

## DESCARGAS EN CONTACTO CON LÍQUIDOS: CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE UNA DESCARGA CORONA PULSADA

### DISCHARGES IN CONTACT WITH LIQUIDS: ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF A PULSED CORONA DISCHARGE

N. Milardovich<sup>\*1</sup>, M. Ferreyra<sup>1</sup>, J. C. Chamorro<sup>1</sup> y L. Prevosto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Descargas Eléctricas, Departamento Ing. Electromecánica, Facultad Regional Venado Tuerto, (UTN) Laprida 651 – (2600) Venado Tuerto – Prov. Santa Fe – Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, Facultad Regional Venado Tuerto Departamento Ing. Electromecánica, Grupo de Descargas Eléctricas Laprida 651 (2600) – Venado Tuerto – Prov. Santa Fe – Argentina.

Recibido: 19/08/21; Aceptado: 03/12/21

La gran cantidad de trabajos publicados en los últimos años sobre descargas no-térmicas en (y en contacto con) líquidos, evidencia el creciente interés en este particular campo de las descargas eléctricas debido al gran número de aplicaciones tecnológicas. En particular, una de las aplicaciones emergentes de mayor crecimiento es el tratamiento de agua, tanto para su potabilización como para su activación, con vistas a realizar el tratamiento indirecto de alimentos y semillas con descargas no-térmicas; sin el agregado de sustancias químicas. En este trabajo, se presenta la caracterización experimental de una descarga corona en contacto con agua operando en régimen pulsado. Se usó una geometría tipo alambre-plano con el electrodo plano sumergido en agua. La descarga fue alimentada a través de una fuente pulsada tipo capacitiva, capaz de proveer un tren periódico de pulsos de alto voltaje ( $\sim 15$  kV) y corta duración  $\sim 100$  ns, con una frecuencia de repetición de 40 pulsos/s. Se reportan y discuten resultados de las mediciones de voltaje y corriente de la descarga para diferentes condiciones de operación, y se infieren la potencia instantánea y la energía disipada en el plasma generado. Se muestran además fotografías con largos tiempos de exposición de la descarga pulsada.

*Palabras Clave:* descargas no-térmicas, tratamiento de agua, descarga corona pulsada.

The large number of works published in recent years on non-thermal discharges in (and in contact with) liquids, shows the growing interest in this particular field of electric discharges due to the large number of technological applications. In particular, one of the fastest growing emerging applications is the treatment of water, both for its purification and for its activation, with a view to carrying out the indirect treatment of food and seeds with non-thermal discharges; without the addition of chemicals. In this work, the experimental characterization of a corona discharge in contact with water operating in a pulsed regime is presented. A flat-wire type geometry was used with the flat electrode immersed in water. The discharge was powered through a pulsed capacitive type source, capable of providing a periodic train of high voltage pulses ( $\sim 15$  kV) with short duration ( $\sim 100$  ns), with a repetition frequency of 40 pulses/s. The results of discharge voltage and current measurements are reported and discussed for different operating conditions, and the instantaneous power and energy dissipated in the generated plasma are inferred. Photographs in the visible with long exposure times of the pulsed discharge are also shown.

*Keywords:* non-thermal discharge, water treatment, pulsed corona discharge.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.fluidos.6>



ISSN 1850-1168 (online)

## I. INTRODUCCIÓN

Un plasma es un gas parcial o totalmente ionizado consistente en una mezcla de electrones, iones y partículas neutras. Un gas ionizado se considera como un plasma, únicamente si la cantidad de carga positiva y negativa se balancea mutuamente (el plasma debe ser aproximadamente neutro en su conjunto [1]).

El modo más usual de generación de plasmas a escala de laboratorio es a través de la utilización de descargas eléctricas en un gas ('descargas gaseosas') [1]. Sin embargo, en los últimos años la generación de plasmas utilizando descargas eléctricas en (y en contacto con) líquidos se ha convertido en un área muy activa de la física del plasma y la tecnología; no únicamente por la riqueza de la física y química involucradas, sino también por el gran número de aplicaciones tecnológicas [2]. En particular, una de las aplicaciones más relevantes es la purificación de agua a través de la destrucción de compuestos orgánicos sin la necesidad del agregado de agentes químicos [3, 4]. Las especies reactivas del plasma en fase gaseosa ingresan en el medio líquido por difusión, o son producidas en la interfase gas-líquido, produciendo la degradación de los contaminantes.

La descarga tipo corona (en fase gaseosa) es una descarga no-térmica que usualmente aparece a presión atmosférica cerca de electrodos con poco radio de curvatura (o con puntas), donde el campo eléctrico local es suficientemente elevado para sustentar un grado de ionización apreciable. Típicamente las potencias de operación de las descargas corona resultan muy pequeñas ( $\sim 1$  W) para resultar tecnológicamente atractivas. Si el voltaje aplicado crece aún más,

La descarga tipo corona (en fase gaseosa) es una descarga no-térmica que usualmente aparece a presión atmosférica cerca de electrodos con poco radio de curvatura (o con puntas), donde el campo eléctrico local es suficientemente elevado para sustentar un grado de ionización apreciable. Típicamente las potencias de operación de las descargas corona resultan muy pequeñas ( $\sim 1$  W) para resultar tecnológicamente atractivas. Si el voltaje aplicado crece aún más,

\* njmilardovich@gmail.com

el campo eléctrico en el resto del gas puede alcanzar el umbral de ruptura y se produce la transición de la descarga hacia una chispa ('spark') [5]. Sin embargo, es posible incrementar considerablemente el voltaje y consiguientemente la potencia de la descarga corona sin la formación de chispas, usando pulsos periódicos de voltaje de corta duración ( $\sim 100$  ns). Estas descargas coronas pulsadas son capaces de operar con niveles de potencia mucho más elevados y generar consiguientemente altas concentraciones de partículas reactivas en el plasma, habiendo demostrado ser altamente eficientes para la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa cuando operan en (o en contacto con) agua [6].

En este trabajo se reportan resultados preliminares de la caracterización eléctrica de una descarga corona en contacto con agua operando en régimen pulsado.

## II. ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental utilizado se muestra en la Fig. 1.

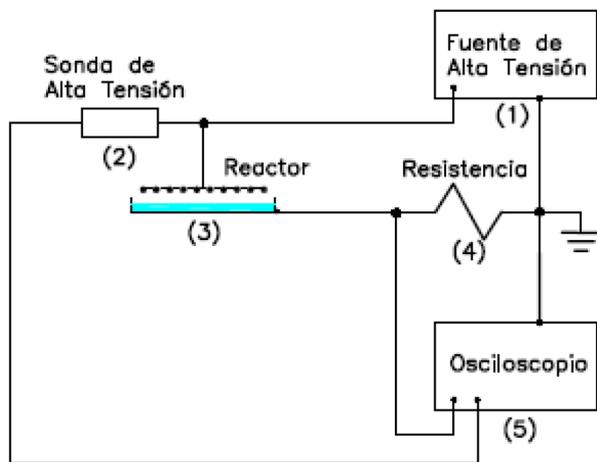


FIG. 1: Arreglo experimental.

La fuente de alta tensión (1) permite obtener pulsos con un ancho temporal típico de  $\sim 100$  ns, amplitudes de  $\sim 15$  kV, y una frecuencia de repetición de pulsos  $\sim 40$  pulsos/s. La misma fue diseñada y construida especialmente para estos fines y su funcionamiento se basa en la carga de un banco de condensadores (230 nF) a tensiones de 1500 Vcc, y su posterior descarga con la ayuda de un tiristor sobre un transformador de pulsos con núcleo de ferrita. La medición de los pulsos de alta tensión (AT) de la fuente se realizaron a través de una sonda de AT (2) con una atenuación 1000X (Tektronix P6015A). El reactor (3) está formado por un ánodo que consiste en un bastidor de aluminio de forma cuadrangular ( $100 \times 100$  mm) y centro hueco, de manera de reducir su capacidad parásita. Los bordes del bastidor fueron redondeados para reducir la intensidad del campo eléctrico sobre los mismos. En su parte inferior se dispuso un arreglo de 10 alambres tensados de acero inoxidable AISI 304 con un diámetro de 0.27 mm. Por otro lado, el cátodo consiste en una bandeja también construida en AISI 304 en la que se ubica el agua a tratar en forma de lámina delgada. El electrodo anódico se ubica en forma paralela y centrada respecto del electrodo catódico, a una distancia (gap) ajustable entre 8 y 15 mm medidos desde el fondo de

la bandeja. La medición de la corriente de la descarga fue realizada utilizando una resistencia shunt (4), tipo coaxial de  $0.25 \Omega$  de muy baja inductancia (T&M SDN-414-025, 1200 MHz), ubicada en la rama aterrizada del circuito. Las señales de corriente y tensión fueron registradas empleando un osciloscopio (5) con una velocidad de muestreo 1 GS/s (Tektronix TDS 2004C). A los efectos de reducir la interferencia electromagnética causada por la fuente pulsada sobre el circuito de medición, el reactor de plasma (3) y la resistencia (4) se ubicaron dentro de jaulas de Faraday. Todas las conexiones eléctricas vinculadas con estas jaulas se ejecutaron a través de cables coaxiales RG-58 con los correspondientes conectores BNC. Debido a la diferencia de longitud entre las líneas de medición (el cable coaxial utilizado para la medición de corriente tiene una longitud de aproximadamente 1.5 m, mientras que el cable de la sonda de voltaje tiene 3 m) se midió un retraso de aproximadamente 10 ns de la señal de tensión respecto de la de corriente.

En la Fig. 2 se muestra una fotografía (4000  $\times$  6000 pixeles) de la descarga corona pulsada obtenida para un tiempo de exposición de 30 s.

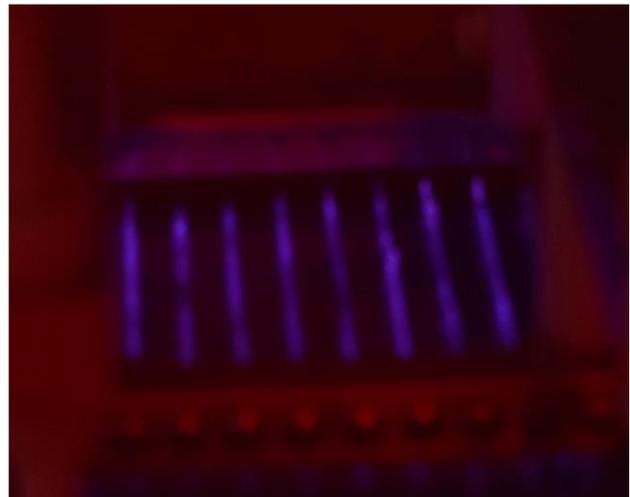


FIG. 2: Fotografía con largo tiempo de exposición de la descarga corona pulsada.

## III. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

Los resultados mostrados se obtuvieron con el reactor operando con  $100 \text{ cm}^3$  de agua destilada (conductividad eléctrica  $\sim 5 \mu\text{S/cm}$ ) formando una capa delgada de aproximadamente 5 mm.

En la Fig. 3 se muestran las señales de tensión  $V$  aplicada sobre el reactor y corriente de la descarga  $I$  para un gap de 8 mm. Se observan fuertes picos de corriente de unos 25 A y un ancho temporal  $\sim 50$  ns. El primer pico menor de corriente es solo capacitivo (indicado con una flecha en Fig. 3). La corriente de plasma del pico subsiguiente es algo mayor que el de la corriente total mostrada, debido a que la corriente capacitiva ( $C_g dV/dt$ ) es negativa en ese instante. La capacidad geométrica del reactor  $C_g$  para los diferentes gaps se calculó en base a los oscilogramas de corriente y tensión bajo condiciones de no ignición de la descarga corona; resultando:  $C_g = 11$  pF para un gap de 15 mm, 13 pF para 12 mm, 15 pF para 10 mm y 19 pF para 8 mm.

Notar que la Fig. 3 muestra un breakdown gaseoso con un

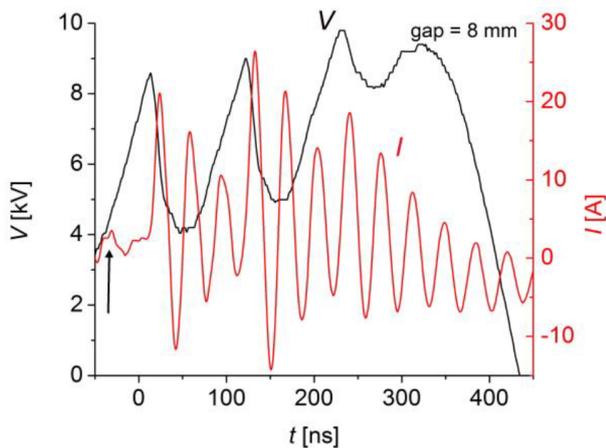


FIG. 3: Oscilogramas de corriente y voltaje de la descarga.

electrodo (el cátodo) líquido. Antes de la ignición, la descarga es esencialmente capacitiva. La capacidad está formada por la capacitancia del gas en serie con la del líquido (esta última mucho más grande que la primera). Durante la carga del capacitor, debido al pulso de voltaje, algunos streamers primarios (positivos) en fase gaseosa se inician desde los alambres. En este punto, la descarga es parcialmente disipativa. Sin embargo, la parte resistiva del streamer es únicamente el canal ionizado entre la cabeza del streamer y el alambre; entre la cabeza del streamer y la superficie de la interfase gas-líquido, puede fluir únicamente corriente de desplazamiento a través del capacitor gaseoso. El plasma puede ser visto entonces como una impedancia gaseosa variable con el tiempo, formada por una combinación serie de un capacitor y una resistencia variables en el tiempo, más un capacitor constante representado por el agua. Notar que los campos eléctricos de breakdown típicos en el agua (para descargas pulsadas) es  $\sim 1$  MV/cm, esto es,  $\sim 30$  veces más grande que el campo de breakdown para aire a presión atmosférica [7]. Debido a que los voltajes y campos eléctricos aplicados son pequeños para sustentar o generar independientemente plasma en el volumen líquido, la capacitancia líquida es constante. Cuando el streamer primario cruza el gap gaseoso y toca el agua, o cuando agota sus reservas de ionización y se detiene a mitad de camino, se alcanza el pico de corriente. Debido a que la resistencia del canal del plasma es considerablemente menor que la impedancia capacitiva entre la cabeza del streamer y el agua, la amplitud del pico de corriente dependerá de la longitud alcanzada por los streamers. La presencia del agua (medio dieléctrico) evita la formación de streamers secundarios (streamers iniciados en el canal residual de plasma dejado por los streamers primarios cuando estos cortocircuitan los electrodos).

La Fig. 4 muestra la impedancia característica del plasma ( $= VI^{-1}$ ) para un gap de 8 mm. Para simplificar la interpretación, se consideró únicamente la corriente de partículas  $I_p$  (calculada restando la contribución de la corriente capacitiva de la señal medida de corriente) en los primeros 40 ns de la descarga. También se muestran las señales de corriente de plasma y tensión aplicada. Se observa que la impedancia cae rápidamente y alcanza una fase de impedancia mínima ( $\sim 300 \Omega$ ) en el instante en que los streamers han alcan-

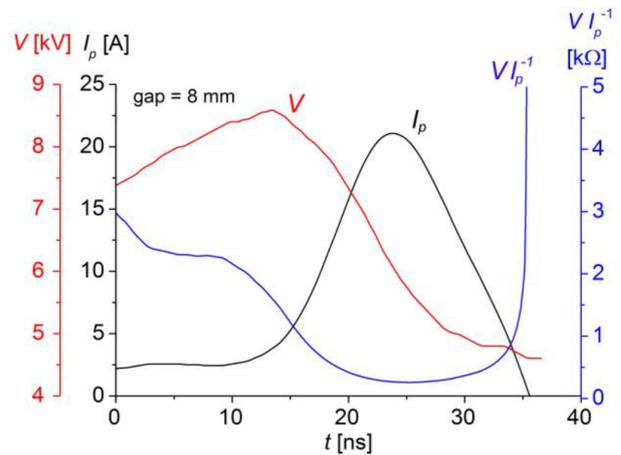


FIG. 4: Impedancia característica calculada del plasma.

zando su máxima longitud. Luego de la extinción del plasma la impedancia vuelve a subir rápidamente. El tiempo de subida de señal de corriente ( $\sim 10$  ns) puede asociarse con el tiempo de tránsito de los streamers primarios en el gap gaseoso ( $\sim 1$  mm). La velocidad media de propagación resulta  $\sim 0.1$  mm/ns.

La dependencia de la impedancia del plasma con el incremento del gap se muestra en la Fig. 5. Se observa un marcado corrimiento hacia tiempos mayores del instante en que los streamers alcanzan el pico de corriente. Se observa además un notable incremento de la impedancia del plasma. Este comportamiento se debe al debilitamiento del campo eléctrico reducido entre electrodos conforme aumenta el gap. Con la disminución del campo eléctrico decrece la probabilidad de ignición y entonces los streamers aparecen más tarde y son más cortos, a su vez, se produce una disminución en la conductividad, diámetro y velocidad de propagación de los streamers; disminuyendo además la cantidad de streamers que pueden generarse en paralelo desde los alambres. El aumento de la impedancia del plasma evita una eficiente transferencia de energía desde la fuente pulsada al plasma [8].

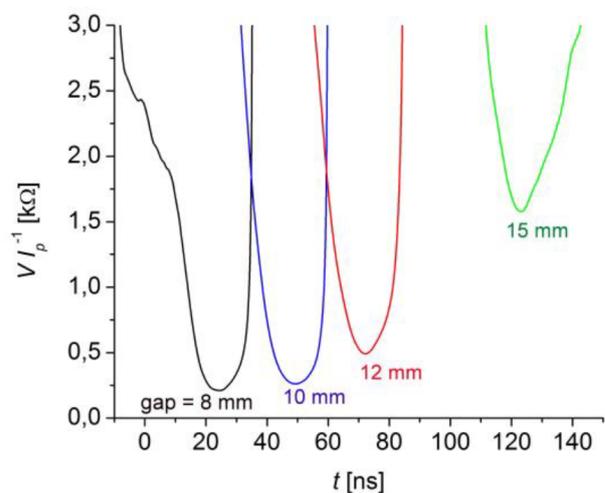


FIG. 5: Impedancia del plasma en función del gap.

En la Fig. 6 se muestran la potencia eléctrica y la energía de la descarga corona. La potencia es el producto ( $VI$ )

de las señales medidas de tensión y corriente, mientras que la energía se calculó como la integral temporal de ese producto. La potencia refleja las oscilaciones de la corriente mostradas en la Figura 1. Se observa que la energía disipada en el plasma durante un pulso alcanza unos 10 mJ para el gap de 8 mm. Experimentos realizados con el mismo gap (8 mm) pero sin agua, permitieron inferir un nivel de disipación de energía en el plasma de unos 6 mJ, sensiblemente menor a la obtenida en presencia del agua. Este resultado parece indicar que los streamers en realidad se detienen antes de tocar la superficie del agua. Notar que la constante dieléctrica del agua destilada ( $\sim 80$ ) es grande comparada con la del aire ( $\sim 1$ ), y en consecuencia resulta esperable que la energía disipada por la descarga disminuya si la impedancia capacitiva aumenta.

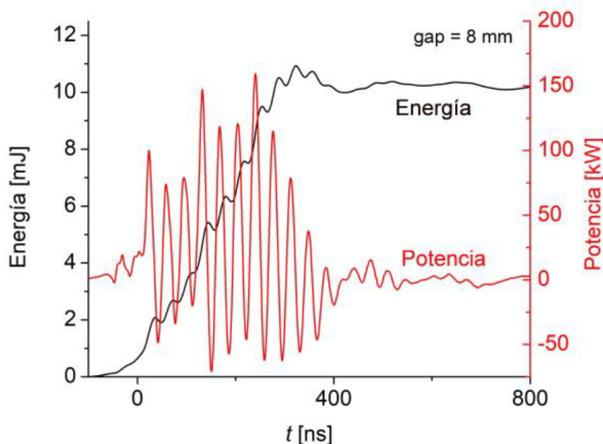


FIG. 6: Potencia y energía de la descarga corona.

La Fig. 7 muestra la dependencia entre la energía disipada en el plasma con el incremento del gap. El comportamiento aquí es consistente con el mostrado en la Fig. 5. En particular, la energía por pulso disipada en el plasma crece fuertemente con la disminución del gap debido a la disminución significativa de la impedancia del plasma, mejorando en consecuencia la eficiencia energética del proceso. Sin embargo, el aumento de la eficiencia del proceso a través de la disminución del gap se encuentra limitada por la transición streamer–spark, que reduce apreciablemente la eficiencia de las reacciones químicas en fase gaseosa. Ensayos mostraron que la transición streamer–spark aparece en el reactor estudiado para un gap  $< 7$  mm.

Los resultados mostrados indican que la eficiencia energética actual del reactor es muy baja. Una fracción  $< 5\%$  de la energía contenida en el banco de capacitores formador de pulsos es finalmente disipada en el plasma. La causa fundamental es el bajo voltaje aplicado a la descarga. Para obtener una buena adaptación de impedancias entre la impedancia de la fuente y la del plasma se requiere que el plasma resulte lo más resistivo posible. Los esfuerzos futuros en este sentido se orientarán en mejorar el acoplamiento de impedancias entre la fuente pulsada y el reactor a través del aumento del voltaje del pulso aplicado.

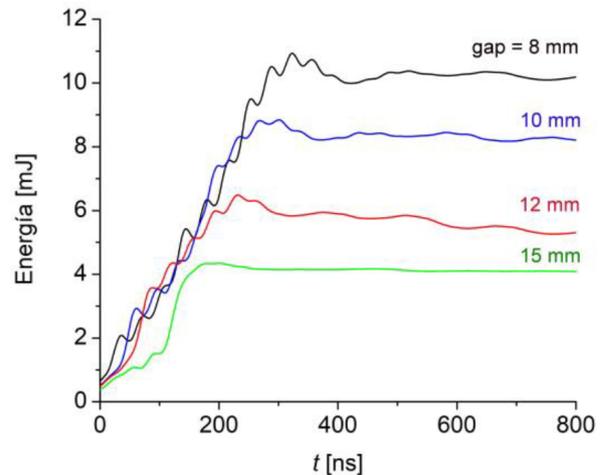


FIG. 7: Energía de la descarga en función del gap.

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha estudiado experimentalmente una descarga corona pulsada en fase gaseosa en contacto con agua. De los resultados obtenidos se puede inferir que:

1. El comportamiento del plasma puede considerarse como una impedancia compuesta por una combinación serie de un capacitancia y resistencias variables con el tiempo.
2. La optimización de la entrega de energía de la fuente al reactor se ve dificultada por el carácter dinámico de la impedancia. Altas eficiencias requieren un plasma tan resistivo como sea posible.
3. Los resultados sugieren que los streamers originados desde los alambres se mueven con velocidades medias de 0.1 mm/ns y se detienen antes de llegar al agua.
4. Los resultados indican que la energía por pulso entregada al plasma alcanza los 10 mJ para un gap de 8 mm, decreciendo hasta 4 mJ cuando el gap llega a los 15 mm.
5. Los esfuerzos futuros se deben enfocar en mejorar el acoplamiento de impedancias entre la fuente pulsada y el reactor.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parcialmente subsidiado con fondos UTN (PID 5418 y 5447) y de Agencia (PICT 2018-00702). M. F. agradece a CONICET por su beca doctoral. J. C. C. agradece a CONICET por su beca posdoctoral.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. P. Raizer. *Gas discharge physics* (Springer, Berlin, Germany, 1991).
- [2] P. J. B. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology* **25**, 053002 (2016).
- [3] J. E. Foster. Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future. *Physics of Plasmas* **24**, 055501 (2017).

- [4] M. A. Malik, A. Ghaffar y S. A. Malik. Water purification by electrical discharges. [Plasma Sources Science and Technology](#) **10**, 82-91 (2001).
- [5] A. Fridman, A. Chirokov y A. Gutsol. Non-thermal atmospheric pressure discharges. [Journal of Physics D: Applied Physics](#) **38**, R1-R24 (2005).
- [6] M. A. Malik. Water Purification by Plasmas: Which Reactors are Most Energy Efficient? [Plasma Chemistry and Plasma Processing](#) **30**, 21-31 (2009).
- [7] P. Bruggeman y C. Leys. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. [Journal of Physics D: Applied Physics](#) **42**, 053001 (2009).
- [8] T. Huiskamp. Nanosecond pulsed streamer discharges Part I: Generation, source-plasma interaction and energy-efficiency optimization. [Plasma Sources Science and Technology](#) **29**, 023002 (2020).