

# Estudio de la temperatura electrónica del plasma de Argón tipo *DC Glow Discharge* con respecto a la presión y el voltaje de descarga

Electronic temperature study for a *DC Glow Discharge* Argon Plasma in different pressures and discharge voltages

Federico Coto-Vílchez<sup>1</sup>

---

Coto-Vílchez, F. Estudio de la temperatura electrónica del plasma de Argón tipo *DC Glow Discharge* con respecto a la presión y el voltaje de descarga. *Tecnología en Marcha*. Edición especial. Movilidad Estudiantil 6, 2019. Pág 172-179.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v32i8.4991>

<sup>1</sup> Estudiante de Física e Ingeniería Física. Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: f.cotovilchez@gmail.com



## Palabras clave

Plasma; descarga en corriente continua; espectroscopia óptica; temperatura electrónica.

## Resumen

Se presenta el estudio del comportamiento de la temperatura electrónica del plasma DC de Argón con respecto a la presión y el voltaje de descarga. La temperatura se obtuvo por medio del diagnóstico de espectroscopia óptica y el modelo de estado coronal para condiciones estables. Los resultados obtenidos presentan un comportamiento con respecto a la variación de las condiciones distinto al esperado.

## Keywords

Plasma; glow discharge; optical spectroscopy; electronic temperature.

## Abstract

The results of the study of the electronic temperature variation with the pressure and the discharge voltage in a DC argon plasma are shown. This temperature was obtained using the optical spectrometry diagnostic and the steady state coronal model. The obtained results show a behavior that differs with the expectations.

## Introducción

Un plasma puede definirse como un gas cuasineutro, formado por partículas neutras y cargadas con comportamiento colectivo. Es el estado de la materia conocida más abundante en el universo [1]. Los plasmas tienen múltiples aplicaciones en campos como la industria, la salud y la generación energética. Conocer sus características es importante en algunas de estas aplicaciones, por lo que es necesario recurrir a diagnósticos.

Existen muchos tipos de diagnósticos para determinar las características del plasma. Algunos tipos son: por mediciones de campos magnéticos, por flujos de partículas, emisiones electromagnéticas, entre otros [2].

El espectrómetro óptico es un diagnóstico del tipo de emisiones electromagnéticas que detecta la radiación visible emitida por transiciones electrónicas [3]. Para este caso se determinó la temperatura utilizando el espectrómetro óptico de configuración Czerny-Turner. Este espectrómetro consta de dos espejos y una rejilla de difracción que descomponen la luz para analizar las longitudes de onda presentes [3].

Una ventaja del espectrómetro respecto a otros diagnósticos es que es un método no intrusivo, por lo que no modifica las condiciones del plasma [3] y [4]. Además, los campos eléctricos, magnéticos y la presencia de radiofrecuencia no interfiere en el proceso de adquisición de datos [3].

Las descargas de plasma *DC Glow Discharge* se producen al aplicar una diferencia de potencial entre dos electrodos en un gas [5]. Para este caso, el electrodo positivo es un pin al que se le aplica el voltaje y el negativo es la cámara de vacío que está conectada a tierra.

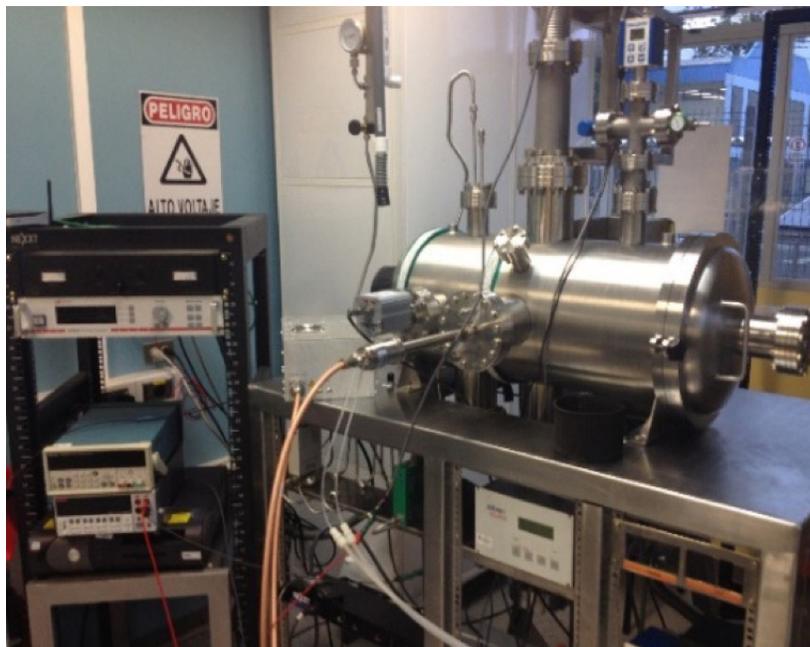
Las características del plasma pueden variar según la presión de trabajo o el voltaje de descarga. En este trabajo se pretende determinar la dependencia de la temperatura con los parámetros de descarga para plasmas de esta clase.

## Metodología

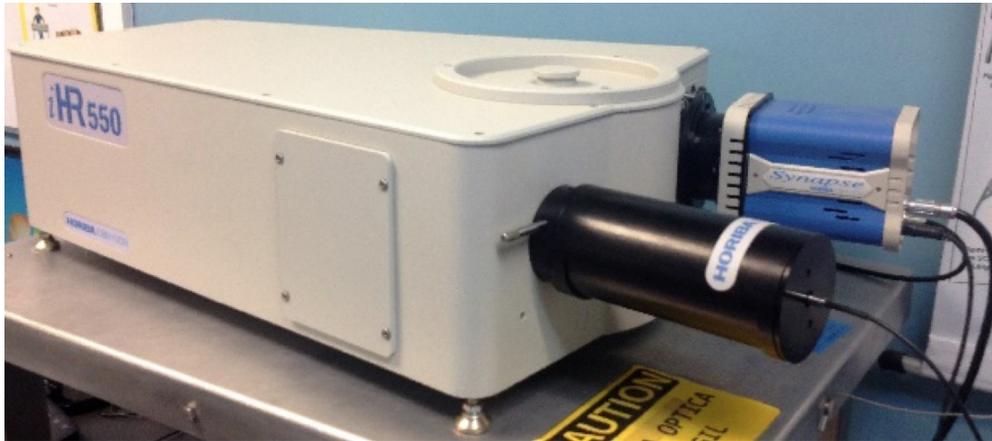
Los plasmas estudiados fueron producidos en la cámara de vacío del Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. En esta cámara, mostrada en la figura 1, se produce alto vacío (se alcanzan presiones en el orden de  $10^{-6}$ Torr) y donde luego se inyecta el gas. El gas utilizado en este estudio es argón. Dentro de la cámara se encuentra un pin de acero inoxidable al cual se le aplica una diferencia de potencial con respecto al cuerpo de la cámara que ioniza el gas y produce el plasma.

Una vez producido el plasma, la radiación visible emitida se analizó con el espectrómetro Horiba iHR 550 y un detector Synapse CCD, mostrados en la figura 2. Se conectó al espectrómetro una fibra óptica cuyo extremo se colocó en una ventana de cuarzo de la cámara cilíndrica para captar la luz emitida por el plasma.

Para disminuir el ruido en las mediciones producto de la luz del ambiente, se cubrieron todas las ventanas de la cámara al realizar las mediciones. Los espectros obtenidos se procesaron en el software Synergy V3.5.



**Figura 1.** Cámara cilíndrica de vacío.

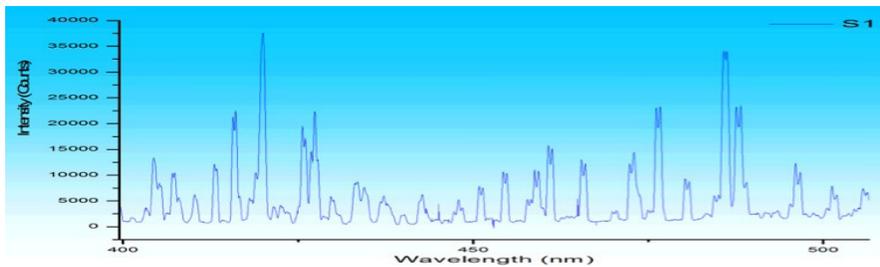


**Figura 2.** Espectrómetro Horiba iHR 550.

## Resultados

Se obtuvieron espectros de emisión del plasma en el intervalo de 400nm a 500nm. Se estudió el rango de presiones entre 25mTorr y 100mTorr, midiendo cada 5mTorr y voltajes de descarga entre 0,5kV y 3,0kV, midiendo cada 0,5kV. Por lo tanto, se obtuvieron los espectros de plasmas en combinaciones de 16 presiones y 6 voltajes, para un total de 96 mediciones bajo distintas condiciones.

Los espectros obtenidos son similares al mostrado en la figura 3. De los picos de emisión que se muestran en la figura 3 se eligieron 5 longitudes de onda, 2 del estado base y 3 del primer estado de ionización.



**Figura 3** Espectro de emisión de Plasma de Ar de 400nm a 500nm

Las temperaturas se calcularon utilizando el modelo de estado coronal para condiciones estables, válido para plasmas de baja densidad, y con el cual se determina la temperatura utilizando dos líneas de emisión del plasma [6]. De acuerdo con este modelo, se tiene que:

$$\frac{I'}{I} = \frac{f'g'\lambda^3}{fg\lambda'^3} \exp\left(\frac{E'\infty - E' - E\infty + E}{kT_e}\right) \frac{S}{\alpha} \quad (1)$$

Donde

$$\frac{\alpha}{S} = (7,87 \times 10^{-9}) E'_{\infty}{}^2 \left( \frac{E'_{\infty}}{kT_e} \right)^{\frac{3}{4}} \exp \left( \frac{E'_{\infty}}{kT_e} \right) \quad (2)$$

$I$ : intensidad de la línea escogida

$f$ : intensidad del oscilador

$g$ : degeneración del nivel de energía superior para la transición

$\lambda$ : longitud de onda

$E$ : energía de excitación

$E_{\infty}$ : energía de ionización

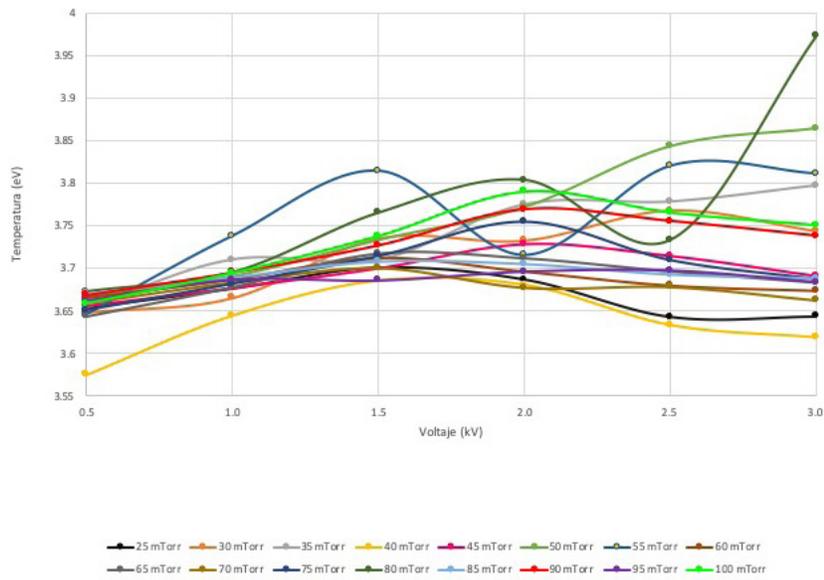
Las variables primadas corresponden a las cantidades asociadas a la segunda línea escogida [6]. Las longitudes de onda utilizadas se resumen en el cuadro 1, junto a las cantidades asociadas que se obtuvieron del National Institute of Standards and Technology (NIST) [7].

Como se puede observar, la temperatura electrónica no puede despejarse de la ecuación 1, por lo que no es posible calcularla directamente. Por eso, se utilizó el método de bisección para encontrar la temperatura para la cual la parte derecha de la ecuación se iguala a la parte izquierda.

Para reducir posibles errores, es necesario utilizar pares de líneas con diferencia de energía grande [6]. Una forma de lograrlo es usar longitudes de onda de diferentes estados de ionización. Las temperaturas se calcularon asignándole a las  $I'$  los valores de las longitudes del estado base y a las  $I$  los del primer estado de ionización. Para tener un mejor resultado, se promediaron las temperaturas obtenidas de diferentes parejas de picos para las mismas condiciones.

**Cuadro 1.** Constantes para los picos de radiación estudiados

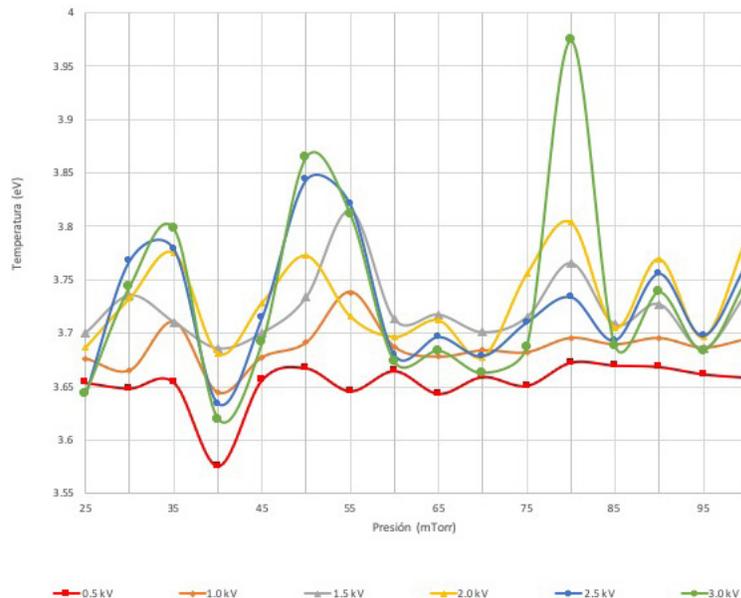
Estado	$\lambda$ (nm)	g	f	E(eV)	$E_{\infty}$ (eV)
Ar I	415,8590	5	3,63E-03	14,5289	15,7596
Ar I	425,9362	1	3,61E-03	14,7381	15,7596
Ar II	434,8064	8	4,43E-01	19,4945	27,6209
Ar II	476,4864	4	4,40E-01	19,8672	27,6209
Ar II	487,9863	6	4,41E-01	19,6800	27,6209



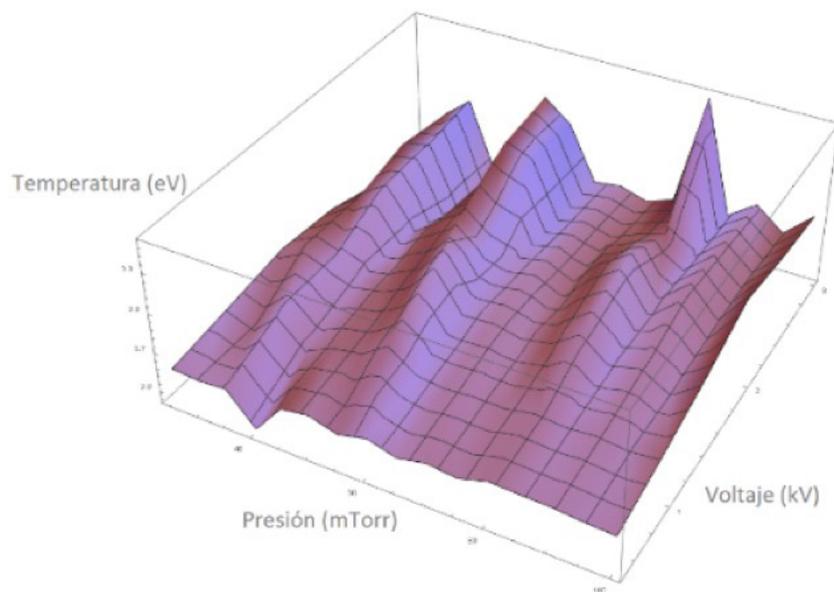
**Figura 4.** Temperatura electrónica en función del voltaje de descarga.

A partir de las mediciones se puede analizar la dependencia que existe entre la temperatura electrónica del plasma y las condiciones de la descarga, en este caso la presión y el voltaje. En las figuras 4, 5 y 6 se muestran las temperaturas obtenidas para todas las condiciones estudiadas.

La figura 4 muestra la dependencia de la temperatura con respecto al voltaje de descarga para las presiones utilizadas. Por su parte, en la figura 5 se observa la dependencia de la temperatura con la presión para los diferentes voltajes de descarga. La figura 6 resume todas las 96 temperaturas obtenidas en función de las condiciones de descarga. Aunque las tres figuras contienen la misma información, se incluyen para mostrar con mayor claridad el comportamiento de la temperatura electrónica del plasma.



**Figura 5.** Temperatura electrónica en función de la presión en la cámara.



**Figura 6.** Temperatura electrónica en función de la presión y el voltaje de descarga.

## Discusión

Las temperaturas calculadas se encuentran entre los 3,545eV y los 3,974eV. Estas magnitudes son consistentes con lo esperado y cercanas a resultados obtenidos previamente [8].

Los resultados de temperatura obtenidos a presiones constantes (figura 4) muestran en general un comportamiento ascendente desde los 0,5 kV hasta los 2 kV en la mayoría de los casos. Al aumentar el voltaje por encima de los 2kV, las temperaturas disminuyen para casi todas las presiones estudiadas. Esta disminución de las temperaturas resulta contra intuitiva, pues no se espera que al aumentar el campo eléctrico se disminuya la energía de los electrones y, por lo tanto, su temperatura.

Con voltajes constantes, se puede observar que se presentan fluctuaciones en la temperatura al variar la presión. Estas fluctuaciones se observan en la figura 5. Es notorio que la variación de la temperatura se comporta de manera similar en los diferentes casos, sobre todo para voltajes mayores o iguales a 1,5kV, en los que hay máximos locales en 35mTorr, 50mTorr, 80mTorr y 90mTorr; mientras que hay mínimos en 40mTorr, 65mTorr, 85mTorr y 95mTorr.

Se puede notar que las diferencias entre las temperaturas para un mismo voltaje son mayores en los voltajes más altos que en los más bajos. Esta tendencia se observa claramente en la figura 6.

Nuevamente los resultados no coinciden con lo esperado, pues se espera que la temperatura electrónica disminuya con el aumento de la presión. Esto porque la temperatura es proporcional al camino libre medio de los electrones libres [6]. Al aumentar la presión, aumenta la densidad y disminuye el camino libre medio.

Aunque los valores de temperatura fluctúan, lo hacen alrededor de un valor central de temperatura que se mantiene relativamente constante para cada voltaje dado. Una posible causa para que no haya un descenso significativo de la temperatura es que el intervalo de presión estudiado sea muy pequeño.

Estos resultados tampoco coinciden con experimentos similares realizados anteriormente [6]. En estos resultados se observa claramente la disminución de la temperatura con la presión. Sin embargo, en ese caso se trabajó con presiones del orden de  $10^0$  Torr.

También existen resultados previos que se obtuvieron bajo condiciones muy similares a las estudiadas en este caso, incluso se utilizó el mismo equipo [8]. Las condiciones de descarga fueron de 2kV de voltaje de descarga y presiones entre los 30 y 75 mTorr. En ese caso sí se observa claramente una disminución de la temperatura, aunque la variación es relativamente pequeña (0,04 eV).

Cabe destacar que las diferencias entre las temperaturas son relativamente pequeñas (menores a 0,4 eV, varían en menos de un 10%). La forma de las curvas en las figuras 4 y 5 sugieren que no hay errores experimentales aleatorios. Las diferentes curvas de la figura 5 son significativamente similares en términos cualitativos.

En resumen, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los valores esperados. Sin embargo, su variación con las condiciones no concuerda con lo esperado. Las diferencias podrían ser provocadas por errores experimentales sistemáticos, o bien porque los intervalos estudiados sean tan pequeños que la temperatura es prácticamente la misma para esas condiciones.

Es recomendable repetir las mediciones en intervalos más amplios de voltaje y presión para descartar que los comportamientos inesperados respondan a errores experimentales y observar si la temperatura se comporta de manera similar bajo otras condiciones. También es útil comparar los resultados del espectrómetro con otros diagnósticos, como la sonda de Langmuir.

## Referencias

- [1] F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, Springer, 2006.
- [2] I. H. Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostics*, New York: Cambridge University Press, 2002.
- [3] U. Fantz, «Basics of plasma spectroscopy,» *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 15, pp. S137-S147, 2006.
- [4] N. Zhang, F. Sun, M. P. Planche, H. Liao, C. Dong y C. Coddet, «Electron Temperature and Density of the Plasma Measured by Optical Emission Spectroscopy in VLPPS Conditions,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 20, n° 6, pp. 1321-1327, 2011.
- [5] B. Chapman, *Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching*, John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- [6] A. Garamoon, A. Samir, F. F. Elakshar, A. Nosair y E. Kotp, «Spectroscopic Study of Argon DC Glow Discharge,» *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 35, n° 1, 2007.
- [7] A. Kramida, Y. Ralchenko, J. Reader y NIST ASD Team, «NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3),» National Institute of Standards and Technology, 2015. [En línea]. Available: <http://physics.nist.gov/asd>.
- [8] L. D. López Rodríguez, «Estudio Espectroscópico de la temperatura electrónica del plasma producido por una descarga eléctrica CD luminiscente de Argón,» *Inédito*, 2014.