

Capítulo 9 El plasma no térmico como agente de cambio de la concentración de iones Hidrógeno [H⁺], presentes en la solución acuosa del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %

Chapter 9 The non-thermal plasma as an agent for changing the concentration of hydrogen ions [H⁺], present in the aqueous solution of the Green Blue Dye Doracryl X5GS 200%

ALARCÓN-HERNÁNDEZ, Fidel Benjamín†*, FUENTES-ALBARRÁN, María del Carmen, GADEA-PACHECO, José Luis y CAÑETE-CABRERA, Víctor Aristeo

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc. Av. Nicolás Bravo s/n, Parque Industrial Cuautla, C.P. 62717 Xalostoc, Ayala, Morelos, México.

ID 1^{er} Autor: *Fidel Benjamín, Alarcón-Hernández* / **ORC ID:** 0000-0002-2465-0898, **CVU CONACYT ID:** 131028

ID 1^{er} Coautor: *María del Carmen, Fuentes-Albarrán* / **ORC ID:** 0000-0003-1308-1332, **CVU CONACYT ID:** 171814

ID 2do Coautor: *José Luis, Gadea-Pacheco* / **ORC ID:** 0000-0001-9341-9289, **CVU CONACYT ID:** 160429

ID 3^{er} Coautor: *Víctor Aristeo, Cañete-Cabrera* / **ORC ID:** 0000-0001-9341-9289, **CVU CONACYT ID:** 160429

DOI: 10.35429/H.2019.1.84.93

F. Alarcón, M. Fuentes, J. Gadea y V. Cañete

*honorato@uaem.mx

O. Benavides (Dir.). Ingeniería. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Campeche, 2019.

Resumen

Se evaluó el cambio de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ presentes en la solución acuosa del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 % (concentración de 20 mg/L), durante su exposición a un plasma no térmico a presión atmosférica (760 Torr) y a baja presión (10 Torr). El tiempo de exposición al plasma fue de 250 minutos. Se consideraron cuatro condiciones diferentes de generación del plasma no térmico (15, 20, 25 y 30 mA) a un voltaje de 2000 V. Se comparan los resultados del cambio de concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ en la solución en estudio a presión atmosférica, a baja presión y los cambios generados bajo las mismas condiciones en agua destilada sin contaminante. En general, los valores de pH de la solución acuosa del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 % y del agua destilada, ambos a presión atmosférica; tienen un comportamiento decreciente conforme aumenta la intensidad de corriente y el tiempo de exposición. Para las soluciones (colorante y aguas destilada) en la exposición a baja presión no se observaron cambios. Esto indica que la solución aumenta su nivel de acidez conforme avanza el tratamiento en presencia de moléculas de aire y mantiene el valor de pH en ausencia de este. Los valores cambiaron de un pH inicial de 5.4 a uno final máximo de 3.1.

Plasma no térmico, Iones Hidrógeno, Verde Azul Doracryl, Tratamiento de aguas

Abstract

The change in the concentration of hydrogen ions $[H^+]$ present in the aqueous solution of the Doracryl Blue Green Dye X5GS 200% (concentration of 20 mg / L) was evaluated during its exposure to a non-thermal plasma at atmospheric pressure (760 Torr) and at low pressure (10 Torr). The exposure time of the study solution to the plasma was 250 minutes. Four different non-thermal plasma generation conditions (15, 20, 25 and 30 mA) were considered at a voltage of 2000 V. The results of the concentration change of hydrogen ions $[H^+]$ in the study solution at atmospheric pressure and at low pressure are compared, as well as the changes generated under the same conditions in distilled water without contaminants. In general, the pH values of the aqueous solution of the Doracryl Blue Green Dye X5GS 200% and the distilled water at atmospheric pressure, they have a decreasing behavior as the current intensity increases and the exposure time increases. In the solutions (dye and distilled water) exposed to low pressure, no changes were observed. This indicates that the solution increases its level of acidity as the treatment progresses in the presence of air molecules and maintains the pH value in the absence of this. Values changed from an initial pH of 5.4 to a minimum final pH of 3.1.

Non-thermal plasma, Hydrogen Ions, Doracryl Blue Green, Water treatment

Introducción

En los últimos años la problemática sobre la contaminación ambiental y el consecuente calentamiento global, han sido tema de interés mundial. La afectación a los ecosistemas por los contaminantes desechados ya sea a la atmósfera, al suelo o al agua es alarmante; puesto que el daño provocado no sólo es hacia la flora y fauna que en ellos habita, sino también a los seres humanos. En particular, considerando desde tal perspectiva al agua como el tema de mayor preocupación debido a su continua escasez y nivel de contaminación, se observa que una de sus principales causas se localiza en las aguas residuales de fábricas textiles o peleteras, cuyo mayor contaminante son los diferentes colorantes.

El principal problema ambiental derivado del aporte de color a las aguas de los ríos y lagos se debe a la reducción de la transparencia y la disminución del oxígeno disuelto, lo cual tiene como consecuencia de que altas cargas de color dificulten la función fotosintética de las plantas acuáticas (Lemley, 1994; Mejia, 2003). Adicionalmente, algunos problemas asociados a los efluentes textiles son debidos a la presencia de metales pesados o azufre, que producen problemas de contaminación debido a su naturaleza tóxica. Las aguas residuales de teñido y de procesos de acabado de la industria textil con una demanda química de oxígeno que exceda 1600 mg/L y que tenga un color muy oscuro es considerada agua residual altamente contaminada y fuente significativa de contaminación. (Aristizábal et al., 2007).

Por otra parte, dado que la exigencia actual de la industria textil radica en la búsqueda de colorantes con estabilidad química y fotolítica, se han diseñado colorantes resistentes a la ruptura debida a la exposición a la luz, agua y detergentes, lo cual hace aún más complicada su degradación.

Actualmente los investigadores se encuentran inmersos en encontrar posibles soluciones a tales problemas ambientales, que provocan por sus características específicas, la alteración del desarrollo normal de los ciclos biogeoquímicos que se llevan a cabo en los diferentes tipos de cuerpos de agua donde estos residuos son vertidos.

Existen diferentes métodos fisicoquímicos y biológicos que pueden ser aplicados para remover y degradar colorantes de las aguas contaminadas. Cada método tiene limitaciones técnicas y de eficiencia; lo que implica que el uso de un solo proceso no es suficiente para la degradación del color y la mineralización de los compuestos que se forman. Procesos tales como el de oxidación química, ósmosis inversa y adsorción por mencionar algunos, son altamente eficientes, pero los limitan algunas desventajas como sus costos elevados, aplicación limitada, alto consumo de energía, producción de lodos, generación de subproductos tóxicos y cambios considerables de pH entre otros.

Como técnica innovadora emergente para tratar estas problemáticas, se encuentra el uso del plasma no térmico, el cual actualmente tiene un gran número de aplicaciones en el área médica e industrial; y mediante la que se han obtenido materiales con propiedades físicas y químicas diferentes de las iniciales.

Considerar a los plasmas no térmicos como un tratamiento de aguas residuales ha dado diferentes resultados, se han observado ventajas y desventajas las cuales dependen del sistema experimental y de las características propias de la exposición de la solución en estudios al plasma. Una consecuencia particular de la exposición de alguna sustancia líquida a un plasma no térmico a presión atmosférica es el cambio del pH inicial de la solución tratada. Se ha observado que cuando el proceso de exposición al plasma no térmico concluye, el pH disminuye drásticamente. Que suceda lo anterior es perjudicial si se pretende que estas aguas tratadas sean desechadas directamente a un cuerpo común de aguas, pues un pH ácido genera cambios en la actividad biótica de los invertebrados del reino protozoo que ahí habitan y provoca una disminución significativa de la existencia de estos organismos unicelulares, lo que a su vez inicia una alteración en su ciclo biológico y del ecosistema donde se localizan. Por otra parte, el cambio de pH de una solución específica expuesta a un plasma no térmico a presión atmosférica, también depende del compuesto contaminante en estudio. En particular, de las características químicas y física que este posea. Existen diferentes procesos químicos que pueden revertir un pH ácido en una solución, en particular está el uso de buffers alcalinos; sin embargo, eso significa depositar sustancias nuevas que generan otros cambios negativos.

Otra forma es utilizar el plasma conveniente, así como encontrar la metodología que responda a las necesidades particulares de cada caso. Los plasmas son un gas parcial o totalmente ionizado que consiste en electrones, iones y radicales libres. De manera general puede ser producido de diferentes maneras, y en particular por una diferencia de potencial.

Todas las variedades de sistemas de plasma se ubican tradicionalmente en dos categorías principales, a saber, térmicas y no térmicas, en términos de densidad o temperatura electrónica (Bogaerts et al., 2012). El plasma térmico (generalmente descargas de arco, antorchas o radiofrecuencia) se asocia con suficiente energía introducida para permitir que los componentes del plasma estén en equilibrio térmico. Mientras que el plasma no térmico se obtiene usando menos energía (generalmente descarga de corona, descarga de barrera dieléctrica, descarga de arco deslizante, descarga de incandescencia y descarga de chispa), que se caracteriza por una temperatura de electrones energéticos mucho más alta que la de las moléculas de gas. En este plasma, los electrones energéticos pueden chocar con moléculas blanco (N_2 , O_2 , H_2O , etc.) que producen electrones secundarios, fotones, iones y radicales (Vandenbroucke et al., 2011). Este plasma, puede generarse y manejarse a temperatura ambiente.

Un ejemplo de plasma no térmico es el generado por una descarga eléctrica de alto voltaje en líquido o en una combinación experimental de gas – líquido, el cual se ha utilizado como un proceso de oxidación avanzado para eliminar microorganismos y degradar los compuestos orgánicos volátiles (COV) durante la última década.

Las descargas eléctricas producen altos campos eléctricos, radiación ultravioleta (UV), ondas de choque y especies activas en los líquidos. En estos, las especies químicamente activas son capaces de degradar compuestos orgánicos (Locke et al., 2002) y eliminar microorganismos (Chen et al., 2008).

Básicamente, los reactores de descarga eléctrica se pueden clasificar en dos tipos: uno con ambos electrodos sumergidos en agua (como el de campo eléctrico pulsado (CEP) para esterilización líquida (Ohshima et al., 2002) y el otro es el sistema híbrido en el que un electrodo se sumerge en líquido y el otro permanece en gas (Grymonpre et al., 2004). Para eliminar microorganismos, un sistema CEP utiliza campos eléctricos elevados y los mecanismos se realizan principalmente a través de la electroporación y el deterioro eléctrico sin subproductos tóxicos (Neumann et al., 1989). En un sistema híbrido de descarga de gas y líquido, las descargas eléctricas generadas en la superficie del agua inician diversos efectos físicos y químicos, que traen como consecuencia especies químicamente activas (O_3 y H_2O_2) que permiten inactivar microorganismos y degradar compuestos varios (Locke et al., 2002).

Si bien las descargas eléctricas en agua son amigables con el medio ambiente y han mostrado ser más efectivas que los oxidantes y desinfectantes convencionales (Sato et al., 2001), el consumo de energía de las descargas eléctricas generadas en el agua es muchas veces mayor que el generado en gas (Ohshima et al., 2002). Desde esta perspectiva, en un reactor híbrido de descarga eléctrica gas-líquido, los plasmas no térmicos pueden formarse directamente sobre la superficie del agua, y las especies químicamente activas generadas en la interfase gas-líquido pueden entrar fácilmente en el agua para la inactivación de microorganismos y/o degradación de compuestos.

Durante los últimos años, gran número de artículos han sido publicados referentes a plasma de descarga de arco y descarga luminiscente dentro y/o en contacto con líquidos, debido al interés creciente por su aplicación. Hoy en día esto ha proporcionado muchas aplicaciones posibles, tales como la producción de hidrógeno, síntesis, así como el tratamiento de aguas residuales (Brisset et al., 1990, Burlica et al., 2008, Sarabia, 2019). Hasta ahora, se ha utilizado no sólo para la degradación de los contaminantes orgánicos, también para la reducción de Cr (VI) y la inactivación de las algas.

Dependiendo de las aplicaciones requeridas en los plasmas no térmicos de modalidad experimental híbrida, hay una amplia variedad que se realizan bajo diferentes condiciones. Algunas de las características más importantes son el tipo de gas utilizado, la presión de este gas y la temperatura dada. En particular, la presión define la densidad total de las partículas de gas y, en consecuencia, también la probabilidad de colisiones mutuas entre partículas, es decir; la frecuencia de colisión. Lo cual aunado con el tipo de compuesto a degradar y el dispositivo experimental, puede modificar el cambio de pH de una u otra forma en la solución en estudio.

Para el presente caso se utilizó el Verde Azul Doracryl X5GS 200 % como agente contaminante. El colorante Verde Azul Doracryl es un colorante de tipo básico según su forma de aplicación. Nombre comercial: Verde Azul Doracryl X5GS 200 %. Nombre químico: Cloruro de dietil (3H-1-etoxi-3-fenoxazinilideno) amonio.

Este se ha intentado degradar en medio acuoso utilizando diversos métodos, sin embargo; debido a la necesidad de encontrar un método que sea aún más eficaz en degradación y a la vez no altere el pH de la solución final, se plantea como primer acercamiento, el estudio y comparación del efecto en el cambio del pH de dos soluciones; una de Verde Azul Doracryl X5GS 200 % en solución acuosa a una concentración establecida de 20 mg / L y otra de solo agua destilada. Lo anterior, mediante su exposición a un plasma no térmico híbrido (aire-agua), generado con electrodos de tungsteno a presión atmosférica (~ 760 Torr) y a baja presión (~ 10 Torr). Desde tal perspectiva, el objetivo de esta investigación es observar experimentalmente la influencia de la presión de generación del plasma, sobre el efecto en el cambio de pH de una solución expuesta a él. Lograr mantener estable el pH de las soluciones expuestas a los plasmas, y a la vez disminuir valores de absorbancia, toxicidad u otras variables; permitirá establecer una metodología para el tratamiento por plasma de aguas residuales, o para la degradación de contaminantes en solución acuosa sin la desventaja consecuente de la acidez de la solución en estudio.

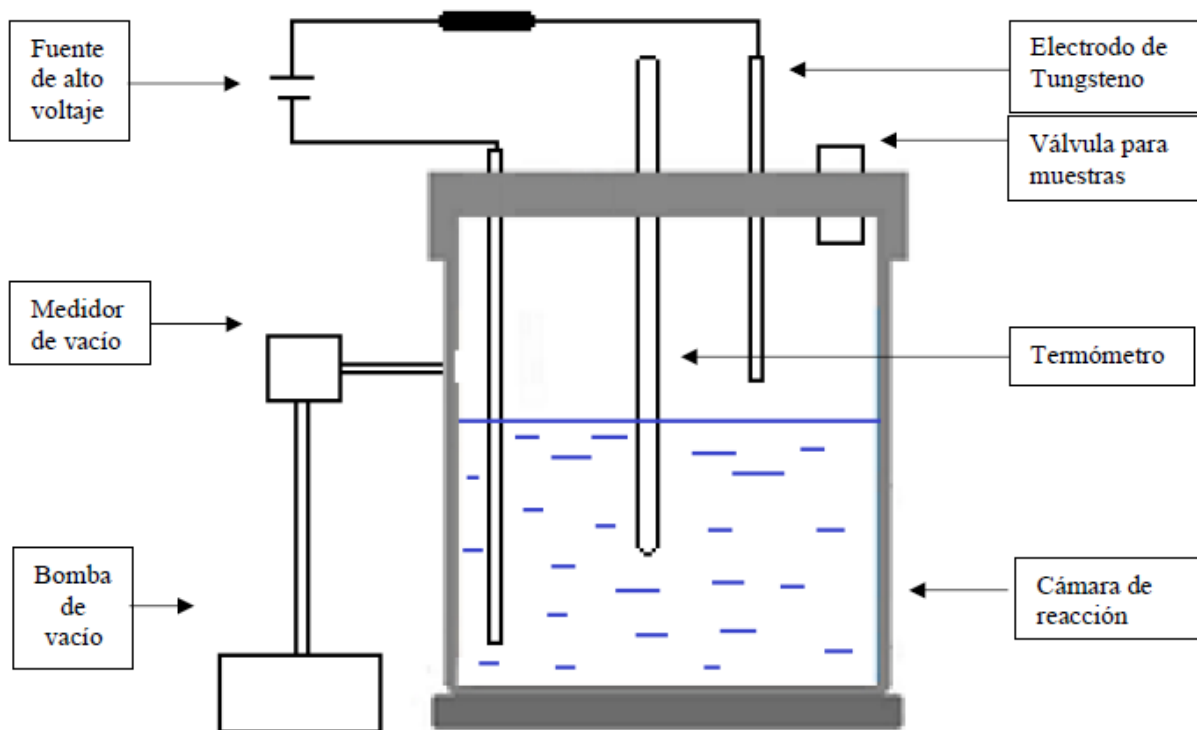
En particular en esta investigación se presentan y analizan los efectos observados, tras la exposición de las soluciones al plasma no térmico generado a cuatro valores de corriente eléctrica (15, 20, 25 y 30 mA) y a una diferencia de potencial eléctrico fijo de 2000 V. Ambos tratamientos (~ 760 Torr y ~ 10 Torr), con una duración de 250 minutos cada uno tomándose muestras cada 25 minutos.

Metodología Experimental

Se prepara una solución stock de 500 mL con una concentración de 1×10^{-4} g/mL del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %. Esta se consigue agregando 0.05 g (pesados con una báscula marca ADAM, modelo PW 254) del colorante de interés en 500 mL de agua destilada mezclados perfectamente. Se extraen 100 ml de la solución stock y se vierten a un matraz de 500 mL para posteriormente aforarlo con agua destilada, obteniendo una nueva concentración de 20 mg/L como solución de trabajo final.

Para llevar a cabo los tratamientos por plasma no térmico, se deposita la solución a tratar (500 ml) en el dispositivo experimental utilizado. Se muestra un esquema del dispositivo en la figura 2.1. Consiste de una cámara de reacción de vidrio de 1.0 litros de volumen libre y dos electrodos de tungsteno colocados a través de una tapa móvil de sello hermético situada en la parte superior. El extremo inferior de uno de los electrodos se coloca dentro de la solución, mientras que el extremo inferior del otro electrodo se encuentra al borde de esta sin tocarla. Este último es un electrodo ajustable que permite variar la distancia a la superficie de la solución en estudio y es donde se lleva a cabo la generación del plasma. El sistema cuenta con un termómetro que se sitúa dentro de la solución con contaminante (para verificar la temperatura mientras se lleva a cabo el proceso), así como de una bomba de vacío y un sensor de vacío.

Figura 9.1 Esquema del dispositivo experimental



Esquema del dispositivo utilizado para la exposición ante el plasma no térmico de las soluciones en estudio, a presión atmosférica y baja presión.

Una vez colocada la solución en la cámara de reacción del sistema experimental, se genera el plasma no térmico. Para ello, se conecta el sistema y se ajustan los valores correspondientes de diferencia de potencial y corriente eléctrica en la fuente de alto voltaje (SPELLMAN SL600). Esto se hace para cada tratamiento (cuatro diferentes corrientes), para cada valor de presión (dos valores de presión) y para cada solución (dos soluciones). Los parámetros para cada uno de los tratamientos se muestran en la Tabla 9.1. Se realizaron cinco repeticiones para cada tratamiento con cada solución. Los resultados que se presentan son el valor promedio de las medidas tomadas.

Tabla 9.1 Parámetros considerados para la realización del presente experimento

Tratamiento	Tiempo de exposición (minutos)	Concentración (mg/L)	Voltaje (volts)	Amperaje (mA)
1	250	20	2000	15
2	250	20	2000	20
3	250	20	2000	25
4	250	20	2000	30

Los parámetros mostrados en esta tabla son los utilizados para la realización de los experimentos de las dos soluciones en estudio. Tanto a presión atmosférica (~ 760 Torr) como a baja presión (~ 10 Torr). Volumen de solución utilizada: 500 ml.

De manera general el procedimiento realizado es el siguiente. Colocada la solución en estudio dentro de la cámara de reacción, se cierra herméticamente, se establece la presión de trabajo, se fijan los parámetros de generación del plasma, se introduce uno de los electrodos en la solución, se pone en funcionamiento la fuente de alto voltaje y se ajusta el otro electrodo a una distancia de aproximadamente 2 mm de la superficie de la solución para generar el plasma. Cuando el plasma es generado, se debe vigilar la continuidad de éste durante todo el tratamiento. Transcurridos 25 minutos de exposición de la solución en estudio al plasma se procede a monitorear la temperatura de la solución, se detiene el tratamiento y se extrae una muestra para medir el cambio de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$. Todas las medidas se realizaron con un potenciómetro modelo: HI 9813-6N. Enseguida se reincorpora la muestra y se procede a reanudar el tratamiento extrayendo muestras cada 25 minutos hasta cubrir 250 minutos. Figura 9.2.

Figura 9.2 Plasma no térmico a presión atmosférica

a) Dispositivo experimental.



b) Electrodo en aire generador de plasma.

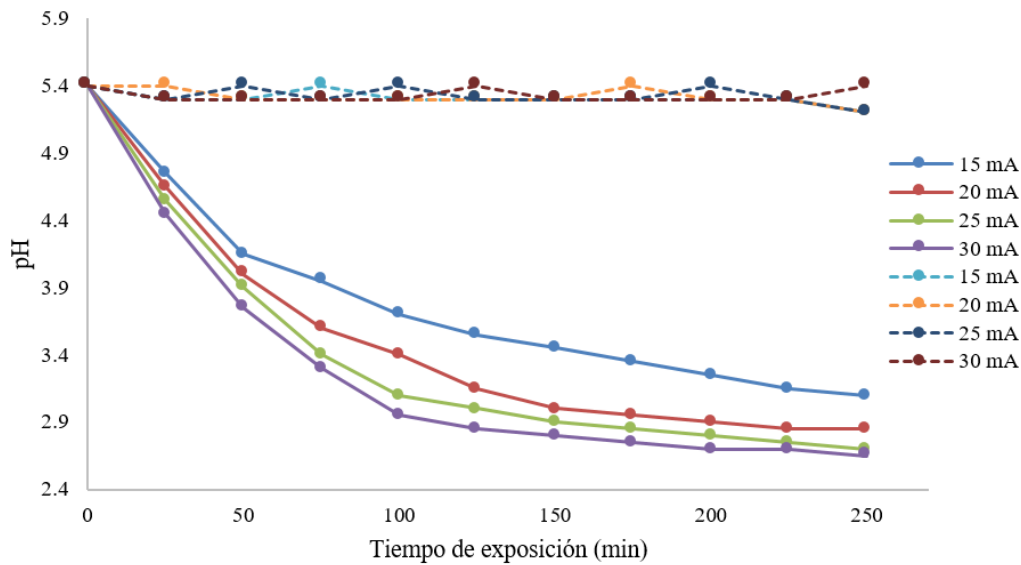


- Dispositivo experimental utilizado para el tratamiento de las soluciones de interés (colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %)
- Región de interacción de un plasma híbrido y de gas – líquido. Aire con superficie de solución a estudiar

Resultados y Discusión

En el gráfico 9.1, se muestra el comportamiento que tiene el cambio de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ de la solución acuosa de colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %, al ser expuesta a un plasma no térmico con variación en la intensidad de corriente. Se presenta el comportamiento de esta variable a presión atmosférica (~ 760 Torr) y a baja presión (~ 10 Torr).

Gráfico 9.1 Curvas de comportamiento del cambio de iones hidrógeno $[H^+]$ de la solución acuosa de colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %



Comportamiento del cambio de pH de la solución del Colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 % expuesta a un plasma no térmico como función del tiempo de exposición, del valor de la corriente generadora del plasma y del valor de la presión. Líneas continuas corresponden al plasma a presión atmosférica (~760 Torr). Líneas punteadas al plasma a baja presión (~10 Torr).

Se observa que los valores de pH de la solución acuosa de colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %, tienen un comportamiento decreciente conforme aumenta la intensidad de corriente y el tiempo de exposición al plasma a presión atmosférica (~760 Torr). Esto indica que la solución aumenta su nivel de acidez conforme avanza el tratamiento. La disminución de pH se presenta en todos los tratamientos, pero es más rápido en los primeros cien minutos de exposición. Así mismo, en los siguientes cincuenta minutos continúa decreciendo, pero de una forma más lenta en comparación a los primeros.

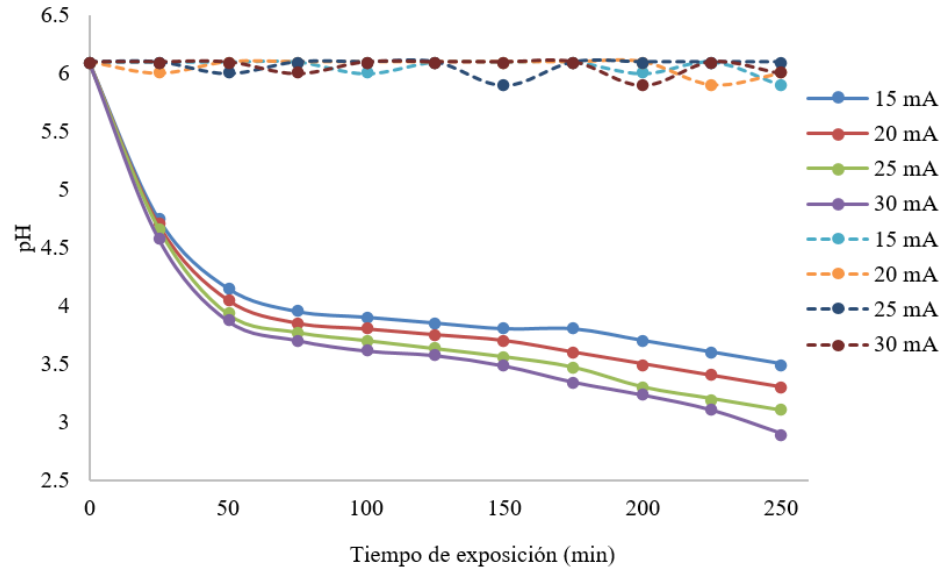
Es importante mencionar que el valor mínimo de pH (2.65) se observa en el tiempo o intervalo final del cuarto tratamiento; esto es, cuando se aplica una intensidad de corriente de 30 mA durante 250 minutos de exposición a presión atmosférica (~760 Torr).

Del gráfico, se observa que la rapidez de cambio de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ de la solución acuosa de colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %, depende directamente de la potencia del plasma, del tiempo de exposición, y si se compara con los tratamientos a baja presión (~10 Torr), también de la presión a la que se generó el plasma.

Por otra parte, se observa que para los cuatro tratamientos de plasma no térmico a baja presión (~10 Torr), los valores de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ de la solución acuosa de colorante en estudio no cambiaron tanto. Permanecieron entre valores de 5.4 y 5.2.

Un comportamiento análogo se observa en el gráfico 9.2, donde se muestra el cambio de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ de una solución de agua destilada, al ser expuesta a un plasma no térmico con variación en la intensidad de corriente.

Se presenta el comportamiento de esta variable a presión atmosférica (~760 Torr) y a baja presión (~10 Torr).

Gráfico 9.2 Curvas de comportamiento del cambio de iones hidrógeno $[H^+]$ de agua destilada.

Comportamiento del cambio de pH de agua destilada expuesta a un plasma no térmico como función del tiempo de exposición, del valor de la corriente generadora del plasma y del valor de la presión. Líneas continuas corresponden al plasma a presión atmosférica (~ 760 Torr). Líneas punteadas al plasma a baja presión (~ 10 Torr).

Para este caso, se observa que el cambio en la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ de la solución de agua destilada sometida a los mismos tratamientos de plasma y en general, bajo las mismas condiciones experimentales que las usadas en los tratamientos de la solución de colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 %, es más rápido en el tiempo. Para el agua destilada se tiene un cambio en el valor del pH de dos unidades en prácticamente los 50 minutos iniciales para todos los tratamientos a presión atmosférica (~ 760 Torr). Intervalo en el cual sucede el mayor cambio a mayor rapidez. En los siguientes minutos, el aumento de acidez en la solución es más lento, sin embargo, continúa.

Al igual que en el experimento del colorante, se observan dos regiones claras de cambios en la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ ligeramente desplazadas en el tiempo. Para este caso, el valor mínimo registrado para el pH fue de 2.9, partiendo de un valor inicial de 6. Es decir que se redujo aproximadamente en un 50 % análogo al primer caso.

Los cambios de concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ para los cuatro tratamientos de plasma no térmico a baja presión (~ 10 Torr), prácticamente no cambiaron. Permanecieron entre valores de 6.0 y 5.9. En general, se observa que la rapidez de cambio de la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ de la solución de agua destilada, depende directamente de la potencia del plasma, del tiempo de exposición, y de la presión experimental.

La disminución del pH en los dos casos analizados a presión atmosférica se atribuye por un lado a la generación del radical hidroxilo y radical hidronio, responsables de disminuir el pH del medio en el que se encuentran. Ambos radicales se generan en procesos de autoionización y disociación del agua a temperatura ambiente, y su concentración aumenta a medida que incrementa la temperatura.

Para el caso en el que el dispositivo experimental está a presión atmosférica (~ 760 Torr), la solución en estudio está en interacción directa con el aire circundante y la temperatura aumenta conforme pasa el tiempo de exposición al plasma. El aire a su vez contiene CO_2 , compuesto muy afín al agua destilada y, que al reaccionar con el sistema contribuye a una mayor generación de radical hidronio, tal como se muestra en las ecuaciones 1-3.



Por otra parte, es sabido que un plasma no térmico de descarga eléctrica aplicado sobre la superficie de agua (que contiene aire) conduce a un aumento de la acidez en la fase líquida (Brisset, 1990, Park, 2004, Burlica, 2008). En este caso se observó que el pH disminuyó de 5.4 a 2.65 (caso del colorante) y de 6.0 a 2.9 (caso del agua destilada) en una exposición de 250 minutos al plasma. Esto podría atribuirse a la generación también de HNO_3 , HNO_2 , y otros subproductos durante la experimentación. El HNO_3 y el HNO_2 pueden formarse en plasmas de aire húmedo o agua. En un sistema de descarga híbrido, se observó que se formaron NO y NO_2 a través de las reacciones de electrones energéticos con N_2 y O_2 en la fase gaseosa (Sathiamoorthy, 1999). Una vez que los iones NO_2 y NO reaccionan con H_2O , se forman HNO_3 y HNO_2 y disminuye el pH (Park, 2004, Burlica, 2006, Seinfeld, 2006). Las revisiones anteriores indican que los plasmas de descarga eléctrica en presencia de algún gas (aire para este caso) disminuye en gran medida el pH.

Caso contrario es el de las soluciones expuestas al plasma no térmico a baja presión (~10 Torr). En tales condiciones experimentales la ausencia o baja presencia de moléculas de aire o de algún otro gas, no favorecen la generación de los diferentes productos químicos mencionados anteriormente, responsables del cambio de la concentración de iones hidrógeno $[\text{H}^+]$.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, por las facilidades proporcionadas para la realización de esta investigación.

Conclusiones

El comportamiento del cambio de la concentración de iones hidrógeno $[\text{H}^+]$ durante el desarrollo de la experimentación a presión atmosférica (~760 Torr) de ambas soluciones (solución de colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200 % y solución de agua destilada), mostró una tendencia creciente para los 4 tratamientos conforme pasó el tiempo. Los valores de pH de la solución con colorante cambiaron de un pH = 5.4 a un pH = 2.6 para el cuarto tratamiento (30 mA). En los tres primeros (15, 20 y 25 mA) el valor final fue mayor (3.1, 2.8 y 2.7) respectivamente. Para la solución de agua destilada los valores cambiaron de un pH = 6.0 inicial, a valores de 3.5, 3.3, 3.1 y 2.9 finales, conforme aumentó la corriente de generación del plasma. De esto se concluye que los valores de corriente utilizados para los tratamientos aceleran los procesos químicos que cambian el pH de las soluciones. A mayor corriente, mayor acidez, más rápido.

Respecto de las soluciones sometidas a los cuatro tratamientos de plasma no térmico (15, 20, 25 y 30 mA) a baja presión (~10 Torr) no se observaron cambios significativos en los valores de pH conforme pasó el tiempo. En la solución con colorante el pH osciló entre valores de 5.4 y 5.2, para la solución de agua destilada entre valores de 6.0 y 5.9.

Es notorio que la disminución de moléculas de algún gas dentro de la cámara de reacción del plasma no térmico disminuye la generación de compuestos químicos promotores del cambio de la concentración de iones hidrógeno $[\text{H}^+]$. En este caso y bajo las condiciones del experimento, los elementos formadores de la molécula del colorante en estudio no mostraron un efecto considerable en el cambio del pH al disociarla, se considera fueron extraídas por el sistema de vacío.

Sugerencia de investigación

Como una propuesta de investigación interesante se plantea la realización de los mismos experimentos bajo iguales condiciones al presente, incorporando la consideración de más valores de la variable presión. Esto permitirá determinar cómo es el cambio de los valores de pH en función del número de moléculas del gas dentro de la cámara de reacción del plasma. Se propone también estudiar la variable temperatura conocido el comportamiento del cambio de pH bajo diferentes presiones.

Referencias

Aristizábal, C. A., y Bermúdez, A. M. C. (2007). Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso.

- Jiang Bo., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., y Xue Q. (2014). Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*, 236.
- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., y Van der Mullen, J. (2002). Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochim, Acta B*, (57), 609–658.
- Brisset, J.I., Lelievre, J., Doubla, A., y Amouroux, J. (1990). Interactions with aqueous solutions of the air corona products. *Revue Phys. Appl.* 25 (6), 535–543.
- Burlica, R., Kirkpatrick, M.J. y Locke, B.R. (2006). Formation of reactive species in gliding arc discharges. *J. Electrostat*, 64 (1), 35–43.
- Burlica, R., y Locke, B. R. (2008). Pulsed plasma gliding-arc discharges with water spray. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 44 (2), 482–489.
- Chen, C.W., Lee, H.M., y Chang, M.B. (2008). Inactivation of aquatic microorganisms by low-frequency AC discharges. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 36 (1), 215–219.
- Grymonpre, D.R., Finney, W.C., Clark, R.J., y Locke. B.R. (2004). Hybrid gas–liquid electrical discharge reactors for organic compound degradation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 1975–1989.
- Lemley, A. T., y McClung S. (1994). Electrochemical treatment and HPLC analysis of wastewater containing acid dyes. *Textile Chemist and Colorist*, 26, (8), 17-22.
- Locke, B.R., Sato, M., Sunka, P., Hoffmann, M.R., y Chang, J.S. (2002). Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.*, (45), 882–905.
- Mejía, C. y Osorio, V. (2003). Decoloración de las aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. *Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 1, (29).
- Neumann, E., Sowers, A.E., y Jordan, C.A. (1989). Electroporation and Electrofusion in Cell Biology. *Plenum Press*, New York.
- Ohshima, T., Okuyama, K., y Sato, M. (2002). Effect of culture temperature on highvoltage pulse sterilization of *Escherichia coli*. *J. Electrostat*, 55, 227–235.
- Park, j.Y., y Lee, J.D. (2004). The effect of conductivity on active species products by electrical discharge with air bubble in water. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Nonthermal Plasma Technology, Florida, USA*, pp. 83–88.
- Sarabia, A. (2019). *Producción de hidrógeno a partir del tratamiento de agua residual mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea* (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México, México.
- Sathiamoorthy, G. (1999). Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NO_x removal in a pulsed streamer corona discharge reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 1844–1855.
- Sato, M., Ishida, N.M., Sugiarto, A.T., Ohshima, T., y Taniguchi. H.(2001). High-efficiency sterilizer by high voltage pulse using concentrated-field electrode system. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 37 (6), 1646–1650.
- Seinfeld, J.H., y Pandis, S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2nd Edition, Wiley, New York.
- Vandenbroucke, A.M., Morent, R.N., Geyter, D., y Leys, C. (2011). Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement. *J. Hazard. Mater.* (195), 30–54.
- Zimmermann, U. (1986). Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* 105, 176–256.