



D. Grondona¹, R. Sosa², H. Kelly³, A. Márquez³, G. Artana⁴

¹ Doctora en Ciencias Físicas (UBA). Investigadora Adjunta del CONICET. Docente Fac. de Ingeniería UdeMM; ² Becario de la UBA, Laboratorio de Fluidodinámica, Facultad de Ingeniería-UBA; ³ Investigador de CONICET, Instituto de Física del Plasma CONICET-FCEN-UBA; ⁴ Investigador de CONICET, Laboratorio de Fluidodinámica, Facultad de Ingeniería-UBA.

Estudio de una descarga eléctrica superficial a presión atmosférica

Resumen

En este trabajo se generó una descarga eléctrica superficial a presión atmosférica mediante la combinación de una descarga de barrera dieléctrica y una descarga corona negativa.

En los regímenes estudiados se observó que la descarga estaba formada por un conjunto de filamentos que se propagaban a lo largo del espacio interelectrónico, denominados streamers, los cuales en condiciones óptimas de la descarga, se distribuyen uniformemente a lo largo de los electrodos. Se midió la frecuencia media de generación de streamers y su velocidad media de propagación, obteniéndose como resultado $5 \cdot 10^4$ Hz y $2 \cdot 10^7$ cm/s, respectivamente.

Introducción

Actualmente existe un gran interés en la producción de plasma mediante descargas eléctricas de baja potencia a presión atmosférica. Los plasma generados en estas descargas se denominan plasmas no térmicos y se

caracterizan por un bajo grado de ionización, de modo tal que la energía eléctrica de la descarga se emplea en el calentamiento de algunos electrones, mientras que las partículas pesadas (iones y moléculas) permanecen frías.

Hasta el momento, estos plasmas se han empleado en muchas aplicaciones importantes, como por ejemplo, producción de ozono, modificación de superficies de polímeros, excitación de láser de CO_2 , control de contaminación y pantallas de plasma [1]. En la mayoría de las aplicaciones antes nombradas se generan descargas en volumen, no en superficie. En particular, las descargas en superficies fueron investigadas para aplicaciones aerodinámicas [2]. Mediante estas descargas es posible modificar las propiedades físicas (viscosidad y densidad) del gas sobre la superficie de un cuerpo, lo cual es útil, por ejemplo, para el control de la capa límite en objetos en movimiento [3-6].

No obstante, las numerosas aplicaciones que se han desarrollado, mu-

chos de los procesos físicos básicos de las descargas en superficie están aun en estudio. Esto es debido a que existe una gran variedad de regímenes de descarga, los cuales se pueden obtener modificando la geometría de los electrodos, o trabajando con diferentes gases a diferente presión o empleando distinto tipo de fuentes de tensión [7].

En este trabajo se describe el estudio experimental de una descarga superficial a presión atmosférica obtenida empleando tres electrodos alimentados con una combinación de fuentes de tensión continua DC y tensión alterna AC.

Dispositivo Experimental

En la figura 1 se presenta un esquema del dispositivo experimental. El sistema de electrodos consistió en dos láminas de aluminio pegadas sobre la superficie de una placa de material dieléctrico (electrodos 1 y 3) y un tercer electrodo pegado en la cara opuesta de la placa (electrodo 2).

Las dimensiones de los electrodos fueron: 50 μm de espesor, 150 mm de longitud y 50 mm de ancho los electrodos 1 y 3, y 30 mm el electrodo 2. El material de la placa aislante empleado fue PMMA con un espesor de 4 mm. El espacio entre los electrodos 1 y 3 fue de 30 mm.

Los electrodos 2 y 3 se polarizaron negativamente con una fuente de tensión continua DC ($V_{DC} = -6 \div -20$ kV, 10 W). Otra fuente de tensión alterna sinusoidal AC (frecuencia $f = 9,7$ kHz, voltaje pico a pico $V_{AC} = 6 \div 14$ kV) se empleó para polarizar el electrodo 1. La fuente de tensión alterna consiste en un generador de función conectado a un amplificador de audio de 150 W de potencia el cual alimenta un transformador de alta voltaje [8].

La corriente eléctrica, $I(t)$, se determinó midiendo la caída de tensión sobre una resistencia, $R = 1$ k Ω , conectada a un osciloscopio de 60 MHz de ancho de banda y 1Gs/s de velocidad de muestreo. El voltaje alterno aplicado al electrodo 1, $V(t)$, se midió con una sonda de alta tensión (1000 \times / 3.0 pF / 100M Ω).

La luz emitida por la descarga fue detectada empleando un sistema óptico consistente en una lente convergente y una fibra óptica de cuarzo acoplada a un fotomultiplicador (*pmt*). El *pmt* detecta luz en el rango de 185-650 nm, con una respuesta temporal y un tiempo de tránsito de 2,2 y 22 ns, respectivamente. El campo de visión del sistema óptico fue limitado por una rendija de 20 mm \times 5 mm en las direcciones z y x respectivamente (ver figura 1). La lente convergente fue colocada sobre el espacio interelectrónico en dos posiciones diferen-

tes: $x = 0$, $y = 25$ mm, $z = 0$ mm (posición A) y $x = 15$ mm, $y = 25$ mm, $z = 0$ mm (posición B). El origen de coordenadas fue elegido en el punto medio del lado del electrodo 1 que está enfrentado al electrodo 3 (ver figura 1).

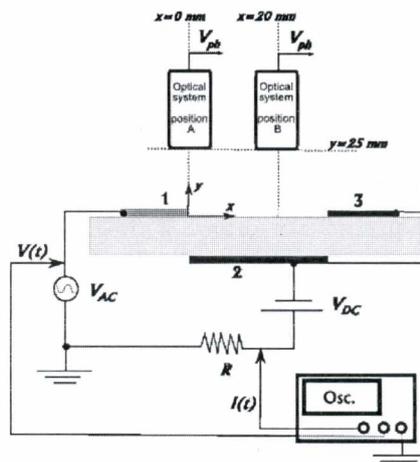


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental

Resultados

Morfología de la descarga:

En la práctica, al polarizar el electrodo 1 con la fuente AC se produce una descarga de barrera dieléctrica superficial (SDBD) entre los electrodos 1 y 2, y al polarizar el electrodo 3 con la fuente DC se produce una descarga eléctrica superficial extensa (SD) que llena todo el espacio interelectrónico entre los electrodos 1 y 3. Tanto la descarga SDBD como la SD tienen sus propias tensiones de inicio. En los regímenes estudiados y para la geometría de electrodos empleada en este trabajo, la descarga SDBD comienza a generar picos de corriente a tensiones de inicio $V_{SDBD} \sim 5$ kV. La presencia de esos picos está

acompañada por una luz violácea que se extiende todo a lo largo del electrodo 1 y hasta 1 cm hacia delante del electrodo sobre la superficie del dieléctrico.

Por otro lado al polarizar el electrodo 3 con la fuente DC y conectando el electrodo 1 a tierra, en el entorno del electrodo 3 se produce una descarga corona negativa, la cual provee cargas negativas que derivan del electrodo 3 al 1. Para las tensiones de polarización V_{DC} que se emplearon en este trabajo la descarga corona estuvo siempre encendida con corrientes que variaron entre 30 – 300 μA .

Al polarizar el electrodo 3 con la fuente de DC y conectando el electrodo 1 a tensiones AC con amplitudes menores que V_{DC} , se produce la combinación de dos descargas, corona negativa y SDBD, que producen la descarga SD. En la figura 2 se da una secuencia de fotografías de la descarga combinada. Las imágenes corresponden a un tiempo de exposición de 2 s. con un valor fijo de $V_{DC} = -16$ kV, y valores crecientes de V_{AC} . La primera fotografía (figura 2A) corresponde a valores de V_{AC} por debajo del voltaje de inicio de la descarga SDBD ($V_{AC} < V_{SDBD}$), y se puede ver que la descarga presenta una serie de puntos activos distribuidos en forma aleatoria a lo largo borde del electrodo 1. En estas condiciones la descarga es ruidosa e inestable, y frecuentemente deriva en una chispa. A medida que V_{AC} aumenta, aumenta el número de puntos activos y estos son de menor tamaño (ver figura 2B), y para valores suficientemente altos de V_{AC} llegan a cubrir todo el borde del electrodo. En estas condiciones la descarga es estable y silenciosa y cubre todo el espacio interelectrónico formándose

una descarga SD estable y homogénea (ver figura 2C).

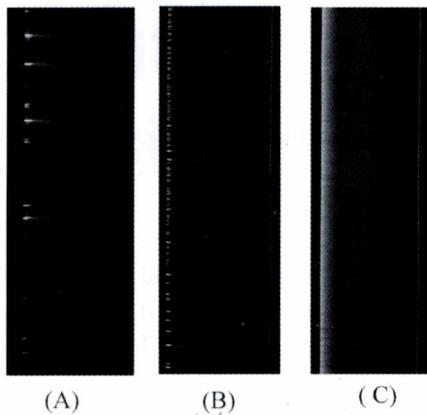


Figura 2.: Morfología de la descarga. Vista plana superior del sistema de electrodos con el electrodo 1 a la izquierda y el 3 a la derecha; tiempo de exposición 2 s., $V_{DC} = -16$ kV, (A) $V_{AC} = 4,8$ kV; (B) $V_{AC} = 7,2$ kV; (C) $V_{AC} = 10,2$ kV

En la figura 3 se grafica V_{DC} vs. V_{AC} y se identifica el rango de voltajes para el cual se genera una descarga SD estable y homogénea. Para valores de $V_{AC} > V_{SDBD}$ la descarga SDBD está bien desarrollada. También, como se mencionó anteriormente, para los valores de V_{DC} con los cuales trabajamos la descarga corona siempre está encendida. No obstante, para un dado valor de $-V_{DC}$, que llamamos V_{DC}^0 , sólo se genera una descarga SD estable, para valores de V_{AC} mayores a V_{SDBD} (línea punteada en la figura 3) y superiores a un dado valor de tensión que llamamos, voltaje de encendido (V_{AC}^0) (símbolos cuadrados a la derecha de la línea punteada en la figura 3). Se observa que cuanto más bajo es el valor de V_{DC}^0 más alto es el valor de V_{AC}^0 requerido para obtener una descarga SD estable y homogénea. Definiendo como voltaje de inicio de la descarga SD a $V_{SD} =$

$-V_{DC}^0 + V_{AC}^0$ se observa en la figura 3 que V_{SD} (símbolos redondos en la figura 3) es prácticamente constante.

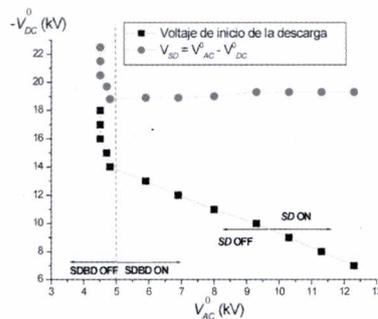


Figura 3: Voltajes de inicio de la descarga SD

Es interesante notar que para valores relativamente bajos de $-V_{DC}$ sin la presencia de la descarga SDBD (en la práctica inferiores a 13 kV) al aumentar el valor de V_{AC} se desarrolla la descarga SD en una secuencia diferente de la presentada en la figura 2. Este comportamiento se muestra en la figura 4, donde se presentan imágenes de la descarga con tiempos de exposición largos (8 s.). En este caso, el valor de V_{DC} fue de 10 kV, y para este valor, el valor de V_{AC}^0 necesario para encender la descarga SD es 9,4 kV (ver la figura 3). Se puede observar en la figura 4A que para valores de V_{AC} inferiores a V_{AC}^0 ($V_{AC} = 9$ kV) se observa sólo la descarga SDBD, y al aumentar el valor de V_{AC} se comienza a desarrollar la descarga SD. En la práctica, este modo de producir la descarga SD es preferible porque no hay riesgo de que se genere una chispa.

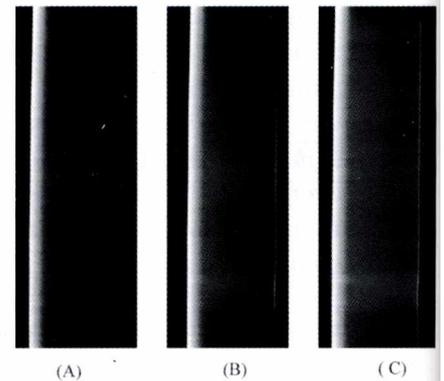


Figura 4: Morfología de la descarga. Vistas plana superior frontales con el electrodo 1 a la izquierda y el electrodo 3 a la derecha, tiempo de exposición 8 s, $V_{DC} = -10$ kV.

(A) $V_{AC} = 9.0$ kV; (B) $V_{AC} = 9.4$ kV; (C) $V_{AC} = 9.7$ kV

Características eléctricas de la descarga

En la figura 5 se presentan las señales típicas de $I(t)$, $V(t)$ y la señal del *pmt*, $V_{ph}(t)$, obtenidas para una descarga SD completamente desarrollada ($V_{DC} = -14$ kV y $V_{AC} = 12,8$ kV). La figura 5a corresponde a una señal de $V_{ph}(t)$ obtenida con el sistema óptico en la posición A (sobre la descarga SDBD, ver figura 1), y en la figura 5b el sistema óptico se ubicó en la posición B (sobre la descarga SD y dejando fuera del campo visual la descarga SDBD). Se puede ver en la figura 5a que la componente reactiva de $I(t)$, una vez iniciada la descarga SD, es modificada por la presencia de múltiples pulsos cortos que aparecen en el ciclo positivo y negativo de la descarga. La presencia de estos pulsos indica que la descarga tiene una naturaleza filamentosa. Por otro lado, se puede ver en la figura 5b que los pulsos en el ciclo positivo de $V_{ph}(t)$ están distribuidos en un periodo de

tiempo más corto que el registrado en $I(t)$ o $V_{ph}(t)$ en la posición A (ver figura 5a), mientras que en $V_{ph}(t)$ no se observan pulsos en el ciclo negativo en la posición B. Dado que la medición de $I(t)$ es independiente de la posición del sistema óptico, este último resultado indica que no todos los filamentos generados durante el ciclo positivo atraviesan el espacio interelectrodico, algunos de ellos permanecen anclados entre los electrodos 1 y 2 (como en la descarga SDBD) y no son detectados por el sistema óptico en la posición B. Por otro lado, los picos correspondientes al ciclo negativo no corresponden a filamentos que atraviesen el espacio interelectrodico entre 1 y 3.

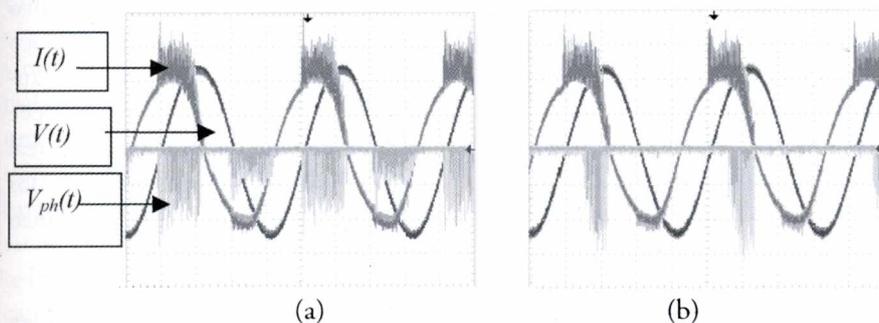


Figura 5. Señales de $I(t)$, $V_{AC}(t)$ y $V_{ph}(t)$ para $V_{DC} = -14$ kV y $V_{AC} = 12.8$ kV. Escala de la corriente 6 mA/div; Escala del voltaje 5 kV/div, Escala temporal 25 μ s/div. (a) *pmt* en la posición A, (b) *pmt* en la posición B

Para obtener un valor medio de la corriente de descarga (I_m) en función de V_{DC} y V_{AC} , se realizó el siguiente procedimiento. La señal de la corriente se adquirió con el osciloscopio en modo de adquisición promedio y se obtuvo una señal de corriente promediada sobre 128 adquisiciones (cantidad máxima permitida por el osciloscopio). A esta señal promediada se le restó la componente de la corriente reactiva (presente aun sin descarga gaseosa) y se calculó la

media temporal de la corriente en un período del voltaje AC. Con este procedimiento se obtiene un valor de I_m con una incertidumbre de 0,1 mA.

Otra característica importante de la descarga SD es la cantidad de pulsos de corriente que se generan durante la descarga. Esta cantidad se representó por una frecuencia media, la cual fue obtenida directamente midiendo la frecuencia de disparo del osciloscopio al detectar la señal $V_{ph}(t)$. Esta señal se eligió porque en la señal de la corriente los pulsos estaban superpuestos a la componente reactiva de la corriente y el osciloscopio indicaba como valor de la frecuencia el valor de frecuencia de la componente reactiva en lugar de la frecuencia de los pulsos. Dado que la frecuencia de

los pulsos variaba en el tiempo (los pulsos no eran periódicos), se registraron muchos valores de frecuencia (alrededor de 20) durante un intervalo temporal largo y se calculó la media estadística de la frecuencia (f_s). La incertidumbre asociada fue del orden del 20 %. Es importante mencionar que los valores de f_s dependen de la amplitud seleccionada de los pulsos, que es regulada con el nivel de disparo del osciloscopio. Nosotros elegimos una amplitud media, de modo

tal de detectar la mayor cantidad de pulsos, y eliminar los de menor amplitud que pueden ser ocasionados por ruido eléctrico de la descarga.

En la figura 6 se presenta I_m en función de V_{AC} y V_{DC} , como parámetro. En la figura se incluyen los dos regímenes de la descarga, SD y SDBD. Los valores de corriente asociados a una descarga pura SDBD son muy pequeños comparados con los valores de corriente en la descarga SD. La transición abrupta que se observa en el valor de I_m en la descarga SDBD para $V_{AC} \sim 7,5$ kV es muy pequeña, comparable a la incertidumbre en la medición. Asimismo, para valores pequeños de V_{AC} y V_{DC} ($V_{AC} < V_{SDBD}$ y $-V_{DC} > 13$ kV) donde la descarga es inestable, se obtienen valores bajos de I_m .

Por otro lado, en un régimen de descarga SD bien desarrollada, la figura 6 muestra un fuerte incremento de I_m con V_{AC} , hasta valores de V_{AC} (dependiendo del valor de V_{DC}) donde el crecimiento pasa a ser más suave.

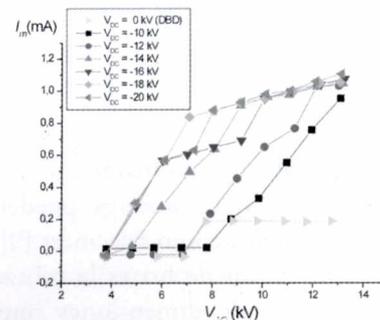


Figura 6. I_m vs. V_{AC} para diferentes valores de V_{DC}

En la figura 7 se presenta f_s en función de V_{AC} con V_{DC} como parámetro, medida con el sistema óptico en la posición B. Se observa que el rango

de variación de V_{AC} es más reducido que el presentado en la figura anterior. Esto es debido a que para valores grandes de V_{AC} se generaban chispas entre el electrodo y el soporte del fotomultiplicador conectado a tierra. De cualquier modo, esta restricción no afectó el comportamiento general de las curvas de f_s , se puede observar que el comportamiento de f_s con V_{AC} (para un dado valor de V_{DC}) es muy similar al comportamiento de Im , mostrando nuevamente un fuerte incremento con V_{AC} seguido de un incremento más suave.

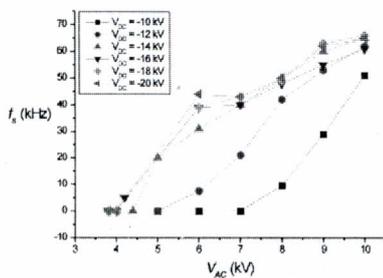


Figura 7. f_s vs. V_{AC} para diferentes valores de V_{DC}

Considerando que los filamentos que se observan en la descarga pueden ser identificados como streamers [9], el objeto emisor de luz es la cabeza del streamer, de dimensiones muy pequeñas que atraviesa el campo de visión del detector a una velocidad determinada. Con el fin de obtener información sobre la velocidad de propagación de los streamers entre los electrodos 1 y 3, se empleó el sistema óptico descrito anteriormente, pero limitando el campo de visión

con dos rendijas rectangulares de dimensiones 16×3 mm y 9×3 mm en la dirección x y z, respectivamente, que cubrían la lente convergente. Como ejemplo típico, en la figura 8 se presentan dos señales de $V_{ph}(t)$ (con una escala temporal extendida) correspondiente a ambas rendijas, y para $V_{DC} = -14$ kV y $V_{AC} = 6$ kV. Se puede observar que el tiempo de tránsito para un streamer individual a lo largo de las rendijas (~ 50 y 100 ns, respectivamente) aumenta proporcionalmente con la longitud de la rendija en la dirección x, dando ambos una velocidad media de $(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^7$ cm/s. La señal más larga presenta algunos picos secundarios que pueden ser asociados a ramificaciones de los streamers. Un análisis estadístico realizado en todo el rango de variación de V_{DC} y V_{AC} en el régimen de descarga SD muestra que el valor de la velocidad es prácticamente constante.

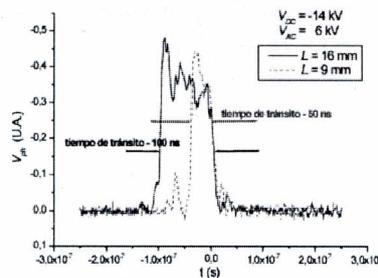


Figura 8: Señales de pmt correspondientes a las dos rendijas (16×3 mm y 9×3 mm en la dirección x y z respectivamente). $V_{DC} = -14$ kV y $V_{AC} = 6$ kV

Discusión de los resultados

La figura 3 es útil desde un punto de vista práctico ya que nos permite definir un rango de valores para

los voltajes AC y DC en los cuales se obtiene una descarga SD estable. No obstante, cuando se establece un régimen repetitivo (ver figura 5), el valor real instantáneo de AC puede ser considerablemente menor al valor de V_{AC}^0 presentado en la figura 3. Esto indica la presencia de carga remanente en el espacio interelectrónico durante un ciclo de la descarga la cual favorece la ruptura dieléctrica del gas durante el ciclo siguiente (como sucede en una descarga pura de barrera dieléctrica [10])

Volviendo a la figura 3, el hecho que V_{SD} sea constante, parece estar relacionado con la presencia de un campo eléctrico mínimo necesario para la propagación de los streamers a través del espacio interelectrónico. Notar que el valor de campo eléctrico obtenido ($\sim 6,3$ kV/cm) es un poco mayor que el reportado por otros autores ($\sim 3 \div 5$ kV/cm) [11], pero debe tenerse en cuenta que el valor real de $V(t)$ para la propagación de los streamers es menor que su valor pico (ver figura 5b).

En relación con las figuras 6 y 7, es importante remarcar el comportamiento similar de Im y f_s en función de V_{AC} . Este hecho, sugiere que un aumento de Im con V_{AC} no está asociado con un aumento en la amplitud de los picos individuales, sino con un aumento en su frecuencia. Hasta el momento, no tenemos una explicación para los dos regímenes que se observan en estas figuras (con diferentes pendientes), pero la etapa de crecimiento suave puede estar relacionada con limitaciones en el circuito eléctrico externo debido al límite de potencia (10 W) de la fuente DC.

Los valores obtenidos para la velocidad de los streamers concuerdan muy bien con valores de la velocidad medida por otros autores. Aun cuando muchos autores han encontrado cierta dependencia de la velocidad con el voltaje entre los electrodos [12,13], el rango limitado de V_{DC} y V_{AC} en esta descarga junto con la gran incertidumbre experimental de las medidas (principalmente debida a fluctuaciones en la descarga), hace que en nuestro caso este comportamiento no sea obvio. La velocidad medida, junto con resultados presentados anteriormente [9], confirma que los filamentos observados en la descarga SD son streamers.

Conclusiones

Combinando una descarga superficial de barrera dieléctrica junto con una descarga corona negativa a presión atmosférica, se genera una descarga superficial SD. Esta descarga es estable y puede ser mantenida durante largos lapsos de tiempo sin mostrar cambios apreciables de sus características para un cierto rango de valores de voltajes AC y DC estudiados en este trabajo. La descarga está compuesta por streamers repetitivos que se distribuyen uniformemente a lo largo de todo el electrodo y que se propagan en el espacio interelectrónico con una velocidad media $\sim 2 \cdot 10^7$ cm/s, y la frecuencia de los streamers

es aproximadamente $5 \cdot 10^4$ Hz para una descarga SD bien desarrollada.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos del CONICET, UBA y ANPCYT.

Bibliografía

- [1] U. KOGELSCHATZ, B. ELIASSON and W. EGLI, *Pure Appl. Chem.*, 71 (1999) 1819-28.
- [2] R. E. BEVERLY III, *J. Appl. Phys.*, 60 (1986) 104-24.
- [3] G. ARTANA, R. SOSA, E. MOREAU and G. TOUCHARD, 2003, "Control of the near-wake flow around a circular cylinder with electrohydrodynamic actuators", *Exp. Fluids* 35 580-8
- [4] G. ARTANA, R. SOSA, E. MOREAU and G. TOUCHARD, 2007b, "Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators", *Experiments in fluids*, Vol. 42, No 1, pp 143-167
- [5] R. SOSA, E. ARNAUD and G. ARTANA, 2006b, "Study of the flow Induced by a Sliding Discharge", *Proceedings of the International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD)*, pp. 83-86, ISBN 950-29-0964-X, 4-6 December, Buenos Aires, Argentina.
- [6] E. MOREAU, 2006, "Airflow control by non-thermal plasma actuators", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39, pp.1-32
- [7] U. KOGELSCHATZ, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 30 (2002) 1400-08.
- [8] Manish Y., 2005, Pitot tube and wind tunnel studies of the flow induced by one atmosphere uniform glow discharge (oaugdp@) plasma actuators using a conventional and an economical high voltage power supply, MS Thesis Department of Physics, University of Tennessee
- [9] V. LAGO, D. GRONDONA, H. KELLY, R. SOSA, A. MARQUEZ and G. ARTANA, 2006, "Sliding Discharge Characteristics", *Proceedings of the International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD)*, pp. 87-90, ISBN 950-29-0964-X, 4-6 December, Buenos Aires, Argentina.
- [10] M. AKYUZ, L. GAO, A. LARSSON, V. COORAY, T.G. GUSTAVSSON and S. M. GUBANSKI, 2001, "Positive Streamer Discharges along Insulating Surfaces", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. (8): 6, pp. 902-910.
- [11] RAIZER Y., 1991, *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer)
- [12] YI W. J. AND WILLIAMS P. F., 2002, "Experimental study of streamers in pure N₂ and N₂/O₂ mixtures and a ≈ 13 cm gap", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, pp.205-218.
- [13] V. I. GIBALOV and G. J. PIETSCH, "The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 (2000) 2618-2636.