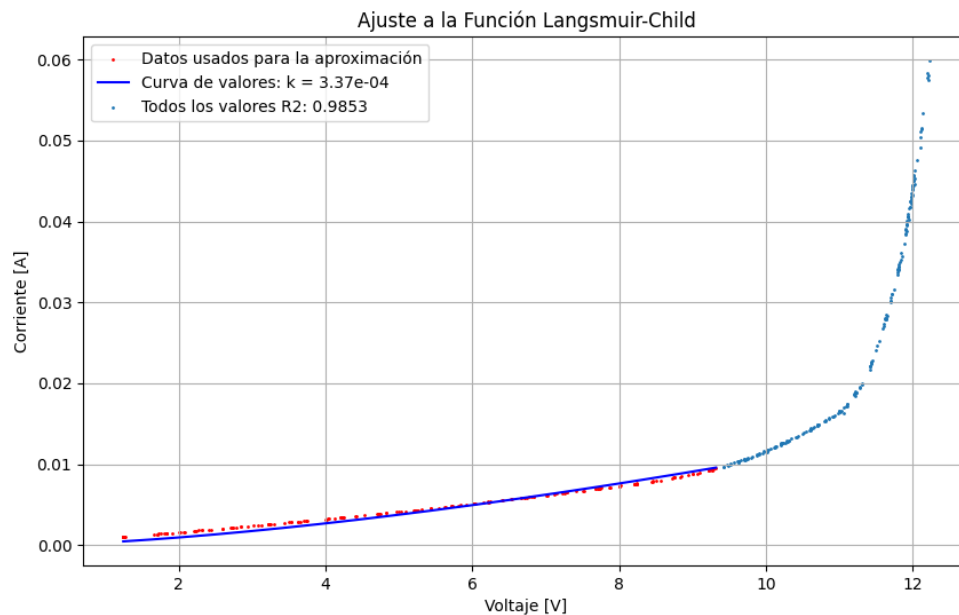


Figura 4: Ajuste de los datos experimentales a la función de Langmuir-Child.

Como puede observarse, en las rejillas 3,4 conectamos la fuente de corriente alterna. Entre las rejillas 6 y 2 establecemos nuestra diferencia de potencial. Para reducir los efectos de la carga espacial establecemos la segunda rejilla (5,7) al mismo potencial del ánodo, esto con el propósito de que la carga espacial se acumula en la rejilla, evitando así su asentamiento en el ánodo.

Finalmente agregamos el amperímetro en serie entre la fuente de corriente directa y la terminal 6. Agregamos el voltímetro en paralelo entre los pines 6 y 2. Consideramos importante mencionar que para la realización de este experimento no se requirió de calibración inicial de instrumentos empleados.

Realizado el montaje, encendemos la fuente de corriente alterna, el tiempo requerido para la emi-

sión termo-iónica puede variar acorde al modelo del bulbo empleado, en nuestro caso corresponde a 10 segundos.<sup>3</sup> Establecemos la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo, y recabamos para cada potencial la corriente correspondiente.

Acorde a la teoría, al alcanzar el potencial de ionización deberíamos observar un pico en la corriente. Experimentalmente esto corresponde a un *cortocircuito* por el alto flujo de cargas, los multímetros empleados poseen un sistema de protección ante un corto. Durante la realización del experimento observamos este sistema de protección e, inmediatamente, una caída en el valor del potencial como indicativo del sistema.

## 3. Resultados

Los resultados recabados de voltaje y corriente son de acceso público y pueden consultarse libremente en la sección de información suplementaria S1[6.1] y S2[6.2]. En la figura 4 presentamos todos los valores obtenidos de voltaje y la corriente correspondiente. Una gráfica con las incertidumbres asociadas es presentada en la sección S1.

Nuestros datos [6.1] sugieren que hasta el potencial de  $9,321 \pm 0,9\%$  V nuestros datos presentan una alta correlación del 0,985 a la función de Langmuir-Child para una constante  $k = 3,37e - 4$ . Superado dicho potencial la corriente ya no es modelada por la función propuesta y comienza a aumentar hasta alcanzar un valor máximo a  $12,227 \pm 0,9\%$ . Es este potencial que se observó el sistema de protección de los multímetros empleados junto con una caída del potencial.

## 4. Discusión

Acorde a la teoría,<sup>2</sup> el potencial de ionización corresponde al voltaje en el cual se observa un pico en la corriente correspondiente a la ionización del gas. En el interior del bulbo el fenómeno físico corresponde a que, dado el bombardeo de los electrones por parte del emisor, dichos electrones poseen la energía suficiente para arrancar los electrones de las capas externas de los átomos del gas a baja presión por medio del campo eléctrico aplicado. Al arrancar estos electrones se obtiene un incremento en el flujo de las cargas. Esto es observado como un pico de corriente.

El tubo 2D21 es usualmente fabricado en masa con los gases:<sup>1</sup> Vapor de mercurio, xenón, neón e hidrógeno, cuyos potenciales de ionización son presentados en la sección 6.3. Nuestros resultados sugieren que la gráfica 4 sigue la ley de Langmuir para una expresión de la forma:

$$I = kV^{\frac{3}{2}} \quad k = 3,37e - 4 \quad (3)$$

El voltaje de ruptura corresponde a  $V_R = 9,321 \pm 0,9\%$ . Y el valor para el potencial de ionización correspondiente al pico de la corriente posee un valor de  $V_i = 12,227 \pm 0,9\%$ .

De los cuales el potencial de ionización más cercano a nuestro valor obtenido corresponde al del xenón<sup>5</sup> con 12,130 eV. Esto implica un error en la medición del 0,8%, el cual satisface estar dentro del rango de nuestra incertidumbre. De tal manera que denominamos al gas al interior del tubo 2D21 empleado como Xenón.

## 5. Conclusión

El potencial de ionización es un concepto fuertemente relacionado con el avance tecnológico de las últimas décadas, la caracterización del voltaje a partir del cual un gas permite un alto flujo de cargas fue pieza clave para el diseño de las primeras computadoras. En este trabajo presentamos un método para la caracterización del gas, voltaje de ruptura, obtención de constante  $k$  e intervalo de aplicación para ley Langmuir-Child junto con la obtención del potencial de ionización para un gas a baja presión dentro del bulbo 2D21.

Nuestros resultados sugieren que el gas al interior del tubo empleado corresponde a xenón con un valor de  $12,227 \pm 0,9\%V$ . Dicho valor se encuentra dentro del reportando en la literatura.

## 6. Información suplementaria

### 6.1. S1

La información completa de las mediciones obtenidas, su incertidumbre total y relativa. Así como las gráficas correspondientes puede consultarse en el siguiente documento:

Información Suplementaria I

## 6.2. S2

La información completa en relación al material empleado junto con sus incertidumbres puede consultarse en el siguiente documento:

Información Suplementaria II

## 6.3. S3

En esta sección presentamos los valores del primer potencial de ionización para los gases más comúnmente usados en la fabricación del tubo 2D21.

Elemento	Potencial de Ionización (eV)
Vapor de Mercurio	10.4
Xenón	12.13
Neón	21.56
Hidrógeno	13.60

Cuadro 1: Potenciales de Ionización de Diversos Gases

## Referencias

- [1] Academia Lab. Tiratrón. *Enciclopedia*, September 2024. Revisado el 24 de septiembre del 2024.
- [2] Laboratorio de Física Contemporánea II. Manual del potencial de ionización. *Nombre de la Revista*, 2024.
- [3] General Electric Company. *Thyratron for Relay and Grid-Controlled Rectifier Applications: 7-Pin Miniature Inert-Gas Tube*. General Electric Company, January 1957. 2D21 Thyratron Manual.
- [4] Wikipedia. Alan turing — wikipedia, la enciclopedia libre, 2024. [Internet; descargado 5-septiembre-2024].
- [5] Wikipedia. Xenón — wikipedia, la enciclopedia libre, 2024. [Internet; descargado 11-agosto-2024].