

# Diferentes regímenes de una descarga eléctrica tipo plasma jet en aire y en argón

## Different regimes of a plasma jet discharge in air and in argon

M. Xaubet <sup>a,1</sup> \*, L. Giuliani <sup>a,2</sup>, D. Grondona <sup>a,2</sup>, F. Minotti <sup>a,2</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Física del Plasma (INFIP), UBA-CONICET. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA - Intendente Güiraldes 2160 Pabellón 1 Ciudad Universitaria – (C1428EGA) Buenos Aires – Argentina

Recibido: 27/02/2015; aceptado: 22/07/2015

Los plasmas no térmicos generados a presión atmosférica presentan interés en aplicaciones biomédicas vinculadas a la esterilización y descontaminación microbiana. Este tipo de plasmas produce especies activas como O, N<sub>2</sub><sup>\*</sup> y radicales OH, asociadas a procesos de inactivación de microorganismos y a la remoción de materiales orgánicos.

En este trabajo se estudia una descarga eléctrica tipo plasma jet capaz de generar una pluma de plasma con temperaturas próximas a la temperatura ambiente. La descarga se produce entre dos discos conductores separados por un disco aislante, con un orificio central de 1 mm a través del cual fluye el gas de operación. Se realizaron mediciones de las curvas características de tensión-corriente empleando aire y argón y variando el espesor del aislante entre 1 y 10 mm. Además, se midió el espectro de emisión de la descarga.

*Palabras clave: descargas eléctricas, jet de plasma, aplicaciones médicas de plasma.*

Non-thermal plasmas generated at atmospheric pressure are of great interest for biomedical applications related to sterilization and microbial decontamination. These plasmas produce reactive species such as O, N<sub>2</sub><sup>\*</sup> and OH radical and atomic O, associated with processes of inactivation of microorganisms and removal of organic materials.

In this work we study an electrical discharge capable of generating a plasma plume close to ambient temperature. The discharge is produced between two conducting disks separated by an insulating disk, with a 1 mm central hole through which the operating gas flows. Characteristic voltage-current curves were measured using either air or argon and variable insulator thicknesses between 1 and 10 mm. Also, the discharge emission spectrum was measured.

*Keywords: electrical discharges, plasma jet, plasma medicine.*

## I. INTRODUCCIÓN

La capacidad de inactivación de microorganismos de los plasmas no térmicos se asocia con su contenido de agentes altamente reactivos como fotones UV, partículas cargadas, campos eléctricos, nitrógeno excitado (N<sub>2</sub><sup>\*</sup>) radicales libres (OH, O<sub>2</sub><sup>-</sup>) y especies de oxígeno (O, O<sub>3</sub>) [1].

Muchas de las aplicaciones biomédicas de este tipo de plasmas, como es el caso de las terapias de interacción directa del plasma con tejido vivo (esterilización de heridas a nivel cutáneo, tratamiento de caries, etc), involucran la operación de descargas en gases a presión atmosférica [2]. En los últimos tiempos se ha desarrollado una gran variedad de descargas eléctricas a presión atmosférica con distintos diseños de electrodos, fuentes de tensión dc, ac o pulsadas y un amplio rango de voltajes, frecuencias o anchos de pulsos [3-9].

La concentración y composición de las especies activas presentes en el plasma dependen fuertemente de parámetros de la descarga como voltaje, corriente, configuración de electrodos y del tipo de gas utilizado [10].

En este trabajo se realiza una caracterización eléctrica de una descarga tipo plasma jet en función de la distancia entre electrodos y del gas utilizado (aire y argón). A partir del modelado de las curvas características de tensión-corriente se analizaron las temperaturas de los electrones y de las partículas pesadas del plasma. Se midió también el espectro de emisión de la descarga para obtener información sobre las especies químicas presentes.

## II. MÉTODOS

### Arreglo experimental

<sup>1</sup> Becaria CONICET

<sup>2</sup> Investigador CONICET

\* [xmagali@infip.lfp.uba.ar](mailto:xmagali@infip.lfp.uba.ar)

La Fig. 1 muestra un esquema del arreglo experimental.

La descarga se produce entre dos discos conductores de acero de 20 mm de diámetro y 3 mm de espesor. Los electrodos se encuentran separados por un aislante de teflón de espesor  $d$  y poseen una perforación central de 1 mm de diámetro a través de la cual fluye el gas de operación (aire o argón).

La fuente de alimentación es un transformador comercial para tubos de neón (12 kV, 70 mA, 50 Hz). Un autotransformador variable (variac) conectado a tensión de línea permite regular la tensión aplicada sobre los electrodos. Se utilizó un flujo de gas de 8 l/min.

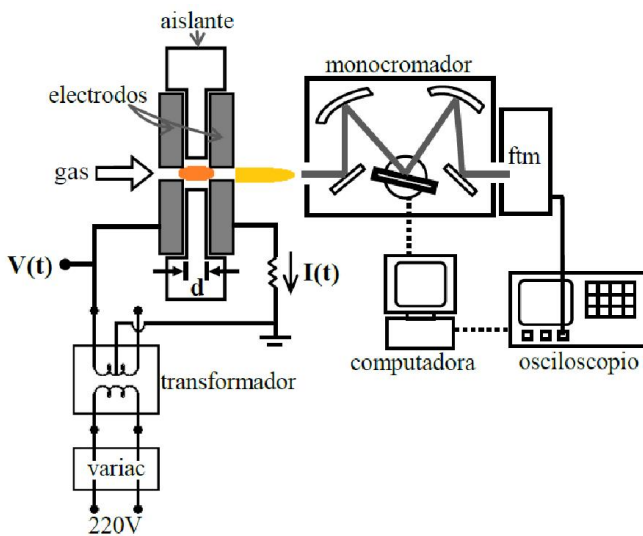


Figura 1. Esquema del arreglo experimental.

Se tomaron fotografías de la pluma de plasma y de la descarga producida entre los electrodos con una cámara de 5.1 Mpx. Para visualizar el espacio interelectrónico se reemplazó el material del aislante por acrílico transparente. Se observó que al operar con aire la descarga desarrolla temperaturas elevadas y se deteriora el aislante de acrílico.

Las señales de tensión entre electrodos y la corriente de la descarga se analizaron en función de distintos espesores  $d$  (ver Tabla 1).

Para medir el voltaje  $V(t)$  se conectó una sonda Tektronix P6015A 1000x al electrodo de alta tensión. La corriente  $I(t)$  se obtuvo a partir de la caída de tensión sobre una resistencia de 100  $\Omega$ . Las señales se registraron empleando un osciloscopio Tektronix TDS2004B 60 Mhz 1 GS/s.

TABLA 1: CONFIGURACIONES EXPERIMENTALES

Gas	$d$ (mm)
Aire	1.3, 1.9, 3.3
Argón	1.3, 1.9, 3.3, 4.5, 7.0, 10.2

El espectro de emisión de la descarga se midió con un monocromador (red de difracción: 2400 líneas/mm; rendija de entrada/salida: 170/40  $\mu$ m) acoplado a un fotomultiplicador (ftm) Hamamatsu 1P28. La rendija de entrada se colocó enfrentada a la perforación central de los electrodos; de esta manera se colecta tanto la luz que

emite el jet como la que proviene del espacio interelectrónico de la descarga.

La inclinación de la red de difracción se controló con un motor paso a paso. El espectro de emisión se registró con un paso de 1 nm en longitudes de onda, automatizando por computadora el comando del motor y la adquisición de la señal del fotomultiplicador.

### Modelo teórico

El modelo de la descarga considera una lámina catódica colisional y un canal principal de descarga.

El canal se modeló de acuerdo a la ecuación de Elenbaas-Heller que balancea el calentamiento joule con la conducción lateral de calor en el canal cilíndrico de la descarga

$$\sigma(T)E^2 + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (1)$$

$\sigma(T)$  es la conductividad eléctrica,  $T$  es la temperatura,  $E$  es el campo eléctrico axial uniforme y  $\lambda(T)$  la conductividad térmica del plasma.

Se consideró un canal con radio  $r_c$  y longitud igual a la separación entre electrodos ( $d$ ), asumiendo una lámina catódica de ancho despreciable.

De la solución de la ec. 1 se obtiene el campo  $E$  y el perfil radial de temperaturas de la descarga  $T(r)$ , de acuerdo con las condiciones de contorno  $dT/dr|_{r=0}=0$  y  $T(r_c)$  igual a temperatura ambiente. La tensión en el canal y la corriente se calculan a partir de

$$V_c = Ed \quad (2)$$

y

$$I = 2\pi \int_{r=0}^{r=r_c} \sigma(T)E dr. \quad (3)$$

La caída de tensión entre electrodos se obtuvo sumando a  $V_c$  una caída en la lámina catódica ( $V_L$ ) constante.

Una descripción completa del modelo teórico se encuentra en la publicación de Giuliani [11].

Se realizaron simulaciones considerando el plasma dentro y fuera del equilibrio térmico. Las curvas características  $I-V$  obtenidas en forma teórica se compararon con los datos experimentales.

En condición de equilibrio térmico entre electrones y especies pesadas  $T$  es la temperatura electrónica ( $T_e$ ), equivalente a la temperatura del gas ( $T_{gas}$ ). Las conductividades  $\sigma(T)$  y  $\lambda(T)$  se extrajeron de la literatura [12].

En equilibrio no térmico, en cambio,  $T$  describe la temperatura de los electrones. Las conductividades en este caso dependen en general de ambas temperaturas, y en este trabajo se utilizaron factores de ajuste dependientes de  $T_e/T_{gas}$ , obtenidos de [12].

## III. RESULTADOS

### Fotografías

En la Fig. 2 se muestra una fotografía del jet de plasma obtenido al utilizar aire como gas de operación, con una longitud de aproximadamente 1 cm.

Las fotografías del espacio interelectrónico de la descarga en argón (Fig. 3) se realizaron con dos tiempos

de exposición ( $t_{exp}$ ) distintos. Cuando  $t_{exp}=1/250$  s (equivalente a 1/5 de ciclo del voltaje de alimentación) se observa un único canal luminoso de aproximadamente 1 mm de diámetro. Con tiempos de exposición mayores se registra una superposición de canales luminosos, indicando que en cada semiciclo de la tensión de alimentación el canal de la descarga ancla en distintas regiones del electrodo.

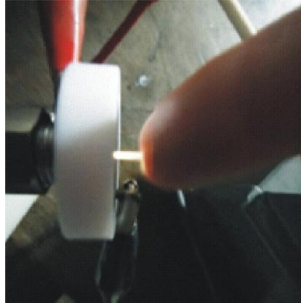


Figura 2. Fotografías del jet de plasma. ( $t_{exp}=1/8$  s. Gas de operación: aire,  $d=1.3$  mm).

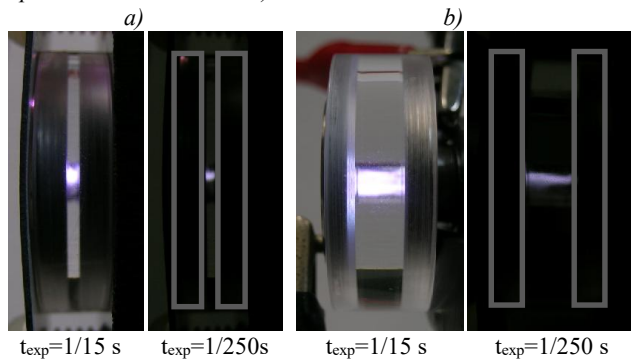


Figura 3. Fotografías transversales de la descarga entre electrodos utilizando distintos tiempos de exposición ( $t_{exp}$ ). a)  $d=1.3$  mm, b)  $d=4.5$  mm. (Gas de operación: argón)

### Señales Eléctricas

En la figura 4 se muestran las señales eléctricas típicas obtenidas en la descarga con aire y  $d=1.3$  mm.

En el inicio de cada semiciclo de la señal de corriente se observan pulsos posiblemente asociados a streamers que se forman al iniciarse la descarga. Una vez que se produce la ruptura dieléctrica del gas y la descarga es autosostenida, la corriente se autorregula debido a la elevada impedancia interna del transformador y resulta independiente de la configuración de descarga.

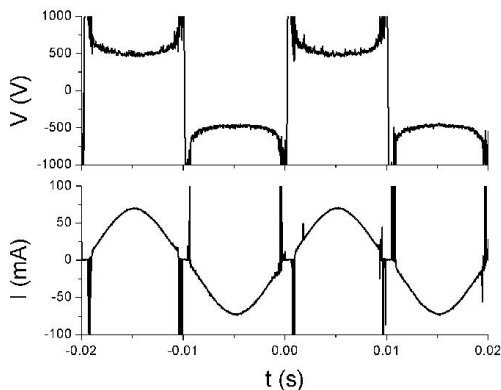


Figura 4. Señales eléctricas obtenidas para los distintos gases de operación ( $d=1.3$  mm).

La caída de tensión, en cambio, resulta dependiente de la separación entre electrodos y del tipo de gas (Fig. 5). Las señales de tensión obtenidas en aire y en argón para distancias interelectrónicas grandes presentan una concavidad opuesta a la de la corriente. Para distancias menores ( $d=1.3$  y 1.9 mm) en argón se observa que la tensión se mantiene aproximadamente constante como sucede en un régimen de descarga tipo glow.

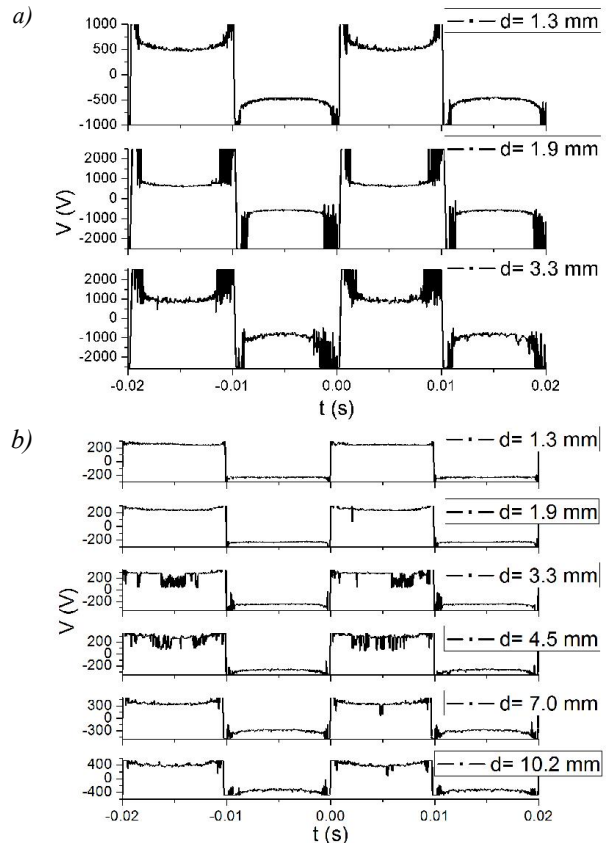


Figura 5.  $V(t)$  para distintas separaciones al emplear aire (a) o argón (b).

### Curvas características

Las curvas características de la descarga (Fig. 6) se trazaron en base a las señales temporales de tensión y corriente (Fig. 5).

Las curvas medidas en aire se modelaron considerando un plasma térmico con  $r_C=120$   $\mu\text{m}$  y  $T_{r=0}$  variable entre 5000 y 6000 K. Las curvas del argón con  $d > 3$  mm fueron modeladas considerando un plasma no térmico donde  $r_C=70$   $\mu\text{m}$ ,  $T_{gas}=1000$  K y  $T_{r=0}$  entre 8000 y 9700 K. Los valores de caída de tensión catódica ( $V_L$ ) empleados en el modelado de las curvas características fueron de aproximadamente 260 V para el aire, y 231 V para el argón.

El campo eléctrico en las columnas depende, para cada gas, solamente de la corriente. En el caso del aire varía desde 250 kV/m para  $I=30$  mA, hasta 190 kV/m cuando  $I=70$  mA. En argón, toma valores de 20 kV/m para  $I=30$  mA, hasta 14 kV/m cuando  $I=70$  mA. El diferente orden de magnitud entre los campos eléctricos en ambos gases se corresponde con las más altas conductividades eléctricas para el argón, asociadas a

temperaturas electrónicas más elevadas, consistentes a su vez con el no equilibrio termodinámico.

Las densidades electrónicas medias en las columnas de plasma en el caso del aire se encuentran alrededor de  $10^{19} \text{ m}^{-3}$ , con un valor máximo en el eje de unos  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ , que son valores característicos para  $I=50 \text{ mA}$ . En el argón se tienen valores medios de  $2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , con valor máximo en el eje de alrededor de  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ , también cuando  $I=50 \text{ mA}$ .

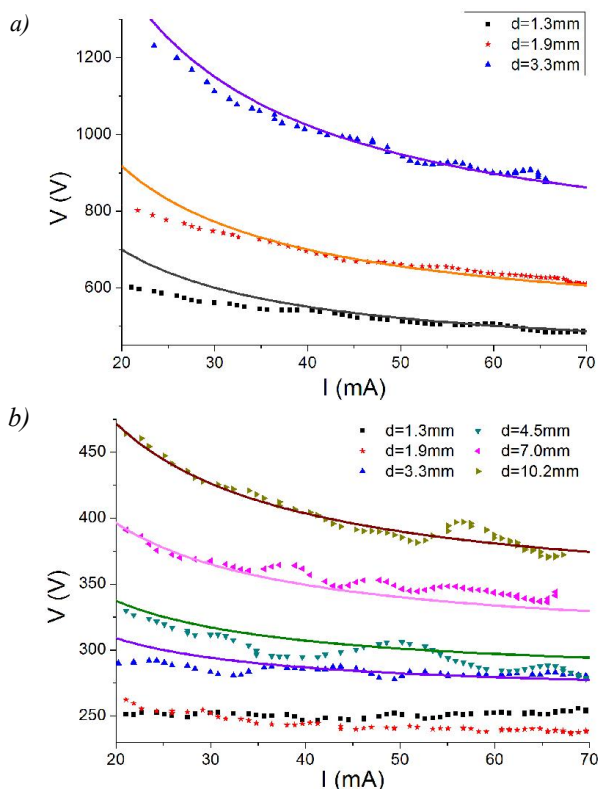


Figura 6. Curvas características en función de la separación entre electrodos. (a) Aire, (b) argón.

### Espectros de emisión

En los espectros de emisión (Fig. 7) se señala la emisión de distintas especies gaseosas identificadas en base a la bibliografía [13,14]. Se observan contribuciones de  $\text{N}_2$  para los dos gases de operación. Al emplear aire se registra la presencia de picos de OH y de  $\text{N}_2^+$ . Al utilizar argón se identifican contribuciones de emisión del Ar y un pico intenso de OH.

### IV. CONCLUSIONES

Del análisis previo se observa una clara diferencia de regímenes entre las descargas en aire y en argón, que indica equilibrio térmico entre especies en el caso del aire, y no equilibrio para el argón. Una consecuencia importante para las aplicaciones es la temperatura electrónica notablemente más elevada en la descarga con argón, con una temperatura del gas marcadamente inferior. Además, por su gran reactividad química, resulta relevante la presencia de OH en ambos tipos de gas con evidencia espectroscópica de mayor concentración en el caso del argón..

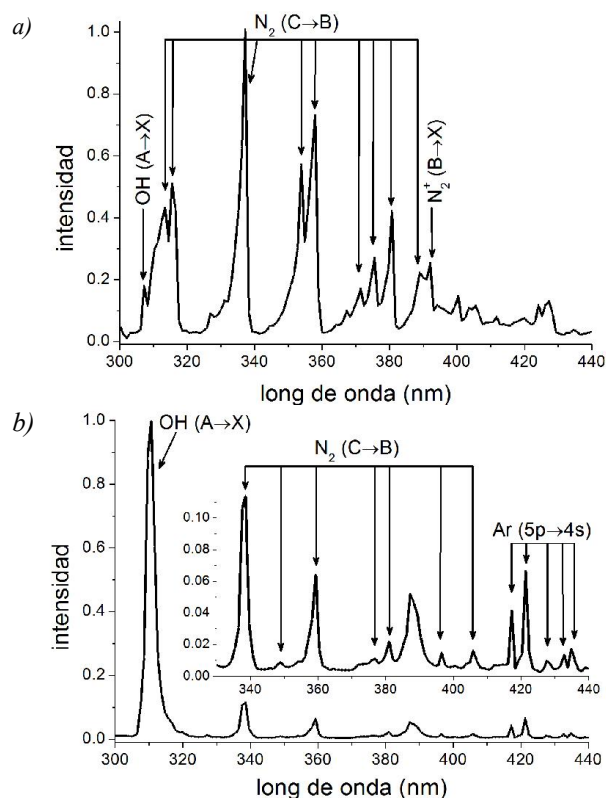


Figura 7. Espectros de emisión obtenidos utilizando aire (a) o argón (b) como gas de operación ( $d: 1.3 \text{ mm}$ ).

### V. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado con subsidios ANPCyT- PICT 2010-0771, CONICET-PIP 2013-2015 GI 11220120100453 y UBA-20020120120100354BA.

### VI. REFERENCIAS

- 1 - K. Fricke, I. Koban, H. Tresp, L. Jablonowski, K. Schröder *et al.*, PLoS ONE 7 (8) e42539 (2012).
- 2 -Th. vonWoedtke, H.R. Metelmann y K.D.Weltmann, Contrib. Plasma Phys. 54 (2) 104 – 117 (2014).
- 3 -E. Stoffels, A.J. Flikweert, W.W. Stoffels y G.M.W. Kroesen, Plasma Sources. Sci. Technol. 11 383–388 (2002).
- 4 -S. Forster, C. Mohr y W. Viöl, Surf. Coat. Tech. 2001-4 827-830 (2005).
- 5 - M. Laroussi y X. Lu, Appl. Phys. Lett. 87 113902 (2005).
- 6 -M. Laroussi, C. Tendero, X. Lu, S. Alla y W.L. Hynes, Plasma. Proc. Polym. 3 470 (2006).
- 7 - X. Lu y M. Laroussi, J. Appl. Phys. 100 063302 (2006).
- 8 -Y. Ch. Hong y H. S. Uhm, Appl. Phys. Lett. 89 221504 (2006).
- 9 -X. Li, X. Tao y Y. Yin, IEEE Trans. Plasma Sci. 37 759 (2009).
- 10-Th. von Woedtke, B. Haertel, K.D. Weltmann, U. Lindequist, Pharmazie 68 492–498 (2013).
- 11-L.Giuliani, M. Xaubet, D. Grondona, F. Minotti y H. Kelly, Phys. Plasmas 20 063505 (2013).
- 12-M. I. Boulos, P. Fauchais, and E. Pfender, *Thermal plasmas: Fundamentals and Applications (Vol 1)*, Plenum Press, New York, 1994.
- 13-NISTatomic database <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>

- 14- R. Pearse, A. Gaydon, *The Identification of Molecular Spectra*, John Wiley & Sons, New York (1941).