

# Montaje y caracterización de un reactor para el tratamiento de aguas contaminadas combinando plasma no térmico con $\text{TiO}_2$

Facundo Otero Zappa y Julián Szereszewski

Laboratorio 6

Depto. de Física – FCEyN – UBA

Agosto del 2024

## ALUMNOS:

Facundo Otero Zappa – LU N°: 339/20 – E-mail: [facuotero20.88@outlook.com](mailto:facuotero20.88@outlook.com)

Julián Szereszewski – LU N°: 118/20 – E-mail: [julianszere@gmail.com](mailto:julianszere@gmail.com)

## LUGAR DE TRABAJO:

Universidad de Buenos Aires (UBA), Instituto de Física Interdisciplinaria y Aplicada (ex INFIP) (INFINA), Ciudad Universitaria, Pabellón 1, 1428 Buenos Aires, Argentina.

## DIRECTORA DEL TRABAJO:

Diana Grondona – E-mail: [grondona@df.uba.ar](mailto:grondona@df.uba.ar)

## CODIRECTOR:

Matías Zanini – E-mail: [mzanini@df.uba.ar](mailto:mzanini@df.uba.ar)



Facundo Otero Zappa



Julián Szereszewski



Dra. Diana Grondona



Lic. Matías Zanini

## Resumen

La remediación del agua se ha convertido en un tema de creciente interés en todo el mundo debido a la necesidad de recuperar y reutilizar las aguas residuales en muchos sectores, como la agricultura y el reciclaje industrial. La tecnología del plasma no térmico es una técnica prometedora para la remediación del agua y se ha convertido en un campo de intensa investigación. En el plasma no térmico se generan especies altamente reactivas como O, OH, O<sub>3</sub>, así como también radiación UV. Esta tecnología combina la contribución de especies activas y condiciones físicas que han demostrado una gran eficiencia en la degradación de muchos compuestos orgánicos, así como en la destrucción e inactivación de virus y bacterias.

En este trabajo se presenta el montaje de un reactor de plasma trielectródico para el tratamiento de aguas contaminadas. En el reactor, se genera una descarga de barrera dieléctrica (DBD) en el aire ambiente mediante la aplicación de alta tensión alterna entre dos electrodos planos fijados a lados opuestos de un material dieléctrico. A una distancia de unos pocos centímetros, se fija a un canal por el que circula el agua a tratar un tercer electrodo conectado a tierra. Al elevar el potencial del sistema de electrodos DBD con un alto voltaje continuo, los microcanales de plasma no térmico generados en la DBD se propagan hacia el tercer electrodo y alcanzan la superficie del agua.

Este diseño es escalable ya que permite la conexión en paralelo de varios sistemas de electrodos DBD para la generación de múltiples descargas sucesivas a lo largo del canal por el cual fluye el agua a tratar. El funcionamiento del reactor, en términos de eficiencia de eliminación y rendimiento energético, se evaluó mediante el tratamiento de una solución acuosa de azul de metileno. Se presentan también resultados preliminares combinando el tratamiento con plasma con recubrimientos de TiO<sub>2</sub> ubicados sobre el canal de circulación del agua en la zona de la descarga.

## I. Introducción

La *contaminación del agua* se produce cuando un contaminante afecta negativamente a su función, produciendo diversos problemas como la degradación de ecosistemas acuáticos, la propagación de enfermedades, o la reducción de servicios ecosistémicos como el agua dulce [1]. Este tipo de contaminación es debida usualmente a la actividad humana [2]. Por otra parte, el agua dulce es un recurso escaso, representando únicamente el 2.5 % del agua total de la Tierra. De este porcentaje, tan solo el 0.3 % se encuentra en forma líquida en su superficie [3] y alrededor del 70 % del consumo humano está destinado únicamente a la agricultura [4].

Debido a la gran preocupación que genera la escasez del agua potable a nivel mundial y al aumento indiscriminado de contaminantes presentes en ella producto de actividades humanas, el estudio de diversos métodos para su tratamiento ha ido tomando gran importancia en los últimos años. Uno de ellos es la tecnología de *plasma*, una técnica de oxidación avanzada que es compatible con el medio ambiente, ya que presenta una temperatura operativa baja, no requiere la adición de productos químicos y tiene una alta eficiencia energética [5-6]. No obstante, para su uso comercial e implementación a gran escala en el sector industrial hay diversas dificultades técnicas y económicas a superar, por lo que este campo se encuentra todavía en etapa de investigación.

El plasma es un estado fundamental de la materia que se caracteriza por la presencia de porciones significativas de partículas cargadas en cualquier combinación de iones o electrones y es la forma más abundante de materia ordinaria en el universo [7]. Se denomina *plasma no térmico* (NTP, por sus siglas en inglés) o *plasma frío* a un tipo de plasma con bajo grado de ionización que no se encuentra en equilibrio termodinámico ya que la temperatura de sus electrones es mucho mayor que la temperatura de sus iones o átomos neutros. En tecnologías de plasma, existe un gran número de reactores de NTP de diferentes geometrías para el tratamiento de distintos contaminantes presentes en agua. Mientras que en algunos reactores se realizan descargas eléctricas en electrodos sumergidos en el agua a remediar, en otros la descarga se realiza en el aire, actuando de manera superficial sobre el agua [8-9]. En este tipo de reactores, la mayoría de la energía eléctrica suministrada produce la aceleración de los electrones libres del aire, cuya energía suele ser de 1 eV y cuya temperatura llega a los 10000 K [10]. Los electrones altamente energéticos de estas descargas desencadenan una serie de procesos de ionización y excitación

del plasma que permiten la formación de radicales libres reactivos y especies no térmicas, como oxígeno atómico (O), radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), peróxidos y radiación ultravioleta. Este proceso ha mostrado rapidez y eficiencia a la hora de degradar y descomponer diversos compuestos orgánicos como pesticidas, productos farmacéuticos, productos químicos tóxicos, y la destrucción e inactivación de virus y bacterias, sin generar subproductos tóxicos o dañinos para la salud.

En el laboratorio de Descargas Eléctricas a Presión Atmosférica, se montó un reactor de plasma trielectródico para el tratamiento de aguas contaminadas. En el reactor, se genera una *descarga de barrera dieléctrica (DBD)* en el aire ambiente mediante la aplicación de alta tensión alterna entre dos electrodos planos fijados a lados opuestos de un material dieléctrico. A una distancia de unos pocos centímetros, se fija a un canal por el que circula el agua a tratar un tercer electrodo conectado a tierra. Al elevar el potencial del sistema de electrodos DBD con un alto voltaje continuo, los microcanales de plasma no térmico generados en la DBD se propagan hacia el tercer electrodo y alcanzan la superficie del agua, produciéndose especies reactivas como las mencionadas anteriormente [11]. Empleando esta configuración, se trabajó en el tratamiento de soluciones acuosas del herbicida 2,4-D obteniéndose muy buenos resultados en la eliminación del contaminante [12].

Para mejorar la eficiencia de estos tratamientos, se propone montar un reactor híbrido, donde en el canal de circulación del agua a tratar se colocan piezas de vidrio recubiertas con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) como material fotocatalizador. De esta forma, las piezas de titanio son activadas por la radiación ultravioleta emitida por el mismo plasma producido en el reactor. Cuando el  $\text{TiO}_2$  es iluminado con radiación cuya energía es igual o mayor que el band gap del material (3,2 eV), la absorción de un fotón produce un par hueco-electrón que promueve reacciones de oxidación y reducción en la superficie. Se ha observado que el  $\text{TiO}_2$  bajo iluminación UV presenta una alta eficiencia fotocatalítica en la inactivación de microorganismos y en la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos, siendo los films de dióxido de titanio cristalinos con alto porcentaje de fase anatasa los que han presentado mayor fotoactividad [13].

En este trabajo se optimizó el diseño del reactor y se lo caracterizó eléctricamente midiendo tensión, corriente y evaluando la potencia de operación para diferentes configuraciones. Asimismo, se evaluó el funcionamiento del reactor, en términos de eficiencia de eliminación y rendimiento energético mediante el tratamiento de una solución acuosa de azul de metileno. Se presentan también resultados preliminares combinando el tratamiento con plasma con recubrimientos de  $\text{TiO}_2$  ubicados sobre el canal de circulación del agua en la zona de la descarga.

## II. Dispositivo Experimental

### A. Reactor Trielectródico Híbrido

En este trabajo se partió del diseño de un reactor de NTP trielectródico realizado por alumnos de laboratorio 6 y 7 en el año 2023 [14]. Se montó un reactor híbrido para tratar aguas contaminadas como se muestra esquematizado en la Fig. 1.

Para producir el NTP, en el reactor se genera una DBD entre los electrodos E1 y E2 aplicando alta tensión alterna generada por una fuente AC que consiste en un generador de función (Sinometer VC2002) conectado a un amplificador de audio (SKP MAX G1400) acoplado a una bobina de alta tensión. Junto al E2 se conecta una fuente de tensión continua DC (Protomax HY3005D-3) que eleva a todo el circuito en un rango de tensiones  $V_{\text{DC}} = (7-10) \text{ kV}$  dependiendo de la experiencia realizada, y genera el campo eléctrico necesario para extender la región de la DBD hacia el E3. El electrodo a tierra E3 se coloca a centímetros del sistema E1-E2 para que los streamers de plasma alcancen la superficie del agua a tratar. En su superficie, se ubica alineada con el sistema de electrodos una pieza de vidrio recubierta con  $\text{TiO}_2$  (sintetizada mediante la técnica de arcos catódicos) para actuar como material fotocatalizador y promover las reacciones de oxidación y reducción en la superficie del agua contaminada. El reactor permite la conexión en paralelo de hasta ocho pares de electrodos E1-E2, cuyos extremos encastran a presión en el reactor y se encuentran en contacto con el ramal de la fuente AC.

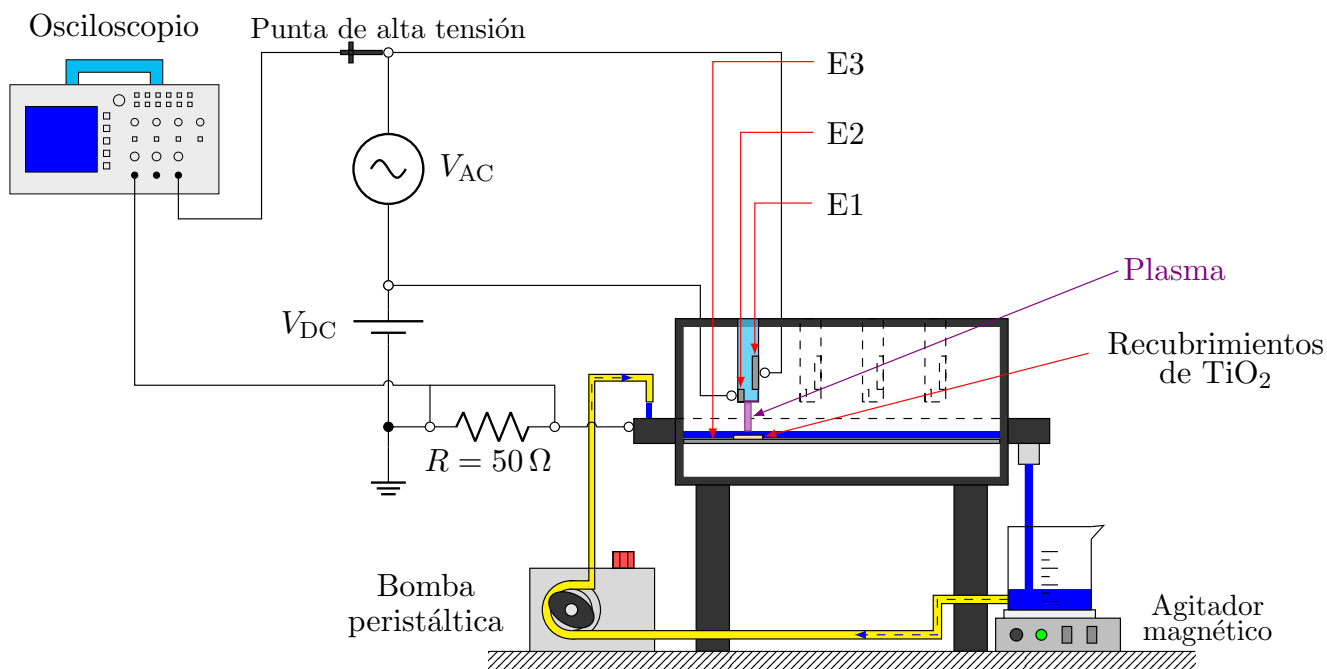


Figura 1: esquema del dispositivo experimental utilizado.

Se trabajó para la fuente alterna en un rango de tensiones pico a pico  $V_{AC} = (11-16)$  kV dependiendo de la experiencia y con una frecuencia aproximada de 8 kHz. Ésta se encuentra determinada por la resonancia del sistema del reactor en su conjunto, que puede asociarse a un circuito equivalente con partes capacitivas, resistivas e inductantes como un RLC.

Para la caracterización eléctrica del reactor, se mide tensión y corriente con un osciloscopio Tektronix TBS1104 digital de cuatro canales (100 MHz, 1 GS/s), donde la tensión se obtiene con una punta de alto voltaje Tektronix P6015A (1000X, de 3 pF y 100 M $\Omega$ ). La corriente de streamers entre el sistema de electrodos E1 y E2, o  $I_{dbd}$ , es despreciable frente a la corriente que cruza al tercer electrodo [12], denominada  $I_{str}$ . Por esta razón, se mide únicamente ésta última a la salida de E3 por la caída de potencial en una resistencia de 50  $\Omega$ .

Por la acción de una bomba peristáltica Apema PC25-10-F-S de Clase 1 (10 W) circula el agua a tratar con un caudal de 1 ml/s y con una profundidad en la canaleta de 1 mm. Se elige esta configuración debido a que, como se mencionó en la introducción, la descarga efectuada actúa en el agua contaminada de forma superficial. La solución llega hasta una canilla y cae en un vaso de precipitado que se encuentra apoyado sobre un agitador magnético ArcanO HJ-3 (2 A) que permite su homogeneización. El agua recircula varias veces por el reactor a lo largo del tratamiento.

## B. Sistema de electrodos DBD

El sistema de electrodos E1-E2 que generan la DBD se compone de dos placas de acero inoxidable separadas por un dieléctrico. En la cara frontal del dieléctrico, con forma rectangular, se encuentra ubicado el E1. En la cara opuesta, con forma de “L”, se encuentra el E2. Ambos electrodos pueden verse representados en la Fig. 2.

Como materiales dieléctricos en esta configuración se emplearon acrílico y teflón. Para la correcta colocación del electrodo E1 sobre el dieléctrico se realizó un rectificado que funciona como guía y que deja 6 mm de distancia con el borde para formar la DBD en la parte inferior del rectificado. Por otro lado, en el dorso del dieléctrico, el E2 se encastra en el rectificado trasero sin dejar espacios libres.

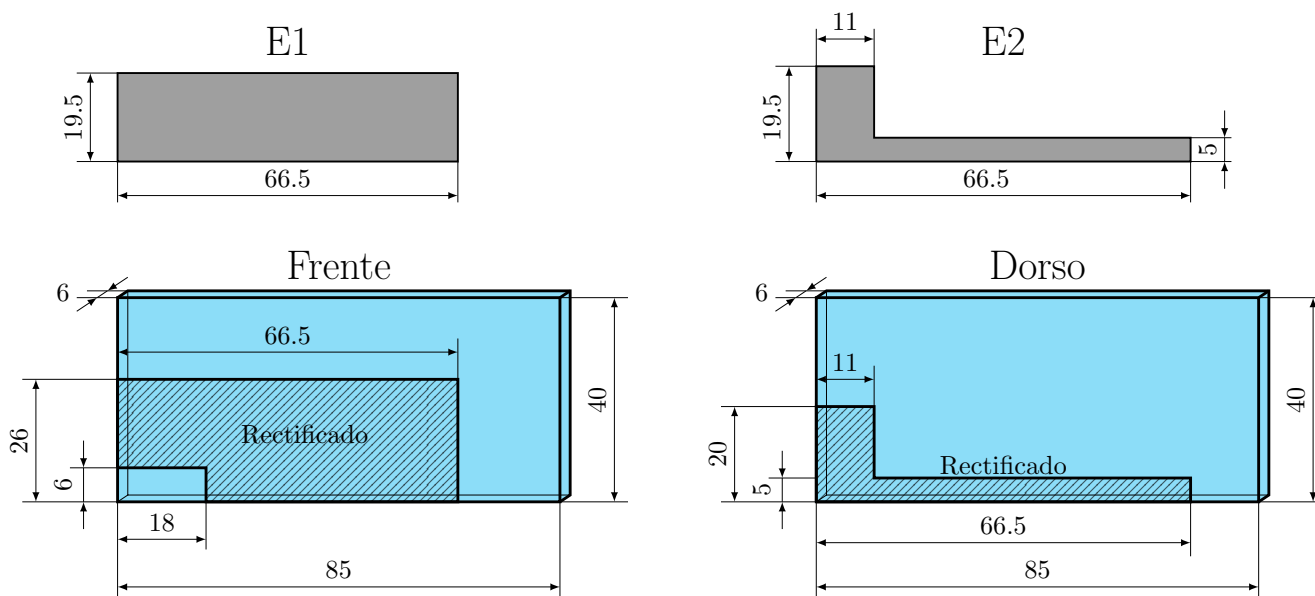


Figura 2: esquema del sistema de electrodos DBD utilizando acrílico o teflón como material dieléctrico. Las medidas se encuentran en mm.

En trabajos anteriores, por encima de estos electrodos se aplicaba una gran capa de pegamento epoxy que los mantenía unidos al dieléctrico. La gran cantidad presente de esta sustancia era responsable de la generación de burbujas de aire, y por lo tanto, de la generación de descargas indeseadas. Para optimizar este diseño y reducir la cantidad de pegamento del sistema E1-E2, se diseñaron dos tapas de acrílico de 5 mm de espesor para fijar los electrodos. En la cara frontal del acrílico se utiliza una tapa en forma de "U" invertida, mientras que para la cara trasera se agrega una tapa en forma rectangular, tal y como se muestra en la Fig. 3 (en verde). Estas tapas son adheridas al acrílico con una leve capa de pegamento. Además, en el rectificado de la cara frontal, la tapa en forma de "U" cuenta con un soporte de acrílico de  $6 \times 18$  mm para mayor adherencia.

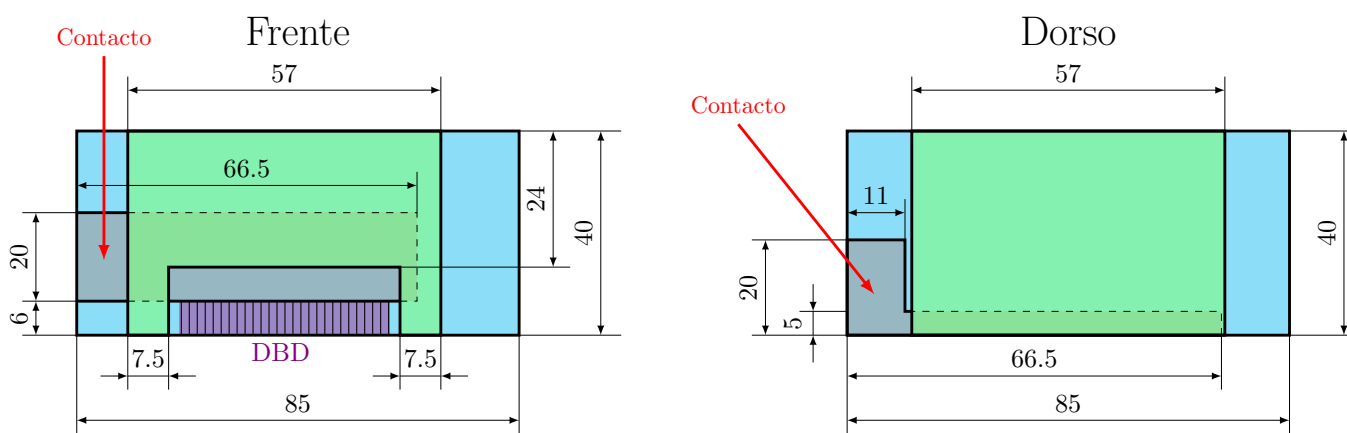


Figura 3: esquema representativo del diseño de tapas (en verde) para fijar los electrodos E1 y E2 (en gris) a los acrílicos (en celeste). En violeta, se muestra la zona donde se genera la DBD. Las medidas se encuentran en mm.

En la Fig. 3 puede apreciarse en el extremo izquierdo de ambas caras del sistema de electrodos DBD, la zona de encastre con las ranuras del reactor. Se puede notar que la forma de "L" del E2 permite una mayor área de contacto.

Por último, se estudió también un sistema de electrodos implementando vidrio como material dieléctrico. Para ello, se le realizó un rectificado más profundo al dieléctrico de acrílico. En particular, se aumentó en 1 mm el rectificado en la cara frontal y en este espacio se insertó una pieza rectangular de vidrio, luego se colocó el electrodo E1 y las tapas de acrílico por encima. Se mantuvo el diseño de la cara trasera.

### III. Resultados Y Análisis

#### A. Caracterización eléctrica del reactor

En la Fig. 4 se muestran señales típicas de corriente (en verde) y voltaje (en rojo) alimentando al sistema con  $V_{AC} = (15,0 \pm 0,2)$  kV pico a pico de tensión alterna. Se observa que la corriente presenta picos correspondientes a la corriente de streamers  $I_{str}$  medida a la salida del E3.

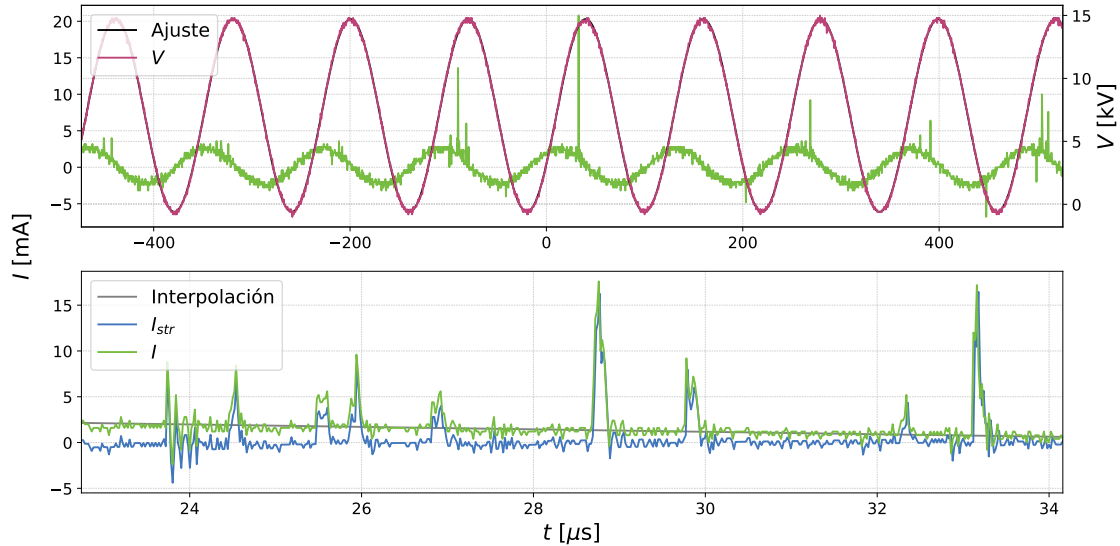


Figura 4: señales típicas de la corriente (en verde) y el voltaje (en rojo) alimentando al sistema con  $V_{AC} = (15,0 \pm 0,2)$  kV pico a pico. En la figura inferior se observa una vista ampliada de las señales, donde se muestra la corriente de streamers  $I_{str}$  normalizada (en azul).

La potencia eléctrica es un parámetro importante del sistema ya que da una idea de la eficiencia energética del tratamiento. Para calcularla, se define a la potencia media como:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_{str} V dt,$$

donde  $T$  es el período,  $I_{str}$  la corriente de streamers y  $V = V_{AC} + V_{DC}$  es la diferencia de potencial entre los electrodos E1 y E3. Para obtener el período, es necesario tomar una medición donde se aprecie el comportamiento sinusoidal del voltaje y así poder realizarle un ajuste. Luego se aumenta la resolución temporal para definir más precisamente a los picos de corriente, que se detectan cuando los streamers cruzan del sistema E1-E2 al E3. Sin embargo, sobre esta señal ampliada todavía hay que suprimir la componente senoidal, que da cuenta de las corrientes capacitivas y no de la corriente de streamers. Para ello, se toman como referencia al primer y último pico de la corriente y se interpola una recta entre estos dos puntos. Luego se resta esta señal de base a la señal de corriente y de ahí se obtiene  $I_{str}$  normalizada, como se muestra en la Fig. 4 (en azul).

Con este procedimiento, utilizando una tensión continua de 10 kV se calculó la potencia promedio para los sistemas de electrodos de acrílico, teflón y vidrio, descriptos en la sección anterior. Dichos resultados pueden observarse en la Fig. 5, donde se grafica la potencia en función del voltaje pico a pico. Las mediciones se tomaron dentro del rango de funcionamiento de los sistemas de electrodos (es decir, donde no producían chispas). Cabe notar que el vidrio fue el material dieléctrico con mayor rango de funcionamiento, siendo que el teflón y el acrílico no siempre generaban una DBD uniforme. Esto se debe a que la superficie del vidrio es más uniforme que la de los otros materiales, lo cual evita la generación de canales preferenciados por donde se formen streamers. Por otro lado, puede observarse en la Fig. 5 que el sistema de electrodos de teflón requería menos tensión que el de vidrio para alcanzar la misma potencia, necesitando el acrílico un valor de tensión intermedio entre ambos. Esto tiene sentido notando que la constante dieléctrica del teflón es menor a la del vidrio [15], con lo cual más voltaje es necesario para generar la DBD.

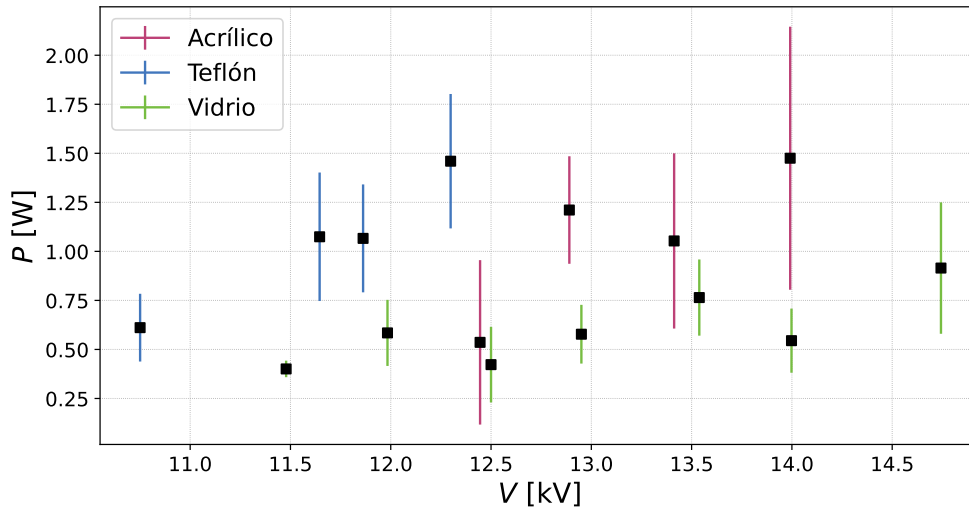


Figura 5: potencia promedio para distintos materiales dieléctricos a diferentes tensiones.

## B. Estudio del azul de metileno

Con el fin de evaluar la eficiencia en la remoción de contaminantes del reactor, se utilizaron soluciones de *azul de metileno* ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ) diluido en agua Milli-Q, que representa un buen prototipo de agua contaminada [9].

En el laboratorio se cuenta con un espectrofotómetro BioTraza Modelo 721 para medir la absorbancia de diferentes muestras. Con éste se midió el espectro de absorción de azul de metileno para una concentración de 10 ppm, como se observa en la Fig. 6a. Para obtener dicha solución se pesaron  $(10,0 \pm 0,2)$  mg de azul con una balanza y se los diluyeron en 1 L de agua Milli-Q. Se graficó la absorbancia con respecto a la longitud de onda y se encontró al máximo absoluto del espectro en  $\lambda_{\text{máx}} = (662 \pm 1)$  nm, lo cual coincide con el valor tabulado [16].

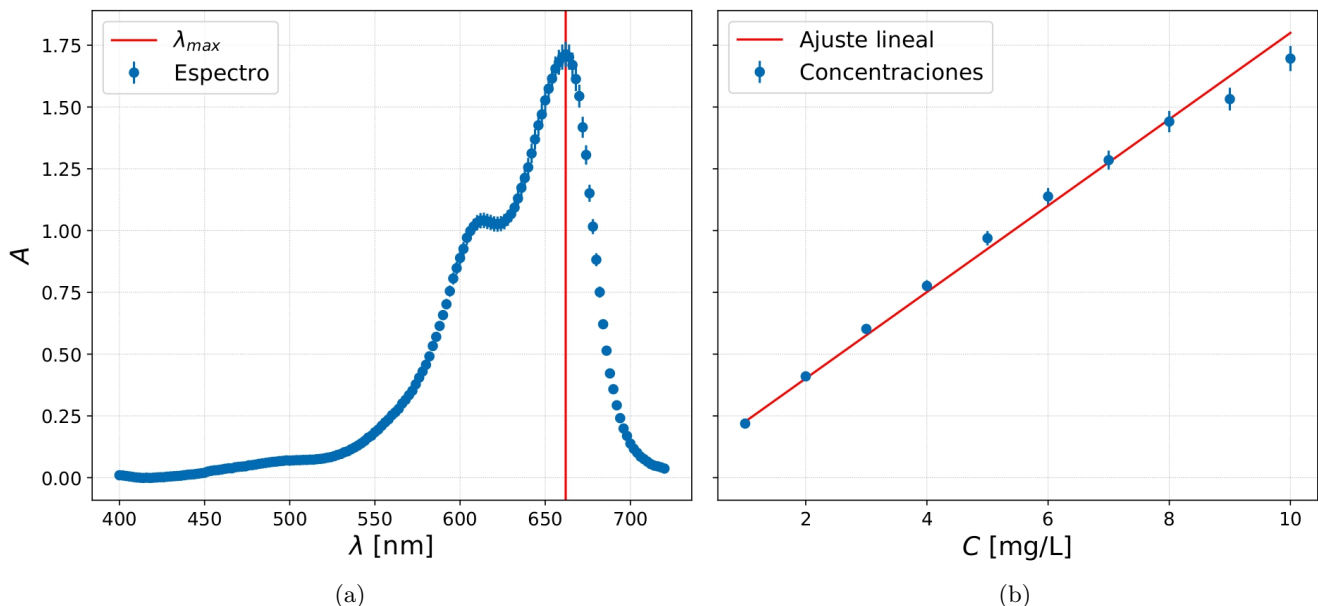


Figura 6: (a) espectro de absorbancia. (b) ajuste lineal de la absorbancia con respecto a la concentración.

Con el fin de verificar la ley de Lambert-Beer que indica la proporcionalidad directa entre la concentración y la absorbancia de una muestra [14], se fue diluyendo la concentración inicial de azul de metileno en agua Milli-Q y se midió la absorbancia para las diferentes concentraciones. Se colocó la concentración inicial y se vertieron sucesivas cantidades de agua Milli-Q de entre 10 y 500 ml en una probeta con una incerteza de 1 ml. En la Fig. 6b se puede observar la linealidad entre la concentración y la absorbancia en el rango de trabajo para el tratamiento. De esta forma, las mediciones de absorbancia se corresponden con la concentración de la muestra.



### C. Tratamiento de aguas contaminadas

Para el tratamiento de las soluciones acuosas de azul de metileno se trabajó en las siguientes condiciones: se vertieron en el vaso de precipitado 200 ml de solución acuosa de azul de metileno de 10 ppm y se trató la solución durante 140 min, tomando alícuotas y realizando mediciones de absorbancia cada 5 min de tratamiento. Todos los ensayos se realizaron empleando un único sistema de electrodos y alimentando al sistema con 7 kV de tensión continua y 16 kV de tensión alterna. Se realizaron pausas de cinco a diez minutos a los 40, 60 ó 90 minutos de tratamiento para evitar el sobrecalentamiento del reactor.

Para analizar cuantitativamente los tratamientos y comparar con otros trabajos es útil definir la eficiencia de degradación ( $DE$ ) [9]:

$$DE = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%,$$

donde  $C_0$  y  $C_t$  son la concentración al comenzar y al finalizar el tratamiento. El rendimiento energético ( $Y$ ), es un parámetro que cuantifica la eficiencia de degradación del tratamiento realizado en un tiempo  $t$  con respecto a la potencia  $P$  del sistema, y se define como:

$$Y = \frac{6 \times C_0 \times DE \times V}{10^4 \times P \times t} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right],$$

donde  $V$  es el volumen de la solución tratada.

#### 1. Tratamiento con diferentes sistemas de electrodos

En la Fig. 7 se presentan alícuotas de la solución de azul de metileno tomadas durante un tratamiento de 140 min empleando un electrodo de teflón sin  $\text{TiO}_2$  alimentando al sistema con  $V_{AC} = (16,0 \pm 0,2)$  kV pico a pico de tensión alterna.



Figura 7: alícuotas de las soluciones acuosas de azul de metileno al ser tratadas durante 140 minutos con el sistema de teflón sin  $\text{TiO}_2$  alimentado con  $V_{AC} = (16,0 \pm 0,2)$  kV pico a pico.

En la Fig. 8 se muestra las curvas de la concentración del azul de metileno en función del tiempo de tratamiento para los diferentes materiales dieléctricos sin  $\text{TiO}_2$ .

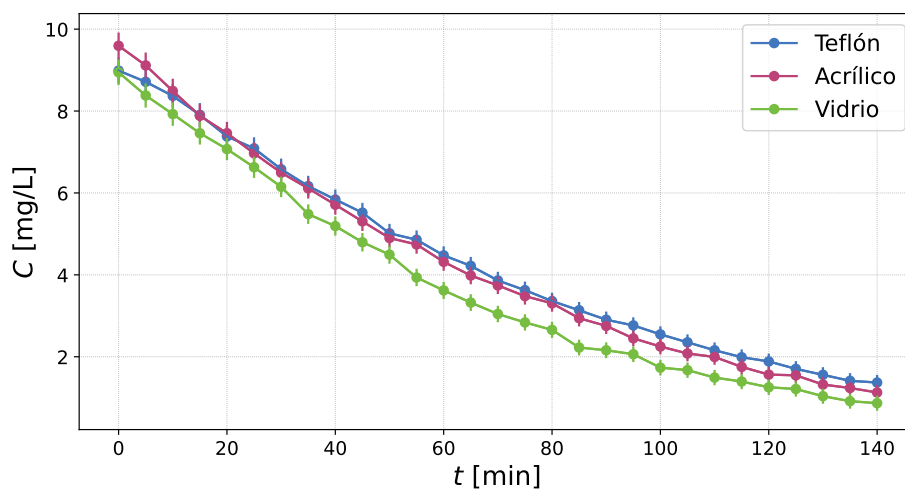


Figura 8: concentración en función del tiempo empleando distintos materiales dieléctricos.

Como se puede observar, las curvas de concentración se mantienen sin diferencias significativas en los tres tratamientos pues la concentración inicial y final al final de las muestras son prácticamente iguales.

Configuración	$P$ (W)	$DE$ (%)	$Y$ (g/kWh)
Teflón	$0,7 \pm 0,2$	$85 \pm 2$	$1,0 \pm 0,3$
Acrílico	$0,7 \pm 0,3$	$88 \pm 2$	$1,1 \pm 0,5$
Vidrio	$0,7 \pm 0,3$	$90 \pm 2$	$1,0 \pm 0,5$

Tabla 1: potencia, eficiencia de degradación y rendimiento energético para distintos dieléctricos.

En la tabla 1 se muestran la potencia, la eficiencia de degradación y el rendimiento energético obtenidos para cada tratamiento. En todos se obtuvieron valores cercanos entre sí, siendo la remoción del 90 % del contaminante para el caso del vidrio el mejor resultado. Por otro lado, el rendimiento energético se encuentra dentro de valores intermedios en relación a los reportados en otros trabajos [9].

2. Tratamiento con dióxido de Titanio

Se realizaron dos mediciones distintas para estudiar el reactor híbrido. Utilizando únicamente el sistema de electrodos de teflón, se colocaron en la canaleta alineados con éste una pieza rectangular de vidrio recubierta con dióxido de titanio, como se muestra en el esquema de la Fig. 1. Como control, se realizó otro tratamiento con el mismo vidrio pero sin el recubrimiento, ya que el vidrio mismo actúa como dieléctrico y disminuye la potencia de la descarga. En la Fig. 9, se grafican los resultados.

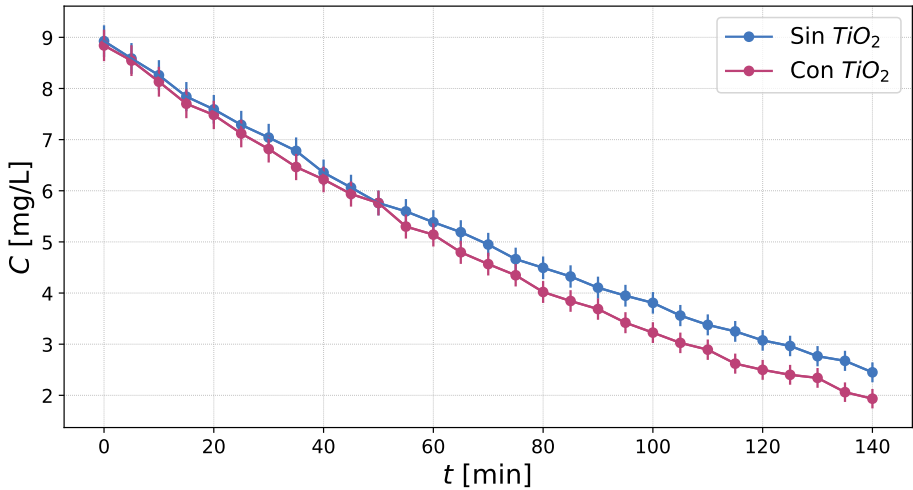


Figura 9: concentración en función del tiempo empleando vidrios sin y con dióxido de titanio.

A partir de estas mediciones se observa que con la presencia de titanio se llega a una concentración final ligeramente menor. Esto se confirmó repitiendo la medición y obteniendo resultados similares. Que el impacto del TiO<sub>2</sub> no haya sido tan notable en el tratamiento, se puede deber a que la radiación ultravioleta emitida por el plasma no sea lo suficientemente intensa como para fotoactivar al material. Para ver más en detalle la diferencia entre los tratamientos con y sin recubrimiento, se presentan en la tabla 2 las mismas magnitudes que se analizaron antes.

Configuración	$P$ (W)	$DE$ (%)	$Y$ (g/kWh)
Sin TiO <sub>2</sub>	$0,5 \pm 0,2$	$73 \pm 2$	$1,3 \pm 0,4$
Con TiO <sub>2</sub>	$0,6 \pm 0,2$	$78 \pm 2$	$1,2 \pm 0,5$

Tabla 2: potencia, eficiencia de degradación y rendimiento energético para el tratamiento con y sin recubrimiento de TiO<sub>2</sub>.

Los resultados que se muestran en la tabla indican que la presencia del vidrio con o sin recubrimiento de titanio reduce ligeramente la potencia, por lo cual se explica una disminución en la eficiencia de degradación.

## IV. Conclusiones

En este trabajo se montó y caracterizó un reactor de plasma para la remediación de aguas contaminadas, optimizando su diseño y eficiencia en la eliminación del azul de metileno. En particular, se mejoró el sistema de electrodos con respecto a trabajos anteriores, logrando un diseño que minimiza la ocurrencia de descargas secundarias no deseadas. Además, se perfeccionó el método de medición de la potencia eléctrica aplicada al sistema y se caracterizó el comportamiento de distintos dieléctricos como acrílico, teflón y vidrio. En las experiencias realizadas, se llegó a degradar el  $(90 \pm 2)\%$  del azul de metileno tras un tratamiento de 140 minutos con un rendimiento energético de  $(1,1 \pm 0,5)$  g/kWh. Por otro lado, los ensayos combinando el tratamiento con plasma y recubrimientos de  $\text{TiO}_2$  (reactor híbrido) presentaron una eficiencia de degradación menor en comparación a los obtenidos en el reactor de plasma. Para futuros trabajos se propone agregar al reactor una lámpara externa de radiación ultravioleta que estimule la acción del dióxido de titanio, estudiar distintos materiales sobre los cuales realizar el recubrimiento como acero inoxidable, o aumentar su grosor para lograr una mayor eficiencia de degradación.

## Referencias

- [1] Water Pollution. *Environmental Health Education Program*. Cambridge, MA: Harvard T.H. Chan School of Public Health. July 23, 2013. Archived from the original on September 18, 2021.
- [2] Von Sperling, Marcos. *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. Biological Wastewater Treatment: Vol. 6. IWA Publishing. 2007.
- [3] Eakins, B.W. and G.F. Sharman. *Volumes of the World's Oceans from ETOPO1*. Wayback Machine. National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). November 3, 2015.
- [4] David Pimentel et al. *Water Resources: Agricultural and Environmental Issues*. BioScience. ScienceDirect. October, 2004. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162506001429?via%3Dihub>
- [5] John E. Foster. *Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future*. Physics of plasmas. 24 055501. 2017.
- [6] Yin, Y.; Xu, H.; Zhu, Y.; Zhuang, J.; Ma, R.; Cui, D.; Jiao, Z.. *Recent Progress in Applications of Atmospheric Pressure Plasma for Water Organic Contaminant's Degradation*. Appl. Sci.. 13, 12631. 2023.
- [7] Piel, A. *Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas*. Springer. January 5, 2016. Page 4.
- [8] Bo Jiang, JingtangZheng, Shi Qiu, Mingbo Wu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, QingzhongXue. *Review on electrical discharge plasma technology for water remediation*. Chemical Engineering Journal. Pages 236, 348-368. 2014.
- [9] Baowei Wang, Bo Dong, Meng Xu, Chunmei Chi, Chao Wang. *Degradation of methylene blue using double-chamber dielectric barrier discharge reactor under different carrier gases*. Chemical Engineering, Science. Pages 90-100, 168. 2017.
- [10] Fridman, A. *Plasma Chemistry*. Cambridge. Cambridge University Press. 2008.
- [11] Gerhard Gibalov Valentin J. Pietsch. *Development of Dielectric Barrier Discharges in Gas Gaps and on Surfaces*. Journal of Physics. Applied Physics. 2000.
- [12] L. Giuliani, L. De Angelis, G. Diaz Bukvic, M. Zanini, F. Minotti, M. I. Errea, D. Grondona. *Trielectrode plasma reactor for water treatment*. Journal of Applied Physics 127. 223303. 2020.
- [13] Ochiai, Tsuyoshi, and Akira Fujishima. *Photoelectrochemical properties of  $\text{TiO}_2$  photocatalyst and its applications for environmental purification*. Journal of Photochemistry and photobiology. Photochemistry reviews 13. 4 247-262 (2012).
- [14] Ahumada Acuña, G.; Molina, N. A.. *Optimización, caracterización y estudio de la eficiencia de un reactor de plasma no térmico para el tratamiento de soluciones de azul de metileno*. UBA, FCEN, INFINA. Páginas 7-8. Diciembre del 2023.

- [15] Sears, F. W.; Zemansky, M. W.; Young, H. D.. *University Physics*. 6th Edition. Addison-Wesley, 1982. Table 27-1.
- [16] Khan, Idrees et al.. *Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation*. Water. Vol. 14. 242.2022