

DISEÑO MECÁNICO Y ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO DE CÁMARAS DE REACCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE O₃

MECHANICAL DESIGN AND FLUID DYNAMIC ANALYSIS IN REACTION CHAMBERS FOR O₃ PRODUCTION

Alberto-Serrano, Alejandro^a, De-la-Cruz-Escobar, Jorge^a, y Mastache-Mastache, Jorge Edmundo^b.

^aEstudiante del Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, División de Ingeniería Mecatrónica, Carretera Toluca-Atlacomulco km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín, Jocotitlán, Edo. México, México, Tel: (01712) 1231313, CP: 50700.,

^bAutor de correspondencia, Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, División de Ingeniería Mecatrónica, Carretera Toluca-Atlacomulco km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín, Jocotitlán, Edo. México, México, Tel: (01712) 1231313, CP: 50700., jorge.mastache@tesjo.edu.mx

RESUMEN. Este trabajo se centra en el diseño, análisis eléctrico y de flujo, y construcción de tres cámaras de reacción para la producción de ozono mediante el método de descarga de barrera dieléctrica. Se detallan las consideraciones de diseño, incluida la elección de una fuente de alimentación de alto voltaje con amplificador clase E, así como las condiciones operativas de las cámaras de reacción, como el flujo y la presión de entrada. Se presentan simulaciones eléctricas que validan el funcionamiento de cada cámara de reacción, asegurando el cumplimiento de las especificaciones eléctricas requeridas por la fuente de alimentación. Además, se utiliza el método de volumen finito (FVM) para analizar el flujo de aire dentro de las cámaras, evaluando su rendimiento bajo diversas condiciones de flujo y presión de entrada. El diseño de cada cámara incluye un sistema de regulación para ajustar parámetros específicos, como la distancia de separación. Cada cámara fue puesta en operación durante diferentes períodos, se midió cada uno de sus parámetros y se compararon los resultados.

Palabras clave: Plasma, Descarga, Ozono.

ABSTRACT. This work focuses on the design, electrical and flow analysis, and construction of three reaction chambers for ozone production by the dielectric barrier discharge method. Design considerations, including the choice of a high-voltage power supply with a class E amplifier, as well as the operating conditions of the reaction chambers, such as flow and inlet pressure, are detailed. Electrical simulations are presented that validate the operation of each reaction chamber, ensuring compliance with the electrical specifications required by the power supply. In addition, the finite volume method (FVM) is used to analyze the air flow inside the chambers, evaluating their performance under various flow and inlet pressure conditions. The design of each chamber includes a regulation system to adjust specific parameters, such as the separation distance. Each chamber was put into operation for different periods, each of its parameters was measured and the results were compared. This study provides a comprehensive overview of the key technical aspects in the construction of efficient reaction chambers for ozone generation.

Key words: Plasma, Discharge, Ozone

INTRODUCCIÓN

La presencia de microcontaminantes en el agua, principalmente pesticidas y productos farmacéuticos, y el aumento de los subproductos halogenados de la desinfección, como los trihalometanos formados durante la cloración, han suscitado un renovado interés por la ozonización para la oxidación de compuestos orgánicos y patógenos por ser un desinfectante extraordinariamente versátil y potente¹.

Las técnicas para la generación de ozono son varias, empezando por los generadores UV-C, los cuales se basan en la capacidad de la radiación UV para

disociar moléculas de oxígeno (O₂) en átomos individuales, que luego se recombinan para formar ozono (O₃). Sin embargo, los generadores UV-C son poco eficientes debido a la dependencia de la longitud de onda de la absorción del oxígeno molecular². Otra técnica de generación de ozono es la ozonización catalítica; esta es una tecnología prometedora en términos de eficiencia energética como tratamiento de efluentes industriales que poseen contaminantes de preocupación emergentes, ya que mejora las capacidades oxidativas del ozono a través de catalizadores que promueven su descomposición y la generación de especies radicales oxidantes³.

No obstante, durante el proceso, pueden generarse subproductos tóxicos, como bromoformo y aldehídos. Estos subproductos pueden ser dañinos para la salud humana y el medio ambiente si no se controlan adecuadamente.

La generación de ozono por el método de descarga de barrera dieléctrica (DBD) es uno de los más empleados y estudiados para sintetizar O_3 a partir de diversos medios primarios y es el método más indicado para la generación de O_3 en grandes concentraciones. Consiste en la ionización del aire en una cámara de descargas mediante la aplicación de un campo de alta intensidad en dos electrodos sometidos a diferencia de potencial elevada⁴.

La principal ventaja del plasma no térmico es el consumo de energía "dirigido"; en este caso, la energía suministrada a la descarga se utiliza predominantemente para generar electrones altamente energéticos y se pierde muy poca energía en calentar el volumen del gas. Por consiguiente, las tecnologías basadas en el plasma no térmico pueden ser muy eficaces para promover la oxidación, aumentar la disociación molecular y reducir el consumo de energía⁵.

Los generadores de ozono para DBD pueden agruparse en tres tipos según la disposición de los electrodos y el dieléctrico: VD (Volume Discharge), SD (Surface Discharge) y CD (Coplanar Discharge). Las disposiciones VD son las más estudiadas y utilizadas; véase la Figura 1.

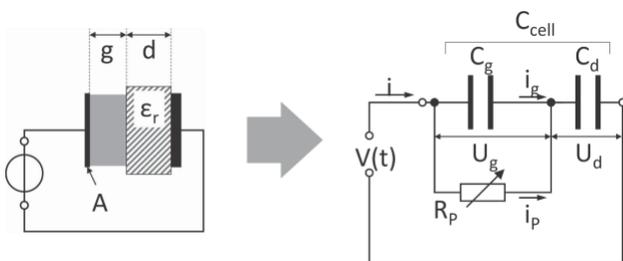


Figura 1. Cámara de reacción asimétrica y su modelado eléctrico.

Esta disposición usa 2 placas paralelas de material conductor, una de las cuales está aislada galvánicamente y separada de la otra placa mediante

un material dieléctrico, usualmente cuarzo, cerámica o vidrio. Cada una de estas placas forma un condensador, siendo C_g el formado por la cámara de descarga o separación entre una de las placas y el dieléctrico, y C_d , que representa la capacitancia formada por el dieléctrico.

El voltaje de ruptura para la ignición de la descarga varía debido a que la tensión de descarga, U_b , se trata de un parámetro macroscópico que viene determinado por la composición del gas, su presión y la distancia de descarga. Por ello, es difícil calcular el dimensionamiento exacto para la cámara de reacción debido a las variaciones de presión y composición del aire en el ambiente⁶. Si bien, aún es posible aproximar el valor del voltaje de ruptura a partir de la ley de Paschen y la curva obtenida a partir de ella⁷.

El voltaje de ruptura delimita el voltaje mínimo de entrada, considerándose que antes de que se produzca la ignición de la descarga de barrera el circuito es puramente capacitivo, y está formado por las capacitancias C_g y C_d . Esto forma un divisor de tensión; despejando el voltaje de entrada se puede obtener el voltaje mínimo a partir del voltaje de descarga U_b .

Los generadores de este tipo normalmente tienen una distancia g y d fija, y son alimentados por fuentes de alto voltaje donde el reactor es comúnmente modelado como una carga puramente capacitiva. Las fuentes Flyback son comúnmente usadas como la presentada por Pimentel Velázquez, donde se usa una fuente Flyback resonante autoconmutada, con modificación ZVS (Zero Voltage Switching)⁸.

El uso de fuentes más eficientes, tales como las formadas por amplificadores clase E, trae consigo un problema de impedancias debido a la naturaleza puramente capacitiva del reactor. Las fuentes clase E trabajan en un rango de impedancia en el cual su eficiencia es la máxima; fuera de ese rango, las pérdidas en la fuente incrementan notablemente⁹.

Dado que la impedancia del reactor y su voltaje de ruptura cambian con la distancia de aire entre uno de los electrodos y el dieléctrico, es posible conseguir un punto óptimo en fuentes de alimentación clase E con un reactor que sea capaz de variar su distancia de

separación, mejorando la eficiencia de todo el sistema.

En el presente artículo se aborda el diseño, construcción y caracterización de 3 reactores generadores de ozono por DBD, capaces de poder variar su distancia de separación para poder modificar su impedancia como su voltaje de ruptura, adecuándolos a su uso en fuentes con topologías clase E.

METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se compone de las siguientes etapas (ver Figura 2) las cuales involucran el diseño mecánico de los reactores, seguido de una simulación de flujo para validar sus características. Hecho esto, se procede a la construcción física de los reactores para finalmente caracterizarlos y obtener los resultados.

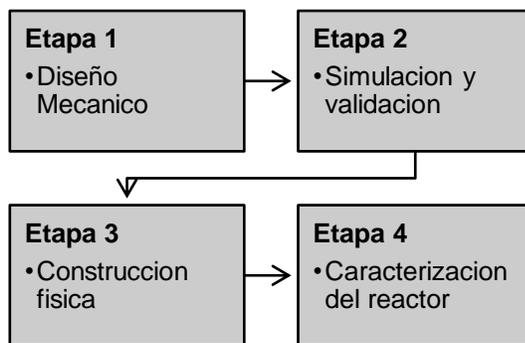


Figura 2. Secuencia de desarrollo.

DISEÑO MECANICO

En la primera etapa del proyecto se realiza un diseño en 3D del reactor utilizando el software de diseño SOLIDWORKS.

En esta etapa se diseña la estructura del reactor tomando en cuenta la disposición de los electrodos y el dieléctrico de un reactor asimétrico VD (Volume Discharge), de igual forma, se consideran los objetivos que debe cumplir el reactor, siendo uno de ellos la posibilidad de cambiar la separación entre los electrodos a fin de poder variar la impedancia de la cámara.

Se desarrollaron 3 versiones de la cámara, las cuales fueron evaluadas secuencialmente, incorporando mejoras en el tamaño del reactor, el material dieléctrico y el material de construcción respecto a la cámara anterior.

La figura 3 muestra los modelos de las 3 cámaras en estado explosionado donde se observan los elementos que lo integran los cuales se enlistan en la Tabla 1.

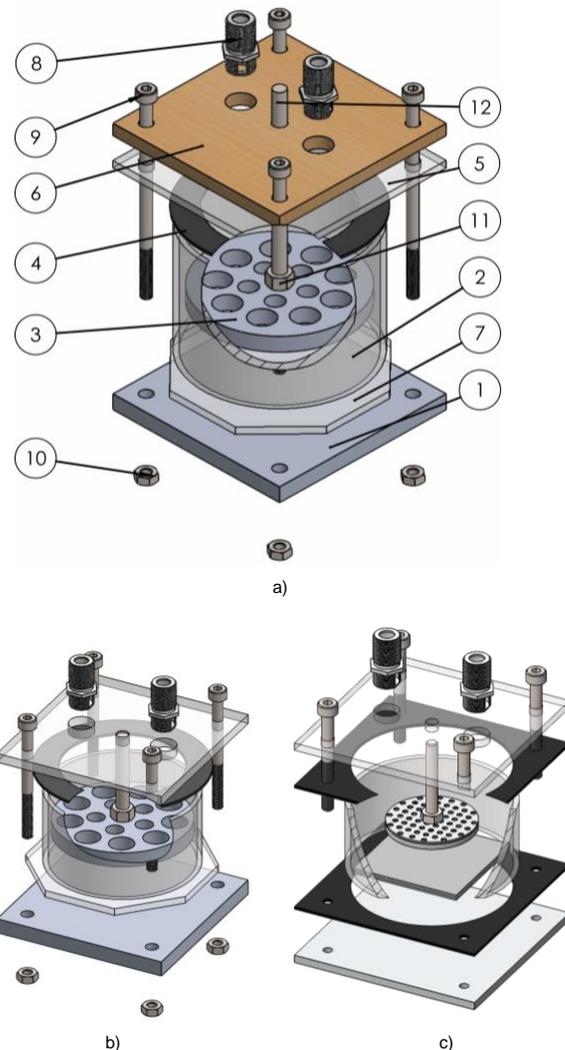


Figura 3. Dibujo explosionado de los 3 reactores modelados. a) Primer modelo, b) Segundo modelo, c) Tercer modelo.

Tabla 1. Elementos de la cámara de reacción.

Elemento	Descripción
1	Base-Electrodo exterior
2	Cilindro de vidrio
3	Electrodo interior
4	Sello de goma
5	Resina epóxica
6	Tapa superior de MDF
7	Dieléctrico
8	Conectores de entrada y salida de gas
9	Tornillos de fijación de la cámara
10	Tuercas de fijación de la cámara
11	Tuerca de fijación del electrodo interno
12	Tornillo regulador de distancia

SIMULACIÓN

La segunda etapa consta de una validación de cada uno de los modelos propuestos mediante el software de simulación de flujo; SOLIDWORKS integra el complemento SOLIDWORKS Flow Simulation, el cual provee de una intuitiva solución de dinámica de fluidos computacional (CFD, del inglés "Computational Fluid Dynamics"). En este software se realizan las simulaciones sobre el comportamiento del flujo dentro de la cámara de reacción, estableciendo las condiciones de límite (Volume flow rate=5 l/min, Environment Pressure=1.01325bar) y una distancia de separación de electrodos de 2mm.

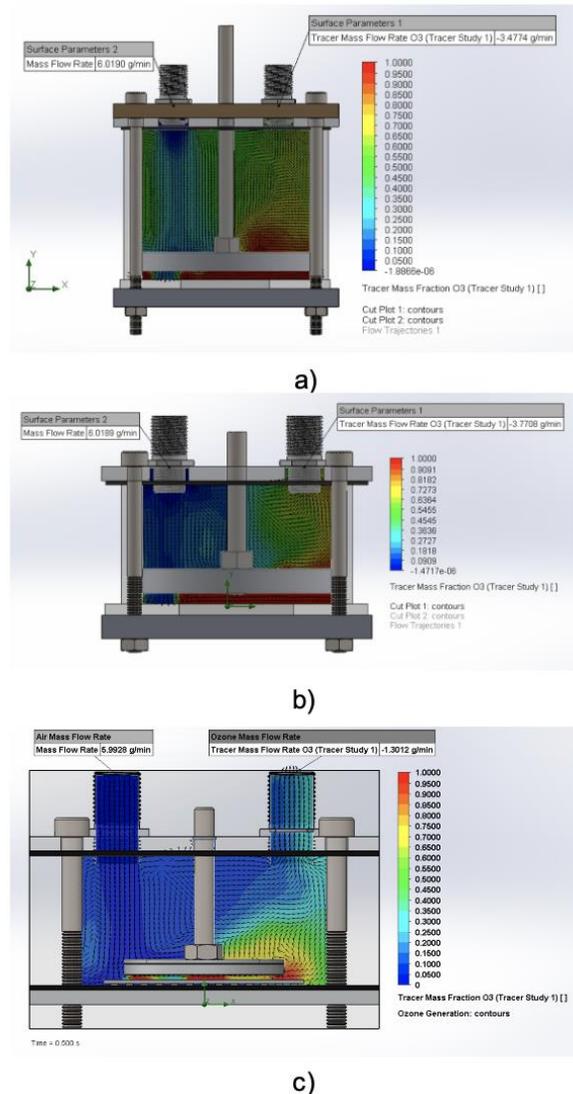
Ejecutando la simulación, podemos validar el porcentaje de flujo másico de O_3 debido a la descarga dieléctrica entre las 2 placas; la magnitud máxima representada en rojo indica un porcentaje de flujo másico de O_3 del 100%. El gráfico vectorial muestra la dirección del flujo másico desde la entrada a la salida del reactor.

Hay que tener en cuenta que la simulación no toma en cuenta las propiedades del arco eléctrico, por lo que la producción real de ozono puede ser mucho menor que la obtenida por la simulación.

VALIDACIÓN Y REDISEÑO

Los resultados de la simulación de la primera cámara, Figura 4 a, arrojan un flujo másico de O_3 de 3.4774 g/min a la salida en comparación con los 6.0190 g/min de aire a la entrada. Se observa como el flujo de aire de la cámara concentra la mayor parte de O_3 cerca de la parte inferior derecha. A pesar de ello,

gran parte del aire circula por la parte superior y no se convierte en O_3 .


Figura 4. Simulaciones de flujo de O_3 a través de la cámara. a) Primer modelo, b) segundo modelo, c) tercer modelo.

Debido a esto, el segundo modelo, figura 4b, se reduce la altura y el diámetro del cilindro de vidrio a fin de acortar el espacio de aire no utilizado. Los resultados de la simulación del reactor 2, figura 4b, muestran un flujo másico de O_3 de 3.7708 g/min, mejorando la producción volumétrica de ozono debido a los cambios hechos.

En el tercer modelo, figura 4c, se reduce aún más la altura del vidrio; dado que la cerámica tiene mayor

constante dieléctrica, se usó cerámica esta vez en vez de vidrio, y se redujo el diámetro del electrodo. En consecuencia, las simulaciones demostraron un flujo másico de O_3 de 1.3012 g/min a la salida, mucho menor que la segunda cámara debido al tamaño muy reducido del electrodo respecto al cuerpo de la misma.

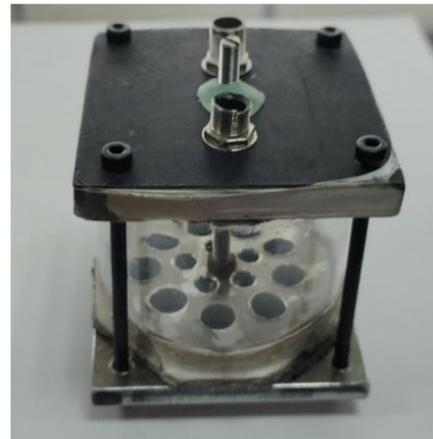
CONSTRUCCIÓN FÍSICA

La tercera etapa consta de la construcción física de los reactores una vez validado el comportamiento del flujo másico de aire. La estructura del reactor fue hecha con base en cilindros de vidrio de 2mm de espesor y un diámetro de 60mm. La base de las cámaras 1 y 2 fue fabricada en placa de aluminio 6061 de 70mm x 70mm con espesor de $\frac{1}{4}$ de pulgada, sobre la cual se realizaron 4 barrenos de 5mm. Para la base del reactor 3 se fabricó usando una placa de aluminio 6061 de 70mm x 70mm con espesor de 4mm con 4 barrenos de 4mm separados 53mm de cada uno. El electrodo de las cámaras 1 y 2 se fabricó usando un círculo de aluminio 6061 de $\frac{1}{4}$ de pulgada, 55mm de diámetro para el reactor 1 y 50mm para el reactor 2, sobre el cual se hacen barrenos de 10mm sobre la placa y un barreno central de 5mm para la sujeción del tornillo regulador. La cámara 3 cuenta con un electrodo de aluminio 6061 de 1mm de espesor con barrenos de 1mm sobre toda la placa, unido a un anillo de cromo de diámetro externo de 32mm y diámetro interno de 27mm. Para las 3 cámaras se usaron conectores F-81 para la entrada y salida de aire. Los sellos de las cámaras se fabricaron a partir de caucho de 1mm de espesor. Los dieléctricos en las cámaras 1 y 2 fueron fabricados usando vidrio de 3mm de espesor, mientras que en la cámara 3 se usó un bloque cerámico de 40mm x 40mm x 2mm. Cada reactor se ensambló de acuerdo al modelo en 3D hecho previamente. La figura 5 muestra los 3 reactores ya ensamblados.

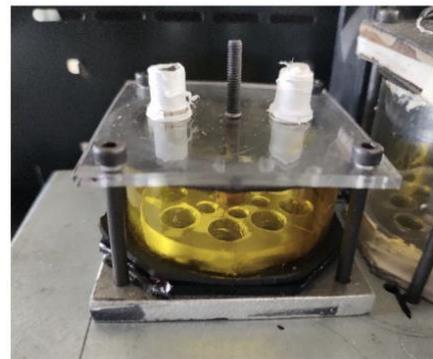
CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR

En la cuarta etapa se determinan las características del modelado eléctrico del reactor (voltaje de ruptura, capacitor equivalente, capacitor de la separación de electrodos, capacitor del dieléctrico, potencia del reactor) con base en la curva de voltaje-carga también conocida como figura de Lissajous, la cual

forma un paralelogramo. La caracterización se lleva a cabo con el siguiente procedimiento.



a)



b)



c)

Figura 5. Reactores ensamblados. a) Primer modelo, b) segundo modelo, c) tercer modelo.

1. Primer paso: Se anexa un capacitor de medición de al menos 100 veces la capacitancia estimada del reactor en serie con la cámara, quedando el modelo eléctrico como se muestra en la figura 6. Dado que se espera una capacitancia de solo unos pocos picofaradios, un capacitor de 220nF

en serie con el reactor es suficiente para no afectar el funcionamiento del reactor.

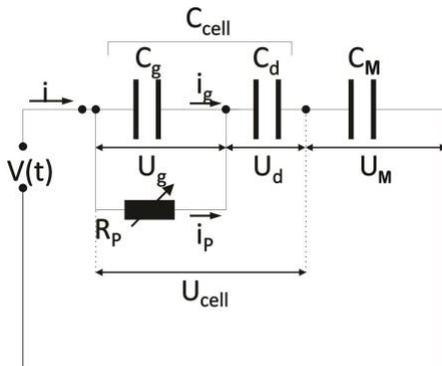


Figura 6. Modelo eléctrico para la caracterización.

2. Segundo paso: Se usa un osciloscopio y 2 puntas de alto voltaje para medir el voltaje de la cámara U_{cell} , que representará el eje X, y el voltaje del capacitor de medición U_M , que representará el eje Y de la figura de Lissajous.

3. Tercer paso: Para la caracterización del reactor se tiene en cuenta que el periodo de funcionamiento para los 3 reactores debe de ser de al menos 10 minutos con un flujo de aire constante de 10 l/min y el mismo voltaje para todas las cámaras.

4. Cuarto paso: Una vez obtenida la figura de Lissajous, se calculan los parámetros basándose en las relaciones proporcionadas por Castle, Feng, & Jayaram ¹⁰.

5. Posteriormente, se realiza una caracterización a diferentes flujos de aire para medir la temperatura y la cantidad de ozono alcanzada por cada cámara tras 15 minutos de funcionamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haber realizado el procedimiento para la caracterización de los generadores de ozono, se obtienen las figuras de Lissajous que se pueden observar en la figura 7, las figuras muestran una forma ovalada en vez de un paralelogramo, esto debido a la aparición de una combinación de descargas filamentosas acompañadas de descargas superficiales ¹¹. Esto es causado probablemente debido a la diferencia de geometría del electrodo interno respecto al externo, esto se corrobora al observar el reactor simétrico fabricado por Jorge

Aguilar donde se aprecia un paralelogramo casi perfecto ¹².



a)



b)



c)

Figura 7. Figuras de Lissajous obtenidas de la caracterización. a) Primer modelo, b) Segundo modelo, c) Tercer modelo.

Tabla 2. Resultados de la caracterización.

Parámetro	Unidad	No.1	No.2	No.3
Voltaje de Ruptura	V	952.5	583.8	449.8
Capacitor Equivalente	pF	27.710	19.900	19.471
Capacitor C_d	pF	67.718	56.235	42.742
Capacitor C_g	pF	46.901	30.798	35.762
Potencia de la carga	W	41.700	27.200	12.100

Una vez obtenidas las figuras, se procede al cálculo de los parámetros de cada uno de los generadores, los cuales se muestran en la Tabla 2 obteniéndose

un voltaje de ruptura y capacitancia equivalente menor en el reactor número 3 debido al menor área del electrodo interno y al uso de un material cerámico como dieléctrico. A su vez, entre mayor diámetro del electrodo interno, la capacitancia del reactor incrementa, mientras que la impedancia disminuye, exigiendo más carga a la fuente. La posibilidad de regular la distancia de separación permite un ajuste de manera que la fuente se comporte en su rango óptimo.

La concentración de ozono fue medida usando un medidor de ozono con un límite de 5.0ppm, donde en cada uno de los reactores mantuvo esa concentración a un flujo de 10 l/min lo cual se estima en una producción mínima de ozono de 1.7857g/h; no obstante, debido a las limitaciones del medidor usado, la producción de ozono podría ser aún mayor.

Se evaluó la concentración de los reactores de manera individual aplicando un flujo de 10 l/min y colocando cada reactor con una distancia de separación de 1mm. Tomando mediciones a cada segundo desde el momento del encendido del reactor, se puede conocer el tiempo que le toma a cada reactor alcanzar la saturación del medidor de ozono, la figura 8 muestra la concentración de ozono al momento del encendido de cada cámara, siendo el reactor 2, el que tiene el menor tiempo antes de alcanzar la saturación del medidor, lo cual concuerda con las simulaciones realizadas, de igual forma se muestran las regresiones lineales de cada cámara de reacción.

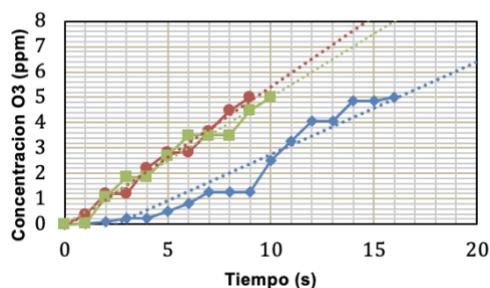


Figura 8. Concentración de ozono de los reactores. Reactor 1 (azul). Reactor 2 (rojo). Reactor 3 (verde).

La temperatura de los 3 reactores siempre se mantuvo por debajo de los 45°C debido al uso de ventilación forzada y debido al mismo flujo de aire

que circula por dentro del reactor. Aun así, el reactor 2 demostró tener una temperatura más baja de 33°C respecto a los otros 2. La Tabla 3 muestra las diferentes temperaturas de los reactores a diferentes flujos de entrada.

Tabla 3. Temperaturas de funcionamiento de los reactores.

Flujo de Entrada	Temperatura °C		
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
2.5 l/min	43°C	37°C	42°C
5.0 l/min	41°C	36°C	41°C
7.5 l/min	40°C	34°C	39°C
10.0 l/min	37°C	33°C	36°C

Contrastando con otros reactores construidos ¹³, la producción de ozono se mantiene en niveles ligeramente superiores. Basado en los resultados, se afirma que el modelo 2 es el que demostró tener el mejor comportamiento, con menores temperaturas, y menor consumo de potencia generando ozono.

CONCLUSIONES

Las 3 cámaras de reacción fabricadas proveen una manera eficiente y segura de generar ozono como ya se demostró en este artículo y en trabajos similares, logrando una producción estable de ozono, no obstante la forma de la cámara así como su construcción determina el cómo se produce el ozono; una forma con menos altura así como mayor área en los electrodos favorece la generación de ozono tal cual como se demostró en el reactor 2 en contraste con el reactor 1, obteniéndose menor tiempo de respuesta en la producción de ozono, menores áreas del electrodo interno favorecen la generación del arco pero reduciendo la producción volumétrica de ozono, obteniendo un rendimiento intermedio, tal cual se demostró en el reactor 3.

REFERENCIAS

- Gray, N. F. (2014). Chapter Thirty-Three - Ozone Disinfection. En *Microbiology of Waterborne Diseases* (Second Edition) (págs. 599-615). Academic Press. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415846-7.00033-0.
- Claus, H. (2021). Ozone Generation by Ultraviolet Lamps. *Photochemistry and Photobiology*, 97(3), 471-476.
- Angel-Ospina, A., & Machuca Martínez, F. (Junio de 2022). Ozonización catalítica en el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), 1-27.
- Brandenburg, R. (2017). Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *Plasma Sources Science and Technology*, 26(5).
- S. Pekárek. (2003). Non-Thermal Plasma Ozone Generation. *Acta Polytechnica*, 48(6), 47-51.

6. Xunlin , Q., Yuji, L., Chengyuan, W., Yanxun , X., Fu-Zhen , X., & Reimund , G. (2023). More efficient charging of ferroelectrets via tuning of the Paschen breakdown. *Applied Physics Letters*, 122(9).
7. Paschen, F. (1889). *Analytical Physics*, 273(5), 69-75.
8. Pimentel Velázquez, L. A., Suárez Aparicio , H., & Velázquez Machuca , M. A. (2022). Prototipo generador de ozono basado en fuente de alto voltaje y descarga de barrera dieléctrica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24(2), 1-11. doi:<https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2023.24.2.013>
9. De La Cruz Escobar , J., & Alberto Serrano, A. (2023). Engineering and Architecture in the northern part of the State of Mexico. En R. López Ramírez, *Design and Implement of a Class E Source for possible sputtering application and dielectric barrier discharge* (págs. 18-28). ECORFAN. doi:10.35429/H.2023.5.18.28
10. Castle, G., Feng, R., & Jayaram, S. (May/Jun de 1998). Automated system for power measurement in the silent discharge. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(3), 563-570.
11. Taheraslani, M., & Gardeniers , H. (2020). Coupling of CH₄ to C₂ Hydrocarbons in a Packed Bed DBD Plasma Reactor: The Effect of Dielectric Constant and Porosity of the Packing. *Energies*, 13(2). doi:doi:10.3390/en13020468
12. Ramírez, I. J. (2005). Fuente de alimentación para la generación de ozono en aplicaciones de desinfección de agua. Cuernavaca, Mor.: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
13. Fanfalone, F. J. (1997). Diseño y construcción de un prototipo para generación de ozono. Nuevo Leon: Universidad de Monterrey.