



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC.

EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN DEL COLORANTE
TEXTIL NEGRO ÁCIDO 52 (NA52) EN SOLUCIÓN
ACUOSA, ANTE UN PLASMA NO TÉRMICO.

T E S I S.

QUE PRESENTA:

ALEXIS TABAREZ DE LEON.

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL.

Director: Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández.

Codirector: Dr. Esteban Montiel Palacios.

JUNIO 2021



Ayala, Morelos a 02 de septiembre del 2020.

**DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ
DIRECTORA DE LA EESX
P R E S E N T E**

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título **EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN DEL COLORANTE TEXTIL NEGRO ÁCIDO 52 (NA52) EN SOLUCIÓN ACUOSA, ANTE UN PLASMA NO TÉRMICO**. Que ha realizado el pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Industrial, Alexis Tabarez de León**, otorgamos nuestro voto de aprobación para su impresión por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

M.C.I. María Lucrecia Díaz Flores

Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán

Dr. José Luis Gadea Pacheco

Dr. Esteban Montiel Palacios

Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FIDEL BENJAMIN ALARCON HERNANDEZ | Fecha:2020-09-02 09:59:02 | Firmante
 BwIHPKdZJUDDd1+cL+VeKkR/IncNm+ThRvBXmVFKLxpInp9yCmRLfHSezG83Wd51o7aTeBsrF9XX73Etq0q7hDUsl2gULhu6scBAFfSRVPHkF1rW3MLwyLWRhVKwuidWQIG
 peRDU72SEdS2hJmH1Wo8k+HSoqC2eX7I/S/1uCYnB/YfthRIM1VUxAXwQEW51hnxXG9K52vix3HEp2LQz3j0Bgy1UmHMT0agtqsjYnPP7clxZOmZ7AK7nSth4acX9kbR9+Hp
 g5ZgYuCz8S5wqNelhmANwYCYCAEBINZAcc8zgh7jOLEeT4Mj55noni81yNrssVnFJMPVw==

ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2020-09-02 10:12:33 | Firmante
 WR7ugfHAuHijBLd7Pie188k4WH39R02pT9azy8XIV55yq6MQGGZ008MWTmct7dPkITMc5BBkPY6tsp+cG8LLz+hxK1DNEM2nyR060Xy9g9cFhD9y9PV0nYYHzgA+4OmdR
 pW0K7994MqYYm5PHBRL9kTyCOZRx4YmP89Bj7P0eOqMS1d2lb8S1CJD+2/vCbjbkAVeFOPs4baLLR678OgcpdmWhpyC86+ciSj6G8IGwAXQXVUNUaO4wwCdmovDd2
 h5uIBJStnsJrAhTJSqWMMJqymTqW7Tmjo9WSAz16+IIXmS+IUEz2a8QI/DOJzERbSR1Bgw==

MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRAN | Fecha:2020-09-02 13:03:08 | Firmante
 oH56DxXWQgyra6Q4vcRFH7+IgrzYGws4+Er0UlgEOGzYybG6ZuDiM4GWB55LJE4KcYRipz/Bq+JPDHMTys4o3F7+EOYVidK3l5nTO8GdK7yXEgnY9laAexmGG0waZbWM
 L2mWj/m+5CI8VXLJQaxs0ey3M7qFeDh2Qfn78L4KTnd5FJsoaax9QyCEwwZdhF2q8H49xZFZfKvBijl6M1UqG/bK+IZDERXsStoDLxg2AIyJKZBskWLofOqHdFimMvbx
 ESIGC59EqC0ZDYH60uwECOM234ayq1220Z215IR4zv8L0AD0kzP+HtOBgTBHFqux3g==

MARIA LUCRECIA DIAZ FLORES | Fecha:2020-09-02 13:14:46 | Firmante
 K1hACv8Y8vaqjU8Nsoj6s6r+wtSnGHKZsPRWQl0gNjImNqm+r3s7i0Lm+MuLsJEXyXZ582PFZjaA90voq5v04jMTwJKus5Jzb0BC0wXVhoFh8GFdkhIXe8h+PdzENW7vWf
 Wx0x4E4eC1Z2UurYcFCMDy8HEWec4Vr3cZAbDy6IKH8csEpiV0E0MuhOot2DnYDFgsXBU3BEItWkPVdJJS34au7MK8TnOykA2+UzRjU+8F3i4zPVJC+Or96JoulNF+r77n9DT
 Hu0DZP4iWPxClRTPsEIOAhRbDyo1Li9BE9B8TreJnnhhywo/HRqLlSeOIm6ag==

JOSE LUIS GADEA PACHECO | Fecha:2020-09-07 10:56:43 | Firmante
 aRH0dloHO+bVuokSiQeeRwktGtaYAnB4pR7XW5PZ5pOBz2EVAOiwZFGm82FeYDWWmqVrTHfKSFHexdG6GnRR9MPhcz8rKT3K8FGMSqS0qqrjKHq9G66K0riEyBVClor
 6AYYhCHLnl3+MzQvmakK7S5nR8iKwgZC+Izz9c7A+DlaxL9ebAXVUc9ucBp1kFXPDOZICi7G9Zm9IPcSA+H9wBdSw+J+7c/7i+KDE6w4X/ecB94i1YXJdDVdK1wWlU688ZqaN
 Of3b4mz5uDXJl8J7DhDqHqjd6N6PFTMINQ9f9V6GSCeIB2A2wcUAIH2289IUS642O2/0Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



QtZXU8

<https://firma.uaem.mx/hoRepublio/Rn6P8sXg/WSCD9V8Y9DhVmy2HOzInQJ>

A mis padres Pascual Tabarez y Socorro de León...

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández por su paciencia y valiosas enseñanzas, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por su apoyo y guía en mi formación.

A los miembros del jurado por tomarse el tiempo de leer el presente trabajo y por los comentarios hechos al respecto: M. C. I. María Lucrecia Díaz Flores, Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán, Dr. José Luis Gadea Pacheco, Dr. Esteban Montiel Palacios, Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández.

A mi tan apreciada UNIVERSIDAD ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC.

A mi madre **Socorro de León Rodríguez**, por el amor y cuidado que tuvo para conmigo. Por creer en mí, por darme ese impulso, por ser una motivación en mi vida, por formarme y guiarme en mi camino de una manera correcta.

A mi hermano, **Mario** por ser un ejemplo a seguir y por darme la oportunidad de cumplir mi meta, a mis hermanos Esaú, Guadalupe e Irvin por su apoyo y comprensión.

A Dios por permitir cada logro, por la salud y la vida.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	11
I.2. Hipótesis	13
I.3. Objetivos	13
I.3.1. Objetivo general.....	13
I.3.2. Objetivos particulares	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	14
II.1. Colorantes.....	14
II.1.1. Aplicaciones	16
II.1.2. Sistemas de clasificación de los colorantes textiles	17
II.1.3. Generalidades del colorante textil negro ácido 52 (NA52).....	22
II.2. Plasma	23
II.2.1. Propiedades electromagnéticas del plasma.....	25
II.2.2. Temperaturas de plasma: Plasmas térmicos y no térmicos	27
II.2.3. Plasmas térmicos.....	28
II.2.4. Plasmas no térmicos.....	29
II.2.5. Aplicaciones industriales del plasma	34
II.2.5.1. Industria aeroespacial.....	35
II.2.5.2. Aplicaciones en materiales y biomateriales	35
II.3. Parámetros que indican la calidad del agua.....	38
II.3.1. Parámetros físicos	38
II.3.2. Parámetros químicos.....	39
II.3.2.1. Carbono orgánico total (COT)	39
II.3.2.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	39
II.3.2.3. pH (Potencial de Hidrógeno).....	40
II.3.2.4. Absorbancia.....	41
II.4.3. Parámetros biológicos	43
II.4.3.1. Ensayos toxicológicos con semillas de lechuga <i>Lactuca sativa</i>	44

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	46
III.1. Dispositivo experimental	46
III.2. Preparación de la solución Negro Ácido (NA52)	47
III.3. Exposición de la solución de NA52 al plasma (a baja presión y a presión atmosférica).....	47
III.4. Muestreo	49
III.5. Indicadores de modificación del colorante Negro Acido 52 en solución acuosa.....	50
III.5.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)	50
III.5.2. Determinación de absorbancia.....	51
III.5.3. Temperatura	52
III.5.4. Evaluación de Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	52
III.5.5. Evaluación de carbono orgánico total (COT)	53
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
IV.1. Absorbancia.....	57
IV.1.1. Absorbancia de la solución acuosa NA52 a baja presión	58
IV.2. Potencial de hidrógeno (pH)	60
IV.2.1. Potencial de hidrógeno (pH) de solución acuosa de NA52 a baja presión.....	61
IV.2.2. Comparación del potencial de hidrógeno en los dos diferentes escenarios (presión atmosférica y baja presión).....	63
IV.3. Temperatura.....	63
IV.3.1. Temperatura de la solución acuosa de NA52 a baja presión.....	64
IV.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	65
IV.4.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la solución NA52 a baja presión	66
IV.5. Carbono Orgánico Total (COT).....	67
IV.6. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	68
IV.6.1. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>) en una solución de NA52 a baja presión	70
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	72

BIBLIOGRAFÍA..... 76

Lista de figuras

FIGURA 2.1. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA DEL AZOBENCENO.	19
FIGURA 2.2. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA ANTRAQUINONA AMARILLA O PÁLIDA.	20
FIGURA 2.3. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA FTALOCIANINA.	20
FIGURA 2.4. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA ION ARILCARBONIO.	20
FIGURA 2.5. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA SULFURO.	21
FIGURA 2.6. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA POLIMETINO.	21
FIGURA 2.7. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA FÓRMULA DE NITRO.	21
FIGURA 2.8. ESTRUCTURA QUÍMICA DEL NEGRO ÁCIDO 52(NA52).	22
FIGURA 2.9.H COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS CARGADAS EN UN CAMPO MAGNÉTICO. LAS PARTÍCULAS POSITIVAS GIRAN EN UN SENTIDO Y LAS NEGATIVAS EN EL SENTIDO OPUESTO. COMO LOS IONES TIENEN MAYOR MASA QUE LOS ELECTRONES, SU RADIO DE GIRO SERÁ MAYOR. (UN ACAPARADOR POCO CONOCIDO, PEQUEÑO TEXTO DE PLASMA)	26
FIGURA 2.10. REACTOR PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL CON PLASMA FRÍO.	30
FIGURA 2.11. A. PRÓTESIS ARTERIAL. B. PRÓTESIS OCULAR. C. PRÓTESIS DE CADERA. D. PRÓTESIS DE RODILLA.	36
FIGURA 2.12. TELA ANTES (A) Y DESPUÉS (B) DEL TRATAMIENTO POR PLASMA.	37
FIGURA 2.13. MÓDULO ELÁSTICO DEL PEAD PURO Y DE LOS NANO COMPUESTOS PEAD/NFC-NT Y PEAD/NFC-T.	37
FIGURA 2.14. ESPECTRO DE ABSORCIÓN.	42
FIGURA 2.15. MORFOLOGÍA DE LA SEMILLA Y LA PLÁNTULA DE LECHUGA LACTUCA SATIVA.	45
FIGURA 3.1. ESQUEMA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.	47
FIGURA 3.2. EXPOSICIÓN AL PLASMA.	49
FIGURA 3.3. BIOENSAYOS CON SEMILLAS DE LECHUGA LACTUCA SATIVA.	56
FIGURA 4.1. ABSORBANCIA DE SOLUCIÓN ACUOSA DE NA52 A PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y A DIFERENTES CORRIENTES: 10 mA, 15 mA, 20 mA Y 30 mA.	57
FIGURA 4.2. ABSORBANCIA DE SOLUCIÓN ACUOSA DE NA52 A BAJA PRESIÓN Y A DIFERENTES CORRIENTES: 10 mA, 15 mA, 20 mA Y 30 mA.	59
FIGURA 4.3. COMPORTAMIENTO DEL pH DE LA SOLUCIÓN ACUOSA DE NA52 EXPUESTA AL PLASMA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA.	60
FIGURA 4.4. COMPORTAMIENTO DEL pH DE LA SOLUCIÓN ACUOSA DE NA52 EXPUESTA AL PLASMA A BAJA PRESIÓN.	62
FIGURA 4.5. COMPORTAMIENTO DEL pH DE LA SOLUCIÓN ACUOSA DE NA52 EXPUESTA A UN PLASMA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y A UN PLASMA A BAJA PRESIÓN. LAS LÍNEAS PUNTEADAS CORRESPONDEN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA.	63
FIGURA 4.6. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN ACUOSA DE NA52 EXPUESTA AL PLASMA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y A BAJA PRESIÓN. LAS LÍNEAS PUNTEADAS CORRESPONDEN AL EXPERIMENTO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA.	64
FIGURA 4.7. COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LA SOLUCIÓN DE NA52 AL INICIO Y DURANTE EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE 100 MINUTOS DE CADA TRATAMIENTO. PRESIÓN ATMOSFÉRICA.	65

FIGURA 4.8. COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LA SOLUCIÓN DE NA52 AL INICIO Y DURANTE EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE 200 MINUTOS DE CADA TRATAMIENTO. PRESIÓN ATMOSFÉRICA	65
FIGURA 4.9. COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LA SOLUCIÓN DE NA52 AL INICIO Y DURANTE EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE 100 MINUTOS DE CADA TRATAMIENTO. BAJA PRESIÓN.....	67
FIGURA 4.10. COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LA SOLUCIÓN DE NA52 AL INICIO Y DURANTE EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE 200 MINUTOS DE CADA TRATAMIENTO. BAJA PRESIÓN.....	67
FIGURA 4.11. COMPORTAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL DE LA SOLUCIÓN NA52 AL INICIO Y FINAL DE CADA TRATAMIENTO (TRATAMIENTOS 1, 2, 3 Y 4) CON UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL APLICADA = 1,500 V Y UNA INTENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA = 10, 15, 20 Y 30 mA RESPECTIVAMENTE, A PRESIÓN ATMOSFÉRICA. EN EL PUNTO CERO NO SE APLICARON TRATAMIENTOS	68
FIGURA 4.12. PORCENTAJE DE GERMINACIÓN DE SEMILLA DE LECHUGA LACTUCA SATIVA, HIDRATADAS CON SOLUCIÓN DE NA52, EXPUESTO A PLASMA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA. CONTROL (-) AGUA DESTILADA. CONTROL (+) SOLUCIÓN DE NA52	69
FIGURA 4.13. PORCENTAJE DE GERMINACIÓN DE SEMILLA DE LECHUGA LACTUCA SATIVA, EXPUESTA A LA SOLUCIÓN DE NA52, SOMETIDA AL TRATAMIENTO DE PLASMA A BAJA PRESIÓN. CONTROL (-) AGUA DESTILADA. CONTROL (+) SOLUCIÓN DE NA52	71

Lista de tablas

TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES TEXTILES.....	17
TABLA 2.2. FICHA TÉCNICA DEL NEGRO ÁCIDO 52 (NA52).....	22
TABLA 2.3. REACCIONES QUÍMICAS.....	32
TABLA 3.1. PARÁMETROS UTILIZADOS EN CADA EXPERIMENTO CON PLASMA (BAJA PRESIÓN Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA).....	48
TABLA 4.1. POLINOMIOS MATEMÁTICOS Y COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	58
TABLA 4.2. POLINOMIOS MATEMÁTICOS Y COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA A BAJA PRESIÓN.....	59

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la tecnología de plasma es muy importante para la producción de bienes más duraderos y para la protección ambiental. Con ésta se obtienen resultados industriales de forma más eficiente y efectiva que los que no involucran plasma, también reducen los costos de producción al no generar productos indeseables, materiales de desecho, residuos tóxicos ni contaminantes del ambiente (Bogaerts *et al.*, 2002).

El plasma es un gas parcialmente ionizado que puede encontrarse tanto en forma natural como generado en un laboratorio. De forma natural, está presente en el sol, las estrellas, las descargas eléctricas, las auroras boreales, entre muchas más. De manera artificial, puede generarse en el laboratorio mediante tecnología especializada y de diferentes maneras.

En México como en el mundo, está en auge su utilización en todas las áreas de la investigación. Se emplea en labores de corte y soldadura en la industria metalmecánica, en la generación de energía en reactores de fusión nuclear, para mejorar procesos para la obtención de combustibles en el caso de las fuentes de energía no renovables; también se utiliza como apoyo en la medicina para la esterilización de material quirúrgico en frío, así como en el desarrollo de biomateriales para injertos y prótesis (Chu *et al.*, 2013). Actualmente es indispensable para la fabricación de microchips y baterías recargables, también es auxiliar en la restauración y conservación de piezas arqueológicas; permite producir materiales, equipos y hasta procesos que minimizan el daño al medio ambiente en minería, metalurgia y petróleo.

En general, en un reactor de plasma las interacciones químicas se aceleran y los procesos que suceden en varias etapas se pueden alcanzar en una sola, esta característica propia de las reacciones que se generan por la exposición de sustancias y/o materiales a un plasma, son las que se pretende explorar para generar nuevos conocimientos, aplicaciones y tecnologías dentro del campo de los procesos de caracterización de colorantes.

La generación de plasmas se produce con diferentes métodos, la más recurrida en la mayoría de los casos, es la generación mediante una diferencia de potencial específica, de acuerdo con los requerimientos establecidos por cada proceso de experimentación o prueba.

Para que se genere el plasma, es necesaria una diferencia de potencial entre dos electrodos (ánodo y cátodo). La exposición del medio acuoso entre estos dos electrodos forma el sistema para que las cargas del plasma entre el aire y la solución (colorante), inicien el proceso de transformación del compuesto. Por otra parte, debido a la alta capacidad del plasma como generador de agentes oxidantes, se facilita la transformación, modificación y reducción de variados compuestos químicos que existan en la solución acuosa.

El plasma es una tecnología bastante flexible, por lo que ha tenido un impacto en muchas disciplinas y tecnología a lo largo de la historia. Se ha desarrollado de manera impactante pues la producción de plasma no es un problema para las industrias o para otras áreas donde se necesite, ya que su generación no tiene gastos enormes como otras tecnologías.

El presente trabajo de investigación se distribuye de la siguiente manera.

- ❖ Capítulo 1 Introducción. Proporciona una contextualización general acerca del tema de investigación, la razón por la que se desea indagar sobre ello, así como los objetivos generales y particulares del proyecto.

- ❖ Capítulo 2 Marco teórico. Se explica brevemente acerca de la clasificación de los colorantes, las variables físicas y químicas que los caracterizan en solución acuosa como: pH, temperatura, absorbancia, DQO, COT y parámetros de toxicidad (germinación en semillas). Métodos de tratamiento de aguas residuales; así como parámetros que indican la calidad del agua y las técnicas para evaluarlos.

- ❖ Capítulo 3 Desarrollo experimental. Se explican de manera detallada los pasos para llevar a cabo este proyecto, materiales y equipos utilizados, preparación de la solución de interés, tratamiento de exposición al plasma y extracción de las muestras.
- ❖ Capítulo 4 Resultados y discusión. Se muestran los resultados obtenidos durante el tratamiento, así como un análisis y discusión de éstos.
- ❖ Capítulo 5 Conclusiones. Se presentan las conclusiones más relevantes de la investigación.

I.2. Hipótesis

La potencia del plasma no térmico es componente básico para acelerar la disminución de la tonalidad propia del colorante textil negro ácido 52 (NA52) en solución acuosa a una concentración específica.

I.3. Objetivos

I.3.1. Objetivo general

Determinar los cambios generados respecto de la absorbancia en una solución acuosa del colorante negro ácido 52 (NA52), tras su exposición a un plasma no térmico a diferentes potencias.

I.3.2. Objetivos particulares

1. Construir un dispositivo experimental con electrodos de tungsteno en el cual se genere el plasma no térmico aire - agua.
2. Exponer durante un tiempo específico ante el plasma no térmico aire – agua la solución acuosa de colorante. Realizar este proceso para diferentes potencias del plasma.
3. Observar y cuantificar el efecto que tiene el plasma aire-agua en el cambio de la absorbancia del colorante como función del tiempo y de la potencia del plasma.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

II.1. Colorantes

No todos los colorantes son extraídos de productos naturales como plantas y/o animales, también pueden obtenerse por síntesis industrial. La mayoría de los colorantes son elaborados o hechos por una reacción química y son denominados colorantes artificiales.

Los colorantes son una mezcla capaz de pigmentar las fibras animales y vegetales, su uso ya data de tiempo remotos donde se extraían de diversas materias procedentes de vegetales, como el índigo natural y la cúrcuma; o de animales, como los moluscos y las cochinillas. En algunas circunstancias los colorantes también eran extraídos de distintos minerales, como de las tierras rojas, que tienen abundancia de sales de hierro.

Actualmente, la química ha entrado de lleno en este sector, para comprobar y analizar que los colorantes son capaces de absorber determinadas longitudes de onda de espectro visible. Estos nuevos colorantes son utilizados en diferentes industrias, una de ellas es la industria textil (Fuente: <https://www.quiminet.com/articulos/la-importancia-de-los-colorantes-en-la-industria-textil-2637578.htm>).

La industria textil es una de las más importantes y al mismo tiempo, una de las más contaminantes debido a la emisión de compuestos químicos y por la gran cantidad de agua que utiliza y vierte a cuerpos de aguas limpios.

Los colorantes sintéticos utilizados actualmente suelen resistir las condiciones de luz, temperatura, acción de detergentes y la degradación microbiana, por lo que son considerados compuestos altamente recalcitrantes y son difíciles de eliminar por los métodos de depuración convencionales.

No todos los colorantes son directamente tóxicos para los organismos vivos, pero, la fuerte coloración que ofrecen a los medios de descarga puede llegar a eliminar los procesos

fotosintéticos en el agua, por lo que su manejo debe estar regido por normas que la empresa debe cumplir y puedan ser controlados para que no tengan un impacto ambiental y el daño sea reversible.

La mayoría de los colorantes textiles utilizados son de origen sintético, poseen una solubilidad alta en el agua, son altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables.

Efectos de los colorantes en la salud y en cuerpos de agua:

Se deben tomar medidas en el mundo de las tinturas en la industria textil y el efecto que tienen sobre el medio ambiente y las personas que trabajan manejándolas a diario. El manejo inadecuado de los colorantes es una problemática global en términos tanto ecológicos como laborales.

- Toxicidad en la salud de las personas: Es el problema debido a la exposición de los trabajadores a estas sustancias químicas. Los riesgos de la exposición a sustancias químicas peligrosas siempre serán mayores en áreas industriales.

Los tintes están diseñados para resistir la luz, las altas temperaturas, el lavado, los detergentes y otros procesos a los que los humanos los someten en las fases de acabado y uso. Por ello, los químicos que se quedan en el agua y el producto en el proceso de teñido tornan a éste en una acción de riesgo para:

- los trabajadores, sometidos largas horas al contacto con los productos tóxicos.
 - el consumidor de productos textiles, ya que estos colorantes son resistentes a los baños.
 - el agua, que se convierte en una sustancia altamente contaminada.
- Presencia de colorantes textiles en cuerpos de agua: Las aguas residuales vertidas en cuerpos de agua representa un problema ambiental, ya que este tipo de compuestos no puede eliminarse con los métodos de tratamiento convencionales.

Debido a que la mayoría de los sistemas de tratamiento basados en métodos químicos o físicos son costosos, requieren de gran cantidad de energía, mucho tiempo de tratamiento y grandes cantidades de reactivos.

II.1.1. Aplicaciones

A continuación, se listan algunas de las múltiples industrias donde se usan colorantes.

- **Industria alimentaria:** Se utilizan colorantes alimenticios, comúnmente como los azules, rojos o amarillos, en refrescos, dulces, helados, aperitivos, derivados cárnicos, tostadas, tortillas, salsas, condimentos, entre otros productos. En mermeladas y galletas, productos de pastelería y/o repostería, sopas instantáneas y subproductos de la industria cárnica, etc., así como en bebidas y licores.
- **Industria farmacéutica:** Los colorantes son usados comúnmente en aplicaciones que van desde la preparación de sustancias farmacéuticas, como colorante de teñido, hasta como determinante de alcalinidad.
- **Industria cosmética:** Los colorantes negro, amarillo y rojo, encuentran uso en bases líquidas, polvos para el rostro y pintalabios. Los colorantes blancos tienen un amplio uso en todos los cosméticos, muestran un poder de cobertura extremadamente bueno. La mica da una translucidez natural cuando se usa como polvos faciales y pintalabios en polvo. Comúnmente se emplean colorantes en prácticamente todos los productos cosméticos y de higiene personal.
- **Otras aplicaciones industriales:**
 - ✓ Industria petrolera.
 - ✓ En tintas de impresión.
 - ✓ En la coloración de plásticos.
 - ✓ En la industria textil, del papel, de la agricultura, de la cerámica, de la construcción, de la carpintería, del caucho, de cableado, entre otras.
 - ✓ En pinturas que incluyen revestimientos decorativos y protectores y en pinturas basadas en aceites y resinas.

Datos importantes: En general, los colorantes sintéticos son más resistentes a los tratamientos térmicos (debido a los compuestos o conservadores que estos tienen) pH

extremos, luz, etcétera, que los naturales (Fuente: <https://www.neokem.mx/colorantes-alimenticios-aplicaciones.pdf>).

II.1.2. Sistemas de clasificación de los colorantes textiles

Los colorantes se pueden clasificar de acuerdo con su estructura química o de acuerdo al uso o método de aplicación. La clasificación por estructura química es hecha por quienes desarrollan colorantes, pues saben identificar fácilmente a los colorantes que pertenecen a un grupo por sus propiedades características; tales como los colorantes azoicos (de coloración fuerte y bajo costo), o bien, los colorantes antraquinónicos (de débil coloración y alto costo). Por otra parte, la clasificación por uso tiene ventajas, si se considera previamente la clasificación química, pues ésta y su nomenclatura surgieron a partir de la clasificación química (Pablo Z. *et al.*, diciembre de 2018).

La tabla 2.1. Resume la clasificación química y la clasificación de uso, basada en las categorías del Colour Index. A continuación de la tabla se da una breve descripción de algunas de las más importantes de las categorías tintóreas.

Tabla 2.1. Clasificación de los colorantes textiles (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

Clasificación química	Clasificación de uso o tintórea
Azoicos	Ácidos
Antraquinónicos	Básicos
Heterocíclicos	Dispersos
Indigoídes	Directos
Derivados de ftalocianina	Reactivos
Polimetínicos	a la Cuba
Estilbénicos	Sulfurosos
Sulfurosos	Azoicos sobre fibra
Trifenilmetánicos	Pigmentos

Clasificación de uso o tintórea.

- Colorantes Ácidos: Son colorantes aniónicos, es decir, que tienen carga negativa en solución acuosa. Son aplicados sobre nylon, lana, seda y fibras acrílicas modificadas.

También son utilizados, con menor frecuencia, para colorear artículos de papel y piel; así como para la elaboración de tintas de impresión, y en las industrias de alimentos y cosméticos.

- **Colorantes Básicos:** Se trata de colorantes catiónicos, solubles en agua; aplicables sobre papel, poliacrilonitrilo, poliamidas modificadas y poliésteres modificados. Originalmente se utilizaban para teñir artículos de lana, seda y algodón Mordentado con ácido tánico, siempre y cuando la brillantez del color fuese más importante que las características de solidez. Algunos colorantes básicos muestran actividad biológica, por lo que son utilizados en medicina como antisépticos.
- **Colorantes Dispersos:** Son colorantes no iónicos, insolubles en agua; que se aplican desde una dispersión acuosa sobre fibras hidrofóbicas. Estos se emplean principalmente para teñir poliéster y, en menor medida, sobre nylon, acetato de celulosa y fibras acrílicas. Se les utiliza también para estampados por termo transferencia y en algunas aplicaciones fotográficas.
- **Colorantes Directos:** Son colorantes aniónicos, solubles en agua; que tienen sustantividad hacia la celulosa en presencia de electrolitos. Su uso principal es el teñido de algodón y fibras de celulosa regenerada. Se emplean también para colorear papel y piel. Algunos de ellos se usan para el teñido de nylon. Con frecuencia se aplican tratamientos posteriores a los teñidos realizados con estos colorantes, para mejorar sus propiedades de solidez al lavado.
- **Colorantes Reactivos:** Estos colorantes forman un enlace covalente con la fibra, lo cual hace que sus propiedades de solidez al lavado sean muy buenas. Son aplicados sobre algodón principalmente y, en menor proporción, sobre lana y nylon. Al igual, que los colorantes directos, se trata de colorantes aniónicos, solubles en agua; no obstante, sus estructuras químicas son relativamente más simples, por lo que sus bandas de absorción son más estrechas y, en consecuencia, se trata de colorantes de mayor brillantez que aquellos.
- **Colorantes a la Cuba:** Son colorantes insolubles en agua. Se aplican principalmente sobre algodón en forma de sales solubilizadas por reducción en medio alcalino; a esta forma se le llama leuco o leucoderivado. El leuco es oxidado posteriormente,

para regresarlo a su forma insoluble, una vez que se encuentra dentro de la fibra. El índigo, que originalmente se extraía de ciertas plantas y es aplicado extensamente en el teñido de la mezclilla, está clasificado en esta categoría y recibe el nombre de Azul a la Cuba 1.

- Colorantes Sulfurosos: Son colorantes insolubles en agua, de estructura química desconocida. Estos se aplican sobre algodón de forma similar a los colorantes a la cuba, es decir, en forma reducida y posteriormente se reoxidan. Numéricamente, son muy pocos; y no son colorantes que presenten brillantez. Son colorantes de bajo costo que, no obstante, éstos se tratan de usar en menor medida o se usan cada vez menos debido a implicaciones ambientales, pues en su aplicación se emplea sulfuro de sodio como agente reductor (Pablo z., **et al.**, diciembre del 2018).

Clasificación química.

- Azoicos: Este grupo de colorantes es el más importante dentro de la industria textil con una elaboración aproximada del 70% de los colorantes orgánicos del mercado.

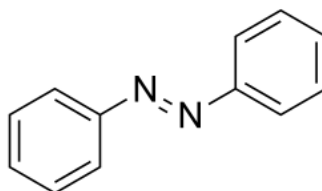


Figura 2.1. Estructura química de la fórmula del azobenceno (Pablo Z., **et al.**, diciembre del 2018).

- Antraquinonas: Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contienen uno o más grupos hidroxilo.

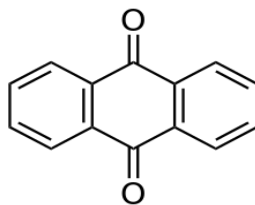


Figura 2.2. Estructura química de la fórmula antraquinona amarilla o pálida (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

- Ftalocianina: Estos colorantes están formados por la unión de cuatro grupos isoindol (dos anillos fusionados, uno bencénico y el otro; una piridina) mediante cuatro átomos de nitrógeno, dando lugar a un anillo de 16 átomos: ocho de nitrógeno y ocho de carbono, alternados con dobles enlaces conjugados.

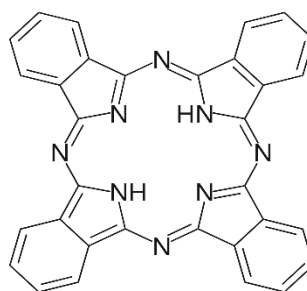


Figura 2.3. Estructura química de la fórmula Ftalocianina (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

- Ion arilcarbonio: Su estructura química está conformada por un átomo carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.

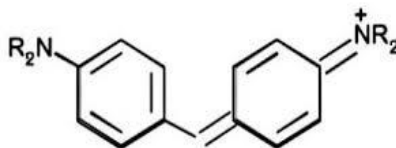


Figura 2.4. Estructura química de la fórmula ion arilcarbonio (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

- Sulfuroso: Grupo de colorantes totalmente insolubles en agua, pero soluble por reducción. Proporciona una variedad de colores bajos y apagados.

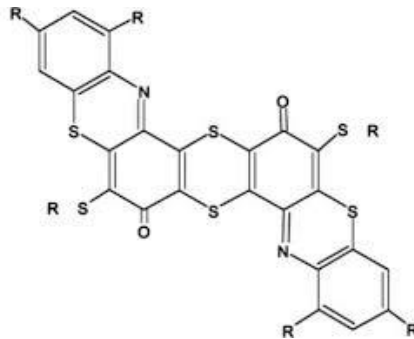


Figura 2.5. Estructura química de la fórmula sulfuroso (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

- Polimetino: Se clasifican en tintes neutros, catiónicos y aniónicos. En los extremos de su cadena poseen un grupo donador y un sustractor de densidad electrónica.

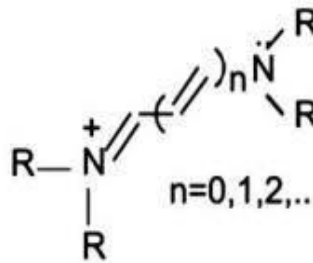


Figura 2.6. Estructura química de la fórmula polimetino (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

- Nitro: Son un grupo de colorantes incoloros cuando se encuentran aislados. Su absorción se encuentra muy cerca del campo visible por combinación de grupos auxocromos débiles, adquiriendo una tonalidad amarillenta.

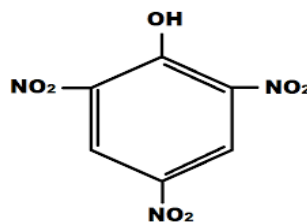


Figura 2.7. Estructura química de la fórmula de nitro (Pablo Z., *et al.*, diciembre del 2018).

II.1.3. Generalidades del colorante textil negro ácido 52 (NA52)

Colorante textil industrial, polvo color marrón oscuro. Se usa para lana, poliamida, teñido e impresión de seda, también se usa en teñido de cuero y aluminio.

Nombre comercial: Negro ácido 52 (NA52).

Nombre IUPAC: Sodio 3-hidroxi-4-[(E)-(1-hidroxi-2-naftil) diazenyl]-7-nitro-1-naftalensulfonato).

Estructura química:

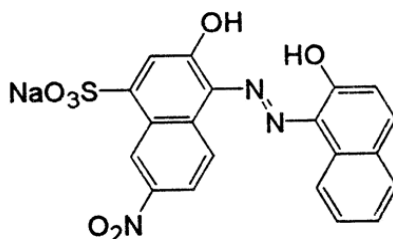


Figura 2.8. Estructura química del Negro Ácido 52 (NA52)

(Fuente: <http://www.worlddyevariety.com/acid-dyes/acid-black-52.html>).

Fórmula molecular: $(C_{20}H_{12}N_3NaO_7S)$

Peso molecular: $461.38 \frac{g}{mol}$ (Fuente: <http://www.worlddyevariety.com/acid-dyes/acid-black-52.html>).

En la tabla 2.2 se muestra la ficha técnica del NA52, la cual incluye su aspecto físico, compuestos de descomposición, así como su toxicidad y riesgo en una persona.

Tabla 2.2. Ficha técnica del Negro Ácido 52 (NA52) (Fuente: <http://www.dcfinechemicals.com/files2/Hojas%20de%20seguridad/116750-SDS-ES.pdf>).

Aspecto físico:	Sólido
Olor:	N/A
Punto de fusión:	275 °C
Punto de ebullición:	N/A
Densidad:	N/A
Descomposición:	No se descompone si se destina a los usos previstos.

Incompatibilidad:	Mantener alejado de agentes oxidantes y de materiales fuertemente alcalinos o ácidos, a fin de evitar reacciones exotérmicas.
Riesgos de acuerdo al reglamento de EU:	El producto no está clasificado como peligroso
Toxicidad:	El contacto repetido o prolongado con el producto, puede causar la eliminación de la grasa de la piel, dando lugar a una dermatitis de contacto no alérgica y a que se absorba el producto a través de la piel.
Reacción en los ojos en humanos:	Las salpicaduras en los ojos pueden causar irritación y daños reversibles.

II.2. Plasma

“En 1879, Crookes lo definió como el cuarto estado de la materia; y en 1929, Tonks y Langmuir utilizaron la palabra para describir el cuarto estado de la materia durante sus estudios de oscilaciones en descargas eléctricas” (Nasser, 1971).

“El plasma es un gas parcialmente ionizado compuesto de diversas partículas, tales como iones, electrones, especies neutras y excitadas, además de radiación ultravioleta (UV) y ultravioleta visible (UV Visible). Se caracteriza por presentar una carga eléctrica neta igual a cero. Es un estado adicional de la materia que surge de la ionización de átomos y moléculas de un gas, de ahí que sea denominado como el cuarto estado de la materia. La ionización de un gas puede ocurrir cuando sus moléculas son expuestas a campos eléctricos, energía calorífica alta o radiación de alta energía” (Manolache, 2004). Como resultado de esta exposición, se registra un incremento en los niveles de energía de las partículas, de tal manera que sus electrones pueden ser liberados generando así la formación de especies activas.

“Un elemento en estado gaseoso no es capaz de conducir electricidad, a menos que sea disociado, ionizado o excitado. Cuando el gas es alterado por cualquiera de estos procesos es cuando se genera el plasma, el cual regresará a su estado gaseoso original cuando se deja de aplicar esa excitación o ionización, produciendo una recombinación de los elementos que fueron separados durante el proceso” (Yasuda, 1985).

“Los átomos, que suelen agruparse en moléculas, son los bloques que constituyen las sustancias ordinarias. Están compuestos de un núcleo cargado con electricidad positiva y un número igual de electrones cargados con electricidad negativa. Así, los átomos en su forma completa son eléctricamente neutros. Cuando se extraen del átomo uno o más de sus electrones, lo que queda tiene un exceso de carga positiva y constituye lo que se conoce como un ion. En un caso extremo, un ion puede ser simplemente un puro núcleo atómico al que se le han desprendido todos sus electrones circundantes. Una sustancia que contiene iones, a la vez que conserva los electrones, aunque ya libres del amarre atómico, es un plasma. Así pues, el plasma no es un material particular; sino un cierto estado específico de la materia en el que, en conjunto, el material es eléctricamente neutro, pero que contiene iones y electrones libres capaces de moverse en forma independiente.

Si una sustancia se calienta más allá de límite superior, se produce un nuevo cambio, ahora ya en el interior de los átomos, los cuales empiezan a desprenderse de sus electrones, esto es, se *ionizan* y se forma un plasma. Conforme el material se calienta más, sus átomos se mueven con mayor rapidez y al chocar unos con otros en gran agitación puede originarse el desprendimiento de algunos de sus electrones orbitales, quedando así los átomos ionizados y algunos electrones libres. Por encima de los 10 000 grados Kelvin (K), cualquier sustancia ya es un plasma.

Sin embargo, es importante destacar que el estado de plasma no implica necesariamente altas temperaturas; la ionización de un material puede producirse por diversos medios. Se pueden producir plasmas por descargas eléctricas; si a un gas ordinario se le aplica un campo eléctrico muy fuerte pueden desprenderse algunos de los electrones orbitales, quedando estos átomos ionizados y algunos de sus electrones libres. Estos electrones libres

serán acelerados por el campo eléctrico y chocarán con otros átomos, desprendiendo algunos de sus electrones, y así el proceso continúa como una avalancha. Esto es lo que se llama una descarga eléctrica, y un gas ionizado por una descarga eléctrica es un típico caso de un plasma” (Bravo, 1997).

Generación del plasma.

“Para que el estado de plasma se alcance, se pueden usar diferentes métodos o diferentes fuentes de energía, las cuales utilizan diferentes procesos físicos. Es posible generar plasma, por ejemplo, estableciendo intensos campos eléctricos o por interacción con ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (RF), por absorción de microondas, por interacción con ondas de choque y láseres, por colisiones con haces de partículas de alta energía, con vapores a altas temperaturas, por arcos eléctricos, etcétera, y a su vez, cada técnica presenta diversas variantes. Los reactores de plasma pueden utilizar diferentes campos eléctricos, ya sea constantes o variables (este último con frecuencias desde los 100 kHz, en la zona de baja frecuencia, 13.56 MHz en el rango de radiofrecuencia, hasta 2.45 GHz en el de las microondas), los que primero ionizan el átomo y luego aceleran los electrones e iones positivos. Debido a la diferencia de masa entre electrones y partículas pesadas (iones, átomos o moléculas), la transferencia de energía por medio de colisiones viaja de manera lenta. Si se deja encerrado un gas en una cámara a baja presión, se tiene una menor frecuencia de colisión, lo que implica un mayor recorrido en promedio, de forma que los electrones pueden acumular suficiente energía para producir, por choques, la ionización y la excitación energética de las partículas más pesadas. De esta forma es posible generar un plasma con partículas ionizadas (las que pueden ser químicamente muy reactivas) que luego intervienen en procesos físicos y químicos al interactuar con el material que se desea procesar” (Saettone, 2010).

II.2.1. Propiedades electromagnéticas del plasma

“Un gas es normalmente un buen aislante eléctrico, la corriente no puede pasar fácilmente a través de él. Sin embargo, si el gas tiene suficientes cargas libres como para ser un plasma éste se vuelve un buen conductor eléctrico, pues en esta situación los electrones libres

transportan la corriente con facilidad. Así, el plasma responde fácilmente a la imposición de campos eléctricos externos y también a la de campos magnéticos.

Una partícula cargada en el interior de un campo eléctrico experimenta una fuerza que la acelera en la dirección del campo si la partícula tiene carga positiva, o en dirección contraria si la partícula tiene carga negativa. Cuando aparece un campo magnético, el movimiento de una partícula cargada es más complicado, pero si tiene poca energía describirá una hélice alrededor de las líneas de campo” (Bravo,1997).

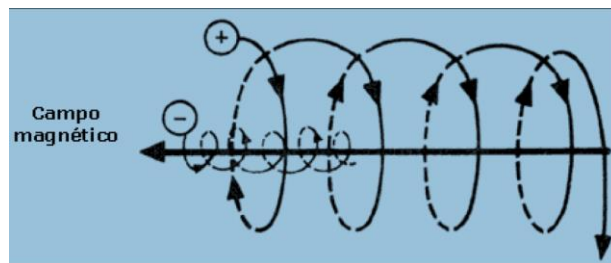


Figura 2.9. Comportamiento de las partículas cargadas en un campo magnético. Las partículas positivas giran en un sentido y las negativas en el sentido opuesto. Como los iones tienen mayor masa que los electrones, su radio de giro será mayor. (Bravo,1997).

- Campos congelados.

“Cuando un plasma se comporta como un fluido con gran conductividad eléctrica, es que no admiten cambios del flujo magnético en su interior. Esto trae como consecuencia que puedan ser confinados por campos magnéticos intensos; pero cuando la densidad y la velocidad del plasma son muy grandes, será el movimiento del plasma el que domine a la estructura del campo. En esta situación, si el plasma fluye muy rápidamente desde cierta región donde hay un campo magnético que es incapaz de contenerlo, entonces arrastrará consigo al plasma para impedir que cambie el flujo magnético en su interior. Entonces se dice que el plasma transporta al campo magnético *congelado* en su interior. Ésta es una situación que se da con bastante frecuencia en los plasmas espaciales” (Bravo,1997).

- Células y filamentos de plasma.

“Por la misma propiedad de que no aceptan cambios de flujo magnético en su interior; dos plasmas magnetizados pueden coexistir pacíficamente sin mezclarse, pues ninguno penetra al otro arrastrando su campo magnético. De esta manera se forman estructuras *celulares* (parceladas) en las que existirá un equilibrio de presiones en la frontera, pero cada una de las células puede contener plasma y campos magnéticos con características muy diferentes a las de las demás.

Pero además de la morfología celular; los plasmas frecuentemente muestran una estructura *filamentaria*. Esta estructura se deriva también del hecho de que los plasmas, debido a sus electrones libres, son muy buenos conductores de electricidad. Donde quiera que las partículas cargadas fluyan en un medio neutralizante, como electrones libres en un fondo de iones, el flujo de partículas cargadas (corriente) produce un anillo de campo magnético alrededor de la corriente. Este anillo presiona al plasma a formar hatos multifilamentarios”. (Bravo,1997).

II.2.2. Temperaturas de plasma: Plasmas térmicos y no térmicos

Como en cualquier gas, la temperatura en el plasma está determinada por las energías promedio de las partículas del plasma. Por lo tanto, los plasmas, como sistemas de múltiples componentes, son capaces de exhibir múltiples temperaturas. En las descargas eléctricas comunes para la generación de plasma en el laboratorio, la energía del campo eléctrico se acumula primero por los electrones. Entre colisiones y, posteriormente, se transfiere de los electrones a las partículas pesadas.

Los electrones reciben energía del campo eléctrico durante su trayectoria libre media, durante la siguiente colisión con una partícula pesada, pierden solo una pequeña porción de esa energía (porque los electrones son mucho más ligeros que las partículas pesadas). Es por eso que la temperatura de los electrones en el plasma es inicialmente más alta que la de las partículas pesadas. Posteriormente, las colisiones de electrones con partículas pesadas (calentamiento de Joule) pueden equilibrar sus temperaturas, a menos que el tiempo o la energía no sean suficientes para el equilibrio (como en las coronas y las

descargas pulsadas) o haya un mecanismo de enfriamiento intensivo que evita el calentamiento de todo el gas (como en las descargas de baja presión enfriadas en la pared).

Los plasmas térmicos son aquellos en los cuales los electrones y las demás partículas que se encuentran en él, están en equilibrio térmico, es decir tienen la misma temperatura.

Numerosos plasmas existen muy lejos del equilibrio termodinámico y se caracterizan por múltiples temperaturas diferentes relacionadas con diferentes partículas del plasma y diferentes grados de libertad. Es la temperatura del electrón que a menudo excede significativamente la de las partículas pesadas ($T_e \gg T_0$). La ionización y los procesos químicos en tales plasmas de no equilibrio están determinados directamente por la temperatura de los electrones y, por lo tanto, no son tan sensibles a los procesos térmicos y a la temperatura del gas. El plasma de no equilibrio de este tipo generalmente se llama plasma no térmico.

Los plasmas no térmicos se generan comúnmente a bajas presiones o a niveles de potencia más bajos, o en diferentes tipos de sistemas de descarga por pulsos. Los plasmas térmicos suelen ser más potentes, mientras que los no térmicos son más selectivos. Sin embargo, estos dos tipos muy diferentes de gases ionizados tienen muchas más características en común y ambos son plasmas.

II.2.3. Plasmas térmicos

“Éstos consisten en una mezcla de electrones, iones y especies neutras en un ambiente eléctricamente neutro y por trabajar a presiones reducidas, puede considerarse como un gas a muy alta temperatura parcial o totalmente ionizado. Los plasmas térmicos se caracterizan por su alta densidad de energía y su igualdad entre la temperatura de sus partículas pesadas y la temperatura de sus electrones”. (Martínez, 1995).

Así, los plasmas térmicos o calientes son aquellos en los que la temperatura de los electrones y especies pesadas (átomos, iones, moléculas) es la misma.

II.2.4. Plasmas no térmicos

Los plasmas no térmicos son creados por descargas eléctricas conocidas como descargas luminosas, las cuales son generadas por campos eléctricos impuestos al sistema donde está presente la ionización, relajación y excitación.

La generación de una descarga eléctrica puede llevarse a cabo mediante la aplicación de corriente directa (CD) o de diferentes oscilaciones al campo eléctrico. Las descargas luminosas por CD se producen por la aplicación de un potencial entre dos electrodos a bajas presiones. El potencial que se encuentra cerca del cátodo varía lentamente en el plasma, y ocurre lo mismo en el ánodo. Los electrones que se originan en el cátodo son acelerados mediante procesos de colisión, transferencia de energía, difusión o recombinación. La energía que se transfiere al ánodo es baja.

En el plasma no térmico o frío, los electrones tienen una temperatura mayor que el resto de las moléculas de su composición, en otras palabras, están en desequilibrio térmico. Además, la temperatura de las especies pesadas (átomos, iones y moléculas) es cercana a la del medio ambiente (25-100 °C). Por estas características, su fácil manejo y accesibilidad, pueden ser controlables en el laboratorio; razón por la que son utilizados en múltiples aplicaciones.

Existen varios tipos de plasmas fríos con diferentes propiedades y aplicaciones, entre éstos se encuentran los de descarga corona, barrera dieléctrica, de arco, etcétera. Los plasmas fríos pueden ser empleados en otras áreas tecnológicas; por ejemplo, iluminación, industrias de alimentos, esterilización, industria de materiales, etcétera.

La generación de un plasma frío es relativamente sencilla, pues se produce mediante descargas eléctricas, con voltaje e intensidad que dependen de la aplicación a la que se destine.

La distribución de la descarga eléctrica para generar el plasma en una muestra de agua se divide principalmente en tres tipos, descarga eléctrica sobre la superficie, directamente en el líquido y por medio de burbujas o vapor. En el caso de las descargas eléctricas sobre la

superficie, el líquido actúa como un electrodo, por lo cual la descarga tiene una deficiencia, pues ésta es transportada por los iones de su composición a través del agua, los cuales tienen menor movilidad en comparación de la movilidad de los electrones en un electrodo metálico.

En la figura 2.10 se aprecia un ejemplo de reactor usado para generar plasma, empleado en el tratamiento de aguas residuales.

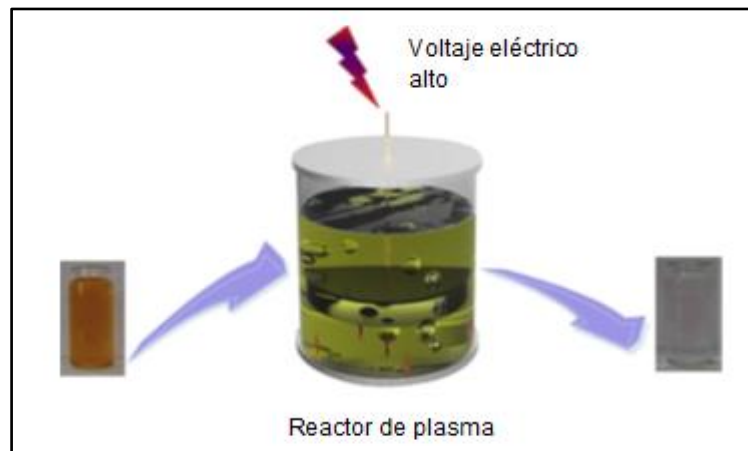


Figura 2.10. Reactor para tratamiento de agua residual con plasma frío. (Jiang *et al.*, 2014).

Procesos de oxidación avanzada.

Posiblemente, sean considerados como el futuro de los recursos tecnológicos más utilizados en el tratamiento de aguas contaminadas con productos orgánicos muy estables o de baja de biodegradabilidad.

Los procesos de oxidación avanzada fueron definidos por Glaze y Chapin en 1987 como procesos a temperatura y presión cercanas al ambiente que generan unos radicales altamente reactivos (especialmente radicales hidroxilo $\text{HO}\cdot$) en cantidad suficiente para producir la purificación de un agua.

Los POA presentan una serie de ventajas frente a los tratamientos convencionales.

1. Generalmente se consiga la mineralización completa (destrucción) del contaminante.
2. Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.

3. Consumen menos energía que otros métodos.
4. Eliminan efectos sobre la salud de desinfectante y oxidantes residuales como el cloro.

Hay desventajas frente a esos mismos sistemas convencionales de tratamiento; como su elevado coste de operación asociado a su alto consumo de energía eléctrica (más si se emplea radiación UV) y el empleo de reactivos caros como peróxido de hidrógeno u ozono.

Procesos fotoquímicos.

En esta clasificación se encuentra la Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV), UV/peróxido de hidrógeno, UV/O₃ y fotocatalisis heterogénea. Por mencionar algunos.

Procesos no fotoquímicos.

Procesos Fenton (Fe²⁺/H₂O₂) y relacionados: las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas son capaces de oxidar compuestos orgánicos debido a la previa formación de radicales HO·.

Ozono/H₂O₂: El proceso pretende cambiar la oxidación directa y selectiva del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales HO· con los compuestos orgánicos. Por lo tanto, se logra una mejoría de la ozonización agregando peróxido de hidrógeno ya que es un ácido débil, un poderoso oxidante.

Oxidación electroquímica: La aplicación de corriente eléctrica (2-20 A) entre dos electrodos adecuados en agua produce reacciones químicas primarias, con la generación de HO·, que oxida luego la materia orgánica. La eficiencia del sistema puede mejorarse agregando Fe (II), y el proceso se conoce como electro-Fenton.

El tratamiento de aguas residuales mediante plasmas se considera también como un proceso avanzado de oxidación y, es adecuado para degradar contaminantes emergentes debido a su rápida tasa de remoción y compatibilidad ambiental.

Los tres tipos de distribución del plasma, a pesar de tener diferentes características coinciden en los mecanismos de reacción química y fenómenos físicos que generan. Esto

es, la formación de especies moleculares, radicales libres y luz ultravioleta. Entre las especies y radicales generados por un tratamiento con plasma se encuentran:

- Radicales hidroxilo:

Cuando una descarga eléctrica es aplicada en un medio acuoso, las moléculas de agua generan radicales hidroxilo y radicales hidrógeno, por medio de fenómenos de disociación, ionización y excitación (por vibración o rotación) de las mismas. Al aplicar cierto voltaje en una muestra de agua, las partículas adquieren una carga eléctrica, capaz de generar los procesos o fenómenos mencionados anteriormente; cada uno con un umbral de energía diferente. Por ejemplo, para las reacciones de disociación (Ecuación 1), la energía promedio necesaria para que se lleve a cabo es de aproximadamente 7.0 eV. En las reacciones de ionización (Ecuación 2 y 3), la energía necesaria es de 13 eV; mientras que para las reacciones de excitación (Ecuación 4) la energía promedio necesaria es menor a 1 eV. En las ecuaciones 5-7 se muestran las reacciones químicas en un estado de relajación de las moléculas de agua, después de haber pasado por un estado de excitación (Jiang *et al.*, 2014).

Tabla 2.3. Reacciones químicas (Jiang *et al.*, 2014).

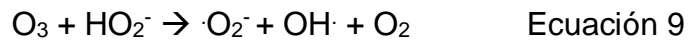
Disociación.	$\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{H}\cdot + \text{e}^-$	Ecuación 1.
Ionización.	$\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow 2\text{e}^- + \text{H}_2\text{O}^+$	Ecuación 2.
Ionización.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{H}_3\text{O}^+$	Ecuación 3.
Excitación.	$\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}^* + \text{e}^-$	Ecuación 4.
Excitación.	$\text{H}_2\text{O}^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}\cdot + \text{OH}\cdot$	Ecuación 5.
Excitación.	$\text{H}_2\text{O}^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}\cdot + \text{H}_2\text{O}$	Ecuación 6.
Excitación.	$\text{H}_2\text{O}^* + \text{H}_2\text{O}^* \rightarrow 2\text{H}\cdot + \text{O}\cdot + \text{H}_2\text{O}$	Ecuación 7.

Los radicales hidroxilos son los encargados de producir las reacciones de oxidación, en un tratamiento de plasma. Cuando los radicales hidroxilo están en contacto con la materia orgánica pueden presentar tres diferentes mecanismos de reacción, estos son: abstracción de un átomo de hidrógeno, adición electrofílica de enlaces no saturados y transferencia de electrones.

- Especies a base de oxígeno:

Cuando el oxígeno es expuesto a un tratamiento de plasma, es decir se le aplica una descarga eléctrica, sus átomos se pueden disociar (potencial estándar $E^\circ \text{O}/\text{H}_2\text{O}=2.42 \text{ V}$)

aumentar la velocidad de producción de radicales hidroxilos. O de otra manera, éstos pueden reaccionar directamente con los contaminantes presentes en el agua residual y transformarse en ozono (potencial estándar $E^\circ \text{O}_3/\text{O}_2=2.07 \text{ V}$), el cual es un agente oxidante muy fuerte. Cuando el ozono está en contacto con peróxido de hidrógeno y a su vez éstos se encuentran en presencia de plasma, el ozono reacciona con el ion hidroperóxido generando un ion superóxido, radical hidroxilo y oxígeno molecular, tal y como se muestra en las ecuaciones 8 y 9.h



- Peróxido de hidrógeno:

El peróxido de hidrógeno puede ser formado por recombinación de los radicales hidroxilos. El H_2O_2 incrementa la formación de radicales hidroxilos generando así una mayor reacción de oxidación.

- Reducción de especies:

Cuando el tratamiento de plasma se lleva a cabo en presencia de especies reductoras, es más posible la remoción de contaminantes del agua mediante degradación reductiva. Una de las especies reductoras son los electrones del agua formados por irradiación, los cuales pueden degradar componentes debido a su elevada afinidad electrónica. Mientras que el radical hidrógeno formado por la colisión de los electrones con las moléculas de agua, es otro agente reductor fuerte.

Los radicales H pueden reaccionar de dos formas al estar en contacto con compuestos orgánicos:

- 1.- Adicionando hidrógeno a enlaces insaturados y
- 2.- Extrayendo hidrógeno de componentes saturados.

- Luz ultravioleta:

El plasma al estar en contacto con el agua emite luz ultravioleta como resultado de la excitación y relajación de las especies presentes en ella; estos estados a su vez son producidos por la colisión entre electrones y moléculas.

- Onda de choque:

Cuando el plasma se expande y toca el agua se produce una onda de choque, la cual es generada por la descarga eléctrica aplicada. Esta onda de choque puede inducir a que sucedan reacciones químicas o pirolíticas.

- Pirólisis:

“La pirólisis es una reacción química que permite degradar moléculas orgánicas con calor en ausencia de oxígeno, es decir en condiciones anaerobias” (Jiang *et al.*, 2014).

II.2.5. Aplicaciones industriales del plasma

A pesar de que en el país es aún poco conocida, salvo para labores de corte y soldadura en la industria metalmecánica, la tecnología de plasma es un tema muy amplio, resultado de décadas de investigación en ciencia básica. El desarrollo de esta “nueva” tecnología ha permitido aplicaciones muy variadas para la industria, donde es usada en los países más industrializados desde la década de 1960. La tecnología de plasma también se usa en áreas muy variadas, por ejemplo, para la generación de energía en reactores de fusión nuclear, que se encuentra en investigación desde hace más de 50 años; en el desarrollo de materiales que tornan las fuentes de energías alternativas más eficientes, y para mejorar procesos para la obtención de combustibles en el caso de las fuentes de energía no renovables; también se utiliza como apoyo en la medicina para la esterilización de material quirúrgico en frío así como en el desarrollo de biomateriales para injertos y prótesis; auxilia en la restauración y conservación de piezas arqueológicas; permite producir materiales, equipos y hasta procesos que minimizan el daño al medio ambiente en minería, metalurgia y petróleo; se han desarrollado técnicas con plasma para procesamiento de basura y desechos peligrosos, sean sólidos, líquidos o gaseosos; posibilita la separación de materiales, principalmente metales, para su posterior reciclaje; en el campo de la electrónica

es actualmente indispensable para la fabricación de microchips y baterías recargables; con esta tecnología es posible el crecimiento de estructuras moleculares utilizadas en nanotecnología, cuyas aplicaciones, se estima, revolucionarán la industria dentro de algunas décadas; inclusive la óptica e iluminación han sido beneficiados con procesos más eficientes para el mejoramiento de lentes, leds, etcétera (Erich S., 2010).

II.2.5.1. Industria aeroespacial

“En la industria aeroespacial las aplicaciones son variadas. Actualmente se investigan los sistemas de propulsión a plasma, basados en la conversión de energía eléctrica en energía cinética. Fueron utilizados por primera vez por los soviéticos para la orientación y corrección de órbitas de sus naves y satélites, que, a pesar de desarrollar menos empuje, se pueden aplicar durante largos periodos de tiempo. También, por medio de grandes fuentes de plasma es posible la construcción de cámaras simuladoras de reentrada atmosférica, que permiten obtener las condiciones críticas a las que están sometidos los sistemas de protección térmica de los vehículos espaciales al retornar al planeta. Inclusive, los propios materiales de protección, como el N_2-O_2 , también son fabricados utilizando tecnología de plasma” (Erich S., 2010).

II.2.5.2. Aplicaciones en materiales y biomateriales

El campo de aplicación de plasmas fríos en procesos industriales es muy diverso. Algunas de estas aplicaciones son: síntesis de nano partículas, modificación de superficies, limpieza, esterilización, erosión, producción de injertos y polimerización.

“En la medicina, el plasma en frío es ampliamente utilizado para el desarrollo de biomateriales con la finalidad de modificar superficialmente materiales metálicos y poliméricos, con el único propósito de hacerlos compatibles con el organismo del ser humano; por ejemplo, las prótesis de rodilla, cadera y arteriales” (Chevallier *et al.*, 1999). También se emplean en el desarrollo de implantes oculares (figura 2.11).

“La respuesta celular a los biomateriales poliméricos es de suma importancia en la aplicación de este tipo de implantes. En una persona con visión normal, la luz pasa a través de la córnea y el cristalino transparente antes de llegar a la retina. La opacidad de la córnea

o el cristalino puede dar lugar a ceguera monocular, lo cual causa que las córneas o lentes de origen natural necesiten ser reemplazados quirúrgicamente por una prótesis o lente intraocular, respectivamente” (Lloyd *et al.*, 2001).

“El fracaso de un implante puede ocurrir debido a un debilitamiento en la interfaz del receptor-implante, a menudo causado por la pobre adhesión celular” (Ilhan-Sarac y Akpek, 2005). Por ello existe una gran necesidad de disponer de un implante con una superficie que sea capaz de promover la unión de las células, logrando así la aceptación del organismo hacia este “cuerpo extraño”. Los lentes de contacto de uso común generalmente están modificados por plasma, mediante el cual se aplica una película transparente, ultra delgada y biocompatible en su superficie, lo que brinda un mayor confort al usuario.

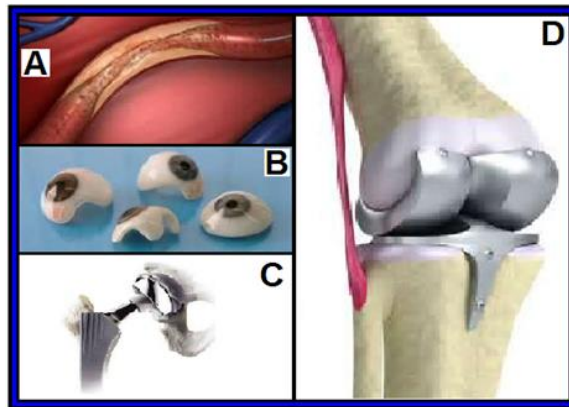


Figura 2.11. A. Prótesis arterial. B. Prótesis ocular. C. Prótesis de cadera. D. Prótesis de rodilla (Fuente: <http://mx.images.search.yahoo.com/search/images>).

En la industria textil es de gran provecho el uso de la tecnología de plasma. “Las telas y tejidos pueden ser tratados superficialmente injertando grupos químicos de tipo polar, lo que permite obtener productos que pueden ser teñidos más fácilmente; además, también se pueden injertar grupos de tipo no polar, dando como resultado productos impermeables, debido a que, después del tratamiento, estos adquieren un carácter más hidrófobo, tal como lo muestra la figura 2.12. Éste frecuentemente es medido por ángulo de contacto con agua: entre mayor sea éste, la superficie es más hidrófoba” (Hung *et al.*, 2009).

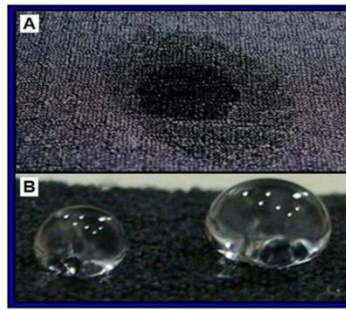


Figura 2.12. Tela antes (A) y después (B) del tratamiento por plasma (Hung *et al.*, 2009).

“En el desarrollo de materiales nano compuestos, el plasma frío se ha empleado para modificar superficialmente nano partículas que se usan como refuerzo. El objetivo principal es mejorar la dispersión de éstas y lograr una mayor interacción nano partícula-matriz polimérica. Como resultado de esta interacción se obtiene una mayor transferencia de carga de la matriz polimérica (que es la parte menos fuerte del nano compuesto) hacia las nano partículas de refuerzo (que es la parte realmente fuerte del nano compuesto). La figura 2.13 muestra los resultados del módulo elástico –o de Young– de un nanocompuesto de polietileno de alta densidad (PEAD) y nanofibras de carbón (NFC) al 3% en peso. El PEAD puro presenta un módulo elástico de 1.38 GPa; el nanocompuesto PEAD/NFC-nt (no tratado por plasma) muestra un módulo de 1.61 GPa; mientras que el PEAD/NFC-t (tratado con plasma de etileno) presenta un módulo de 1.83 GPa, lo cual representa 33.3% de mejora respecto al PEAD puro” (Borjas, 2012).

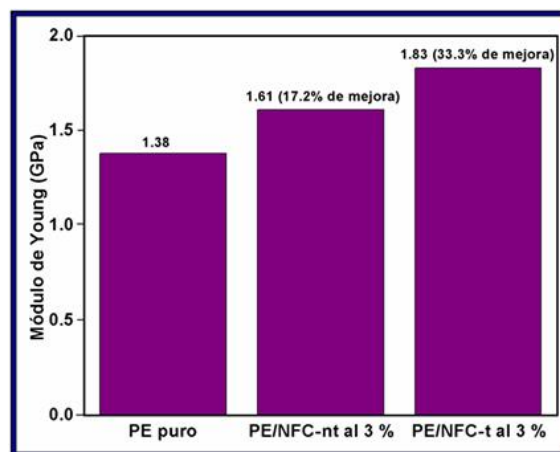


Figura 2.13. Módulo elástico del PEAD puro y de los nano compuestos PEAD/NFC-nt y PEAD/NFC-t. (Borjas, 2012).

II.3. Parámetros que indican la calidad del agua

La calidad del agua se mide en base a un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos. Esto es evaluado con el fin de observar si la muestra de agua cumple con las medidas adecuadas para su posterior uso o propósito.

II.3.1. Parámetros físicos

- Características organolépticas (Color, olor y sabor): Son un claro indicador de contaminación del agua, la cual en estado puro es incolora, inodora e insípida. La presencia de color en una muestra de agua natural puede deberse principalmente a la presencia de algas, microorganismos u óxidos metálicos.
- Temperatura: Es un parámetro físico que está relacionado con la concentración de oxígeno disuelto en el agua, pues a medida que la temperatura aumenta, la concentración de O₂ disminuye, provocando así la muerte de especies acuáticas aerobias.
- Conductividad: Es una medida evasiva de la acumulación de sales o sólidos disueltos en una muestra de agua. Los sólidos disueltos están presentes en forma de cationes y aniones, es decir tienen una carga eléctrica, por lo cual le proporcionan conductividad al medio acuoso. Por lo tanto, un elevado nivel de conductividad, es un claro indicativo de una gran cantidad de sólidos o sales disueltas en el agua. La unidad de medición de la conductividad en aguas naturales generalmente se da en ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Turbidez: Es una característica física relacionada con la presencia de sólidos en suspensión en el agua. A mayor acumulación de sólidos suspendidos mayor grado de turbidez del agua. Sus unidades de medición son UNT o NTU's por sus siglas en inglés (Nephelometric Turbidity Units). La presencia de turbidez en el agua

contribuye a un tratamiento de desinfección deficiente, pues es un parámetro que causa interferencia en ello.

II.3.2. Parámetros químicos

Se utilizan para evaluar la presencia de materia orgánica, inorgánica y gases en una muestra de agua. A continuación, se describen algunos de ellos.

II.3.2.1. Carbono orgánico total (COT)

El Carbono Orgánico Total es un parámetro que se utiliza para valorar la calidad de las aguas de un determinado lugar.

El carbono orgánico total mide la cantidad de dióxido de carbono producida en la mineralización de una muestra. El COT se determina inyectando una porción de la muestra en una cámara de reacción a alta temperatura, que contiene un catalizador oxidante. El agua es vaporizada y el carbono orgánico oxidado a CO_2 y agua. El dióxido de carbono generado es transportado por el gas portador y medido en un analizador infrarrojo no dispersivo. Esta medición proporciona la cantidad de carbono total por lo que el carbono inorgánico debe ser determinado de manera separada y el COT obtenido por diferencia. El seguimiento del proceso mediante esta herramienta es importante porque valores de COT cercanos a cero son los únicos que garantizan que no se acumulen contaminantes recalcitrantes, intermediarios de mayor persistencia, capacidad de acumulación o toxicidad que los iniciales. La determinación del COT es un índice del grado de avance de la oxidación y una herramienta indispensable para el seguimiento del proceso de degradación. El COT provee información sobre la disminución en concentración de la materia orgánica y por tanto del grado de mineralización debido al tratamiento.

II.3.2.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno disuelto necesario para oxidar la materia orgánica, e inorgánica, contenida en una muestra de agua natural o residual la cual es susceptible de oxidación mediante un agente químico fuerte. La DQO es un parámetro que está directamente relacionado con el grado de contaminación del agua analizada.

Existen diferentes métodos para determinar la DQO: método de reflujo abierto, titulométrico (reflujo cerrado) y colorimétrico (reflujo cerrado). En el método titulométrico, se toma una alícuota de la muestra a analizar a la cual se agrega cierta cantidad de una solución de digestión, la cual contiene el agente oxidante fuerte (dicromato de potasio, $K_2Cr_2O_7$) y se adiciona el reactivo de ácido sulfúrico. Los tubos con las muestras se invierten varias veces para mezclar completamente. Se colocan los tubos en un digestor de bloque precalentado a $150\text{ }^\circ\text{C}$ y se somete a reflujo durante 2 horas. Después de este tiempo, la materia orgánica presente en la muestra será oxidada a dióxido de carbono y agua. Los tubos se enfrían a temperatura ambiente, se coloca dentro de ellos una varilla de agitación magnética, se les adiciona 1 o 2 gotas de indicador de ferroína y se titula con una solución 0.10 M de sulfato de amonio ferroso. Se efectúa el mismo procedimiento para el blanco (agua destilada). La diferencia entre la cantidad de sulfato de amonio ferroso utilizada por el blanco y la muestra se multiplica por la concentración molar del sulfato de amonio ferroso y por un factor de 8 000. El producto resultante se divide entre los mililitros de la muestra. El resultado obtenido es la DQO y sus unidades de medición son $\text{mg O}_2/\text{L}$.

Debido a que casi toda la materia orgánica presente en una muestra de agua es oxidada a CO_2 y H_2O por el empleo de agentes oxidantes fuertes, los valores de DQO siempre serán mayores a los de DBO.

II.3.2.3. pH (Potencial de Hidrógeno)

Por definición, el pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución. Este parámetro indica el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia; el cual es medido generalmente con un potenciómetro, o de otra manera usando tiras indicadoras de pH, las cuales se comparan con una escala según su vire o cambio de color. El rango de medición de pH va de 0-14, siendo 7 el valor que indica neutralidad. Valores inferiores a 7 indican el grado de acidez de una muestra y, cabe mencionar que entre más ácida sea una muestra, mayor es su concentración de iones de hidrógeno; por lo tanto, a medida que el valor de pH aumenta, la concentración de iones de hidrógeno disminuye, siendo así un valor superior a 7 indicativo de alcalinidad.

El pH es un parámetro muy importante en términos de calidad de agua, tanto para aguas naturales como para aguas residuales. Los valores de pH de las aguas residuales deben estar en un rango de 6-9 establecido por la NOM-CCA-031-ECOL/1993, valor de pH al cual se pueden llevar a cabo la mayoría de los procesos biológicos de los ecosistemas. Así que, si el valor de pH es alterado, se pueden alterar o inhibir los procesos biológicos posteriores, además de afectar la vida acuática del medio en el que será descargada el agua residual.

II.3.2.4. Absorbancia

La espectrofotometría es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto presente en una solución, mediante la medición de su absorbancia.

Esta técnica se basa en la Ley de Lambert-Beer, la cual establece que la absorbancia está directamente relacionada con las propiedades intrínsecas del analito, su concentración y la longitud de la trayectoria del haz de radiación que atraviesa la muestra. La Ley de Lambert-Beer está descrita con la ecuación 10 mostrada a continuación

$$A = C \cdot \varepsilon \cdot L \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

A= Absorbancia de la muestra

C= Concentración de la especie absorbente (mol/L)

ε = Absortividad molar expresada en $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$

L= Longitud del paso óptico de la muestra (cm)

En otras palabras, la medición de la absorbancia indica la cantidad de luz absorbida por una muestra. Para realizar la medición de este parámetro se utiliza un equipo llamado espectrofotómetro en el cual es introducida una celda que contiene una muestra del analito; en esta muestra se hace pasar un haz de luz o radiación monocromática, la cual atraviesa la superficie de la celda y es absorbida (en cierta cantidad) por las partículas del compuesto en solución. Al evaluar la medición de la absorbancia de alguna muestra es común que la gráfica o espectro de absorbancia indique más de 2 picos a una longitud de onda diferente,

tal y como se muestra en la figura 2.14; siendo considerado el pico máximo como la longitud de onda de trabajo en la que se basarán los resultados.

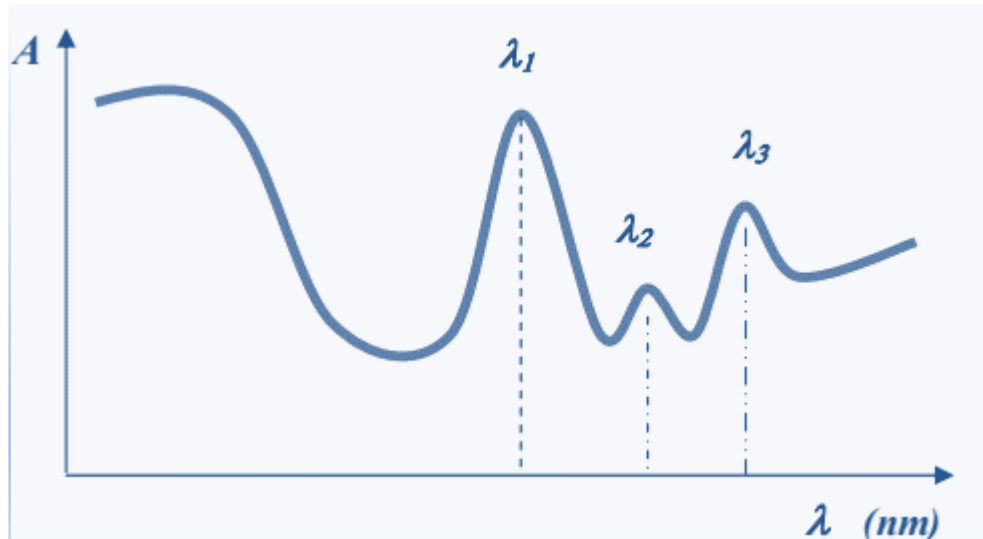


Figura 2.14. Espectro de absorción.

La luz restante que no es absorbida por la muestra, es conocida como transmitancia.

- ❖ **Curva de calibración:** Es un método utilizado para evaluar de manera indirecta la concentración de un compuesto presente en una muestra. Para obtener la curva de calibración se necesita evaluar la absorbancia de al menos 10 muestras con concentración conocida (diferente una de la otra), a una misma longitud de onda. Con la gráfica obtenida se puede establecer una función matemática que represente el comportamiento de la curva, la cual es determinada por el método de mínimos cuadrados. Esta ecuación se describe a continuación (ecuación 11) y, está relacionada con la concentración y absorbancia del analito.

$$A = m c + n$$

Ecuación 11

Dónde:

A: Absorbancia.

n: Intercepto de la recta

m: Pendiente de la recta y que corresponde al producto entre absortividad de la muestra y el espesor de la cubeta.

De esta manera cuando se analice una muestra y se desee saber su concentración, sólo se sustituyen los valores en la ecuación anterior.

II.4.3. Parámetros biológicos

El objetivo y análisis aplicado para determinar la calidad de una muestra de agua mediante estos parámetros, depende del tipo de agua a evaluar. Si se trata de agua destinada para su uso y consumo humano, los estudios que se le realizan son de tipo microbiológico; que se enfocan en determinar la presencia de coliformes o microorganismos patógenos en ella, capaces de producir enfermedades intestinales, tales como el cólera.

En cambio, si se trata de una muestra de agua residual tratada, los estudios aplicados tienen como fin evaluar el efecto de algún contaminante (presente en el agua) sobre organismos de prueba. Y por lo tanto permiten analizar el impacto ambiental que pudiera tener en caso de ser desechada o reutilizada en otras áreas, por ejemplo, como agua de riego.

Estos estudios se conocen con el nombre de bioensayos o ensayos toxicológicos; son realizados bajo condiciones ambientales controladas y evalúan efectos como inhibición, muerte, crecimiento, proliferación, cambios morfológicos, fisiológicos, etcétera; con los cuales se permite conocer si el agua es adecuada para el buen desarrollo y crecimiento de microorganismos (Castillo G., 2004).

Los organismos de prueba empleados en los bioensayos son conocidos como bioindicadores, y pueden ser de tipo animal (larvas o insectos) o vegetal (germinación de semillas).

Los ensayos toxicológicos pueden ser clasificados de acuerdo a su duración, sistema de ensayo o propósito, de la siguiente manera:

- ❖ Duración:
Corto, mediano y largo plazo.

- ❖ Método o sistema de ensayo:
Estático, con renovación, o de flujo continuo.

❖ Propósito para el cual serán utilizados:

Control de calidad de vertidos, evaluación de compuestos específicos, toxicidad relativa, entre otros.

II.4.3.1. Ensayos toxicológicos con semillas de lechuga *Lactuca sativa*

Uno de los bioindicadores empleados para realizar un ensayo toxicológico son las semillas de lechuga *Lactuca sativa*, las cuales son de fácil y rápida germinación, además de ser muy sensibles a la exposición de algún contaminante. Por lo cual cualquier interferencia o alteración en su medio de desarrollo, desencadenará algún efecto negativo presentado, ya sea por una disminución en su porcentaje de germinación, inhibición de crecimiento, muerte, entre otros.

La morfología de la semilla y estadios por los que atraviesa la semilla *Lactuca sativa* durante el ensayo de germinación y elongación se muestra en la figura 2.15.

El sistema en el que se lleva a cabo este análisis es de tipo estático y, es utilizado para determinar la toxicidad aguda de una muestra de agua. El tiempo de exposición al agua de ensayo es en promedio 120 horas (5 días), pero esto depende de los días necesarios para lograr la germinación de la semilla a utilizar, descritos en el envase.

Cabe destacar que varias reacciones y procesos involucrados en los bioensayos suelen presentarse en la mayoría de las semillas, por lo que el efecto de un contaminante sobre esta especie de semilla puede considerarse representativo para todas las demás semillas o plántulas en general.

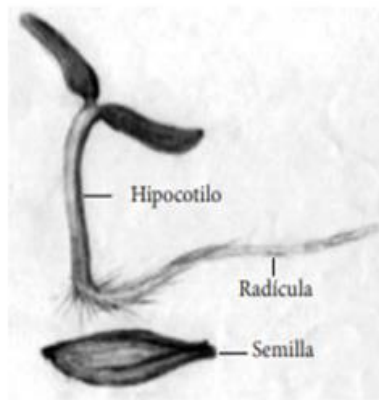


Figura 2.15. Morfología de la semilla y la plántula de lechuga *Lactuca sativa* (Castillo G., 2004).

Para evaluar el efecto de un contaminante sobre el bioindicador, no es necesario que se presente la completa inhibición de la semilla, puesto que existen contaminantes cuya concentración es tan pequeña que no afecta en la germinación de la semilla, pero si en la rapidez de crecimiento y tamaño de la radícula y el hipocotilo de las plántulas.

Los bioensayos pueden ser aplicados a cualquier tipo de agua residual, ya sea agua contaminada con colorantes, pesticidas, elevada turbiedad, o cualquier tipo de contaminante; no es necesario llevar a cabo un tratamiento previo de filtración, por lo cual es un análisis muy sencillo.

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

III.1. Dispositivo experimental

Para llevar a cabo la exposición de la solución al plasma, primero se elaboró el dispositivo correspondiente. Se muestra un esquema del dispositivo en la figura 3.1. Consiste de una cámara de reacción de vidrio de 1.0 litro de volumen y dos electrodos de tungsteno. 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 (marca LABCONCO, modelo 117) y un sensor de vacío (Marca CPS, modelo VG 200).

Para llevar a cabo la exposición ante el plasma no térmico de la solución en estudio, a presión atmosférica y baja presión se usó el mismo dispositivo, activando el sistema de vacío para baja presión y desactivándolo para presión atmosférica. El sistema de exposición a baja presión, es de cerrado hermético.

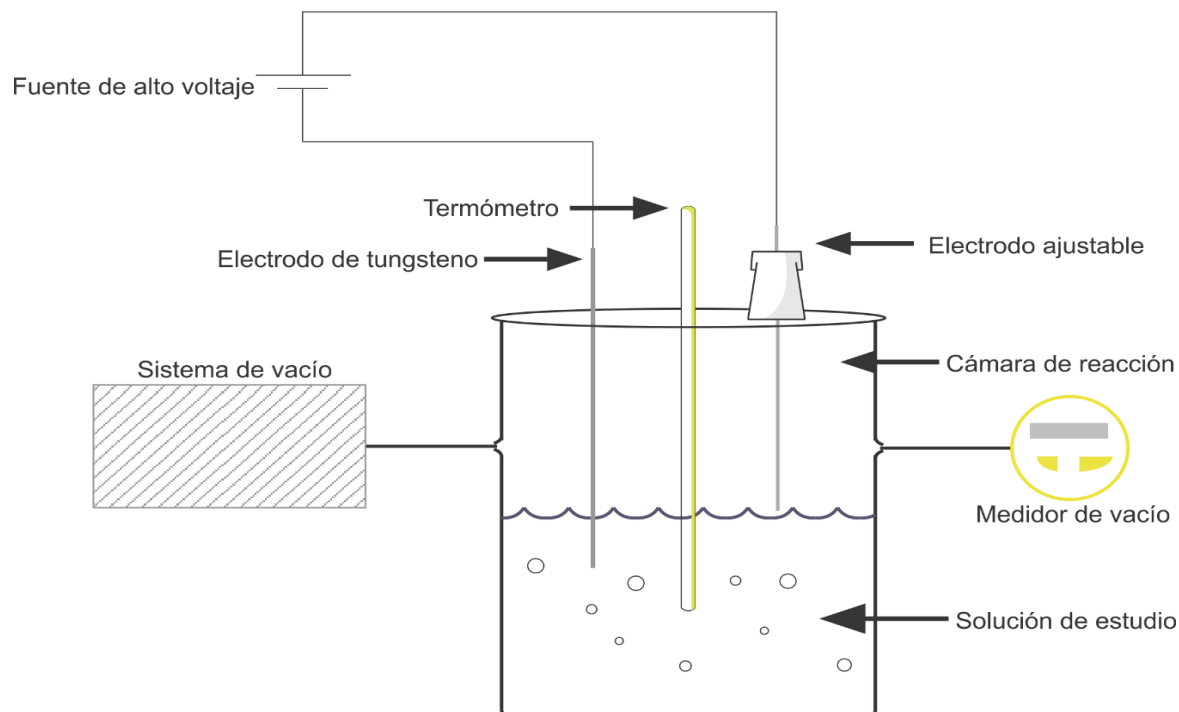


Figura 3.1. Esquema del dispositivo experimental.

III.2. Preparación de la solución Negro Ácido (NA52)

La concentración a la cual se llevó a cabo la experimentación fue de 46.2 mg/L. Para obtener este valor se pesó 0.0231 g del colorante NA52 en polvo con una balanza analítica (marca ADAM, modelo PW 254), el cual se agregó a 500 mL de agua destilada.

Esta concentración fue elegida para los 4 experimentos y fue utilizada para las pruebas a baja presión y presión atmosférica.

III.3. Exposición de la solución de NA52 al plasma (a baja presión y a presión atmosférica)

Una vez elaborada la solución de Negro Ácido 52 se procedió a vaciar la solución al dispositivo experimental, el cual estaba previamente instalado y conectado. La intensidad de corriente y voltaje utilizados para generar el plasma pueden modificarse, dependiendo del experimento deseado, con la fuente empleada (SPELLMAN SL600). Se llevaron a cabo

4 diferentes experimentos con plasma a presión atmosférica, cada uno con una duración de 200 minutos, en los que sólo se varió la corriente eléctrica.

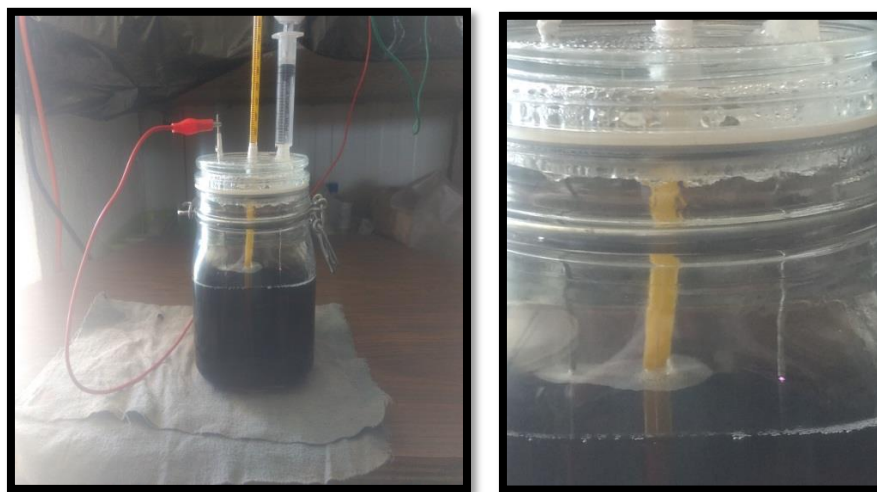
Los parámetros utilizados en los experimentos para ambas pruebas (baja presión y presión atmosférica) son mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros utilizados en cada experimento con plasma (baja presión y presión atmosférica).

Tratamiento	Tiempo (minutos)	Concentración $\frac{mg}{L}$	Voltaje (Volts)	Amperaje (mA)
1	200	46.2	1,500	10
2	200	46.2	1,500	15
3	200	46.2	1,500	20
4	200	46.2	1,500	30

A continuación, se describen los pasos para realizar la exposición al plasma a presión atmosférica.

- ❖ Una vez armado el dispositivo y conectado a la fuente de voltaje, se seleccionaron los parámetros a utilizar (amperaje y voltaje). Se acercó poco a poco el electrodo (cátodo) a la solución hasta que hubiera una distancia de 1 mm (aproximadamente) entre ellos y fuera posible generar el plasma. Una vez obtenido el plasma, se verificó que su generación fuera constante durante todo el experimento. La exposición de la solución acuosa del NA52 al plasma a presión atmosférica se muestra en la figura 3.2.
- ❖ Cada tratamiento tiene una duración de 200 minutos, pero la medición de los parámetros de calidad y toma de muestras se realizó cada 20 minutos, efectuando así 10 intervalos de tiempo hasta completar el tiempo final.



a)

b)

Figura 3.2. Exposición al plasma.

a) Dispositivo con solución acuosa de NA52; b) Exposición al plasma.

III.4. Muestreo

La toma de muestras entre cada intervalo de tiempo se realizó de la siguiente manera:

- 1) La persona encargada de realizar el procedimiento se colocó el equipo de seguridad necesario, que en este caso consistió de guantes de látex. A pesar de que el contaminante con el que se trabajó no es tóxico, se deben seguir las medidas de seguridad e higiene para evitar la contaminación de muestras y los resultados no se vean afectados.
- 2) Una vez transcurridos los primeros 20 min de exposición, se extrajeron 30 mL de la solución acuosa de NA52 con una pipeta. Después de realizar la medición de los parámetros, la cantidad sobrante de la solución se regresó al dispositivo para continuar con el siguiente intervalo de tiempo. Cabe mencionar que después de cada toma de muestras, la pipeta y todo el instrumental utilizado se enjuagó con agua destilada, para evitar la contaminación de las muestras siguientes.
- 3) Después de haber terminado la toma de muestras del primer intervalo de tiempo, se realizó el mismo procedimiento para los períodos restantes.

III.5. Indicadores de modificación del colorante Negro Acido 52 en solución acuosa

Los parámetros para medir los cambios del colorante Negro Acido 52 en solución acuosa después de ser sometido al plasma, así como su utilidad se describen a continuación:

- ❖ Potencial de hidrógeno (pH): La medición se realizó para evaluar la acidez o alcalinidad del colorante en solución acuosa antes y después de la exposición.
- ❖ Absorbancia: Se midió para verificar si existía un aumento o disminución de ella en las muestras del colorante en solución acuosa sometida al plasma.
- ❖ Temperatura: La medición se realizó para evaluar como el colorante en solución se calentaba o enfriaba en función del experimento.
- ❖ Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico.
- ❖ Carbono orgánico total (COT): El Carbono Orgánico Total (COT) engloba la suma de todos los compuestos orgánicos presentes en la muestra del colorante NA52 en solución acuosa, y como parámetro sumatorio aporta una medida fácil, rápida y precisa, de su nivel.
- ❖ Bioensayo: Los ensayos toxicológicos con semillas de lechuga *Lactuca sativa* permitieron evaluar la toxicidad del colorante en solución acuosa antes y después de cada exposición al plasma.

El procedimiento con el que se llevó a cabo la medición de los parámetros, se describe a continuación.

III.5.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)

La medición de pH se realizó usando el potenciómetro digital HM-200. Antes de evaluar el pH de cualquier muestra es necesario calibrar el instrumento con el que se realiza la medición, en este caso se utilizó una solución buffer con pH = 4. Para llevar a cabo la calibración solo se necesita encender el potenciómetro e introducirlo en un volumen suficiente del buffer, para verificar que no exista algún error en la medición.

Una vez calibrado el instrumento, se procedió a evaluar el pH del colorante NA52 en solución acuosa después de cada 20 minutos de exposición de la siguiente manera:

- 1) Se extrajeron 30 mL de solución acuosa del colorante NA52 con una pipeta de 10 mL y se colocaron en un vaso de precipitado de 50 mL.
- 2) Se introdujo el potenciómetro digital y se esperó a que la lectura se estabilizara.
- 3) Después de realizar cada medición el electrodo se enjuagó con agua destilada para evitar la contaminación de las muestras restantes.

III.5.2. Determinación de absorbancia

La absorbancia se midió con un espectrofotómetro (marca HACH y modelo DR 3900). La absorbancia es un parámetro que permite evaluar la cantidad de luz absorbida por un compuesto presente en una solución; la absorbancia siempre dependerá de la concentración del compuesto a analizar.

Antes de realizar la medición de las muestras de colorante NA52 en solución acuosa, se eligió el programa adecuado y se estableció como referencia un blanco, la cual consiste de 10 mL de agua destilada colocados en una celda o cubeta.

Una vez establecido el blanco, se prosiguió a medir la absorbancia de las muestras de colorante en solución acuosa de la siguiente manera:

- 1) Cada 20 minutos de exposición, se tomaron 10 mL de solución de colorante con una pipeta graduada y se colocaron dentro de una cubeta.
- 2) Antes de ingresar la cubeta al espectrofotómetro, se limpiaron sus paredes exteriores con papel absorbente, para evitar interferencias en la medición.
- 3) Posteriormente, la cubeta se introdujo al equipo y se seleccionó la opción "medición".
- 4) Después de realizar la lectura de absorbancia, el colorante NA52 en solución acuosa fue regresada al dispositivo para continuar con la exposición. El interior de la celda

se enjuagó perfectamente con agua destilada, para evitar contaminación de las muestras posteriores.

III.5.3. Temperatura

La temperatura fue un parámetro que se midió para comprobar su variación debido a la exposición al plasma en los diferentes intervalos de tiempo. Esta medición se realizó con un termómetro (marca DUVE) en grados Celsius.

- 1) Primeramente, se midió la temperatura inicial de la solución del colorante sin haberla sometida a un tratamiento, esto para comprobar si el reactivo o el colorante provocaba una alteración y/o reacción térmica en la solución.
- 2) Cada 20 minutos se procedió a medir la temperatura de la solución del colorante NA52 para comprobar si había un aumento o disminución en la misma.
- 3) Después de realizar la lectura de la temperatura, el termómetro se enjuagó con agua destilada, para evitar la contaminación de las muestras posteriores.

III.5.4. Evaluación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico. En la determinación de DQO todo el material orgánico biodegradable y no biodegradable es químicamente oxidado por el dicromato de potasio en medio ácido en la presencia de un catalizador. En la determinación de la Demanda Química de Oxígeno se utilizaron un digestor DRB 200 y un espectrofotómetro DR3900, ambos de la marca HACH.

El procedimiento para evaluar la DQO es el siguiente:

- 1) Antes de manipular los viales en los que se depositan las muestras, la persona encargada se colocó el equipo de seguridad que consiste en: guantes, cubre bocas y lentes de seguridad. Esto para evitar el contacto con la sustancia contenida en ellos, o los vapores que pudieran desprenderse.
- 2) De cada muestra, se extrajo con una pipeta 2 mL de la solución acuosa de colorante y se depositaron dentro de un vial (adecuado para medir DQO con valores entre 3 y

150 mg O₂/L) mismos que fueron etiquetados con fecha, número de tratamiento, número de tiempo (intervalo) y repetición realizados. El blanco, preparado con 2 mL de agua destilada, fue tratado de igual manera.

- 3) Cada vial fue tapado inmediatamente y se agitó suavemente para homogenizar la muestra.
- 4) Posteriormente los viales fueron colocados en el digestor, el cual debe ser previamente calentado hasta que alcance una temperatura de 150 °C. A esta temperatura, los viales permanecieron dentro del equipo por un tiempo de 120 minutos.
- 5) Después del tiempo señalado, los viales fueron retirados del digestor y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para evitar errores en la medición.
- 6) Antes de llevar a cabo la medición de la DQO de las muestras, se estableció como referencia el blanco, cuyo valor de DQO es cero.
- 7) Posterior a ello, se inició la medición de las muestras del colorante en solución acuosa.

III.5.5. Evaluación de carbono orgánico total (COT)

El Carbono Orgánico Total es una forma de conocer el contenido de material orgánico en una muestra de agua, en este caso, se realizó para conocer el contenido de material orgánico presente durante la degradación del colorante NA52 en solución acuosa. El COT provee información sobre la disminución en concentración de la materia orgánica y por tanto del grado de mineralización debido al tratamiento. En la determinación del COT se utilizaron un digestor DRB 200 y un espectrofotómetro DR3900, ambos de la marca HACH.

El procedimiento para evaluar la COT fue el siguiente:

- 1) Antes de manipular los viales en los que se depositan las muestras a las que se les quiere determinar el Carbono Orgánico Total, la persona encargada se colocó el equipo de seguridad que consiste en: guantes y cubre bocas. Esto para evitar el contacto con la sustancia contenida en ellos, o los vapores que pudieran desprenderse.

- 2) Posteriormente se colocó en un matraz Erlenmeyer 1 mL de muestra del colorante en solución acuosa y 9 mL de agua destilada con la finalidad de diluir su contenido orgánico.
- 3) Después esta mezcla se puso sobre una parrilla (marca Hotplate Stirrer y modelo LMS-1003) para mezclarse por 10 minutos a agitación moderada.
- 4) A la mezcla anterior, se le agregaron 0.4 mL de solución buffer para asegurar un pH de 2.
- 5) Mientras pasaban los 10 minutos de mezcla, la persona encargada dedicó ese tiempo para agregar un sobre de persulfato a cada uno de los viales que serían utilizados. Estos viales fueron identificados con fecha, número de tratamiento, número de tiempo (intervalo) y repetición realizados.
- 6) Después de haber pasado los 10 minutos de la mezcla, se tomaron, con una pipeta, 3 mL de la mezcla contenida en el matraz Erlenmeyer y se agregaron al vial correspondiente, preparado en el inciso previo. El blanco fue preparado agregando en un vial 3 mL de agua destilada.
- 7) Se enjuagó, con agua destilada, una ampolla indicadora, se secó con un paño que no suelte pelusa y se colocó, suavemente, dentro del vial. Esto se efectuó tanto para el blanco como para cada una de las muestras que fueron analizadas.
- 8) Esta ampolla estaba cerrada, cuando se colocó dentro del vial, fue necesario alinear el nivel de ruptura de la ampolla con la boquilla del vial para así tener un perfecto desprendimiento del cuello de la ampolla.
- 9) Tapar los viales herméticamente y colocarlos en el reactor durante 2 horas a 103-105 °C (el digestor debe ser calentado previamente a esa temperatura).
- 10) Después de haber transcurrido el tiempo señalado, los viales fueron retirados del digestor y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para evitar errores en la medición.
- 11) Antes de llevar a cabo la medición del COT de las muestras, el blanco se utilizó como referencia, su valor de COT se fijó como cero.
- 12) Posterior a ello, se inició la medición del COT de las muestras obtenidas durante la degradación del colorante NA52 en solución acuosa.

- Realización de bioensayo.

El bioindicador utilizado para evaluar la toxicidad del colorante en solución acuosa, antes y después de ser sometida a un plasma, fue el porcentaje de germinación de la semilla de la especie *Lactuca sativa*. Dichas semillas deben estar libres de plaguicidas o algún otro químico que interfiera en su porcentaje de germinación. Además, se debe tomar en cuenta el número de días promedio en los que se logrará la germinación; la cantidad de días depende de la marca y especie de lechuga utilizada. En este caso el promedio era de 5 días.

El procedimiento para realizar el bioensayo fue el siguiente:

- 1) Previo a realizar los bioensayos con el colorante en solución acuosa, se realizaron bioensayos adicionales con agua destilada para tener un testigo.
- 2) Los bioensayos se llevaron a cabo en cajas Petri de vidrio, las cuales fueron previamente lavadas.
- 3) En cada caja Petri, se colocó un trozo de papel filtro de forma circular.
- 4) Transcurridos los primeros 20 minutos, se extrajeron 3 mL del colorante en solución acuosa, mediante una pipeta graduada de 10 mL y se colocaron sobre el papel filtro, de manera que quedara humedecido completamente. Este procedimiento se realizó una vez por cada intervalo, realizándose así 10 bioensayos por cada experimento (se realizó para las muestras tomadas para la exposición a baja presión y a presión atmosférica).
- 5) Después se colocaron 10 semillas de lechuga *Lactuca sativa* sobre el papel filtro húmedo, dejando espacio suficiente entre ellas para permitir su germinación, tal y como se muestra en la figura 3.3.
- 6) Una vez realizado el bioensayo, cada caja fue cerrada y etiquetada con fecha, número de experimento, intervalo y repetición.

7) Posteriormente las cajas se almacenaron en una bolsa negra, dentro de una caja y en un lugar fresco, evitando elevadas temperaturas y su consecuente pérdida de humedad.



Figura 3.3. Bioensayos con semillas de lechuga *Lactuca sativa*.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al someter una solución acuosa del colorante Negro Ácido 52 (NA52) a un plasma. Se analiza el cambio de los resultados en los dos diferentes escenarios a los que fue sometido el colorante. En este caso fue a presión atmosférica y baja presión.

IV.1. Absorbancia

En la figura 4.1 se puede apreciar el cambio en la absorbancia del colorante Negro Ácido 52 en la solución acuosa, respecto al tiempo de exposición de cada experimento.

Se observa que los valores de absorbancia de la solución NA52 a presión atmosférica, se reducen al ser expuestos al plasma. La reducción está directamente relacionada con el valor de la corriente aplicada en los experimentos (10, 15, 20 y 30 mA); a mayor corriente, menor valor de la absorbancia.

En particular, se observa que la reducción en la absorbancia para el colorante a presión atmosférica tuvo un comportamiento muy parecido en los cuatro experimentos, llegando a un valor mínimo de 0.083.

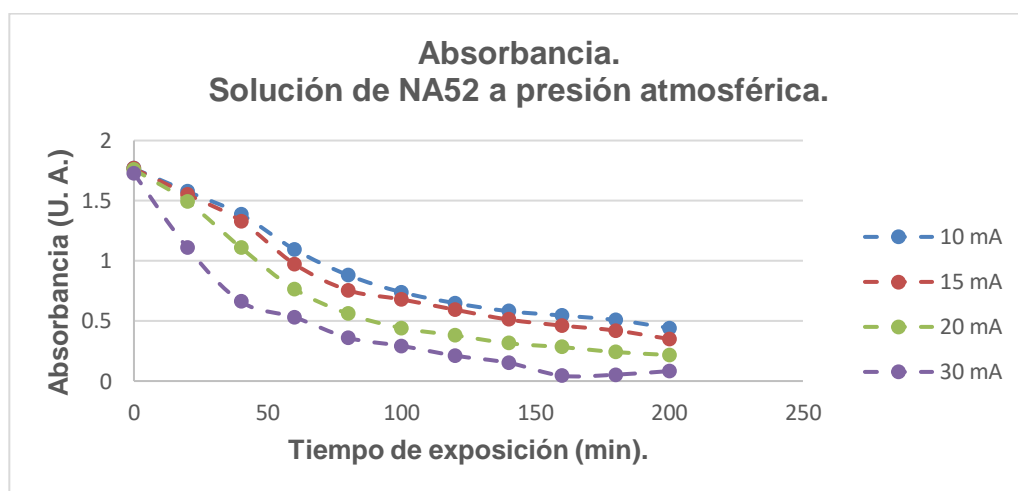


Figura 4.1. Absorbancia de solución acuosa de NA52 a presión atmosférica y a diferentes intensidades: 10 mA, 15 mA, 20 mA y 30 mA.

En términos generales se puede observar un comportamiento decreciente en el valor de la absorbancia como función del tiempo y de la potencia generadora del plasma. Mediante un ajuste matemático polinómico, se observó que la absorbancia (A_b) es descrita para cada corriente y como función del tiempo de exposición (t), por polinomios cuadráticos con término lineal e independiente. En la siguiente tabla se presentan los polinomios encontrados y los respectivos coeficientes de determinación para cada intensidad de corriente.

Tabla 4.1. Polinomios matemáticos y coeficientes de determinación de absorbancia a presión atmosférica.

Corriente generadora del plasma.	Polinomio.	Coefficiente de determinación.
10 mA	$A_b = 4 \times 10^{-5} t^2 - 0.014 t + 1.81$	$R^2 = 0.9926$
15 mA	$A_b = 4 \times 10^{-5} t^2 - 0.015 t + 1.79$	$R^2 = 0.9885$
20 mA	$A_b = 6 \times 10^{-5} t^2 - 0.018 t + 1.76$	$R^2 = 0.9888$
30 mA	$A_b = 6 \times 10^{-5} t^2 - 0.019 t + 1.53$	$R^2 = 0.9569$

IV.1.1. Absorbancia de la solución acuosa NA52 a baja presión

En la figura 4.2 se muestran los resultados del cambio en la absorbancia a baja presión.

Se observa que los valores de absorbancia de la solución NA52 a baja presión, se reducen al ser expuestos al plasma. La reducción está directamente relacionada con el tiempo de exposición, así como con el valor de la corriente aplicada en los experimentos (10, 15, 20 y 30 mA); a mayor corriente, menor valor de la absorbancia.

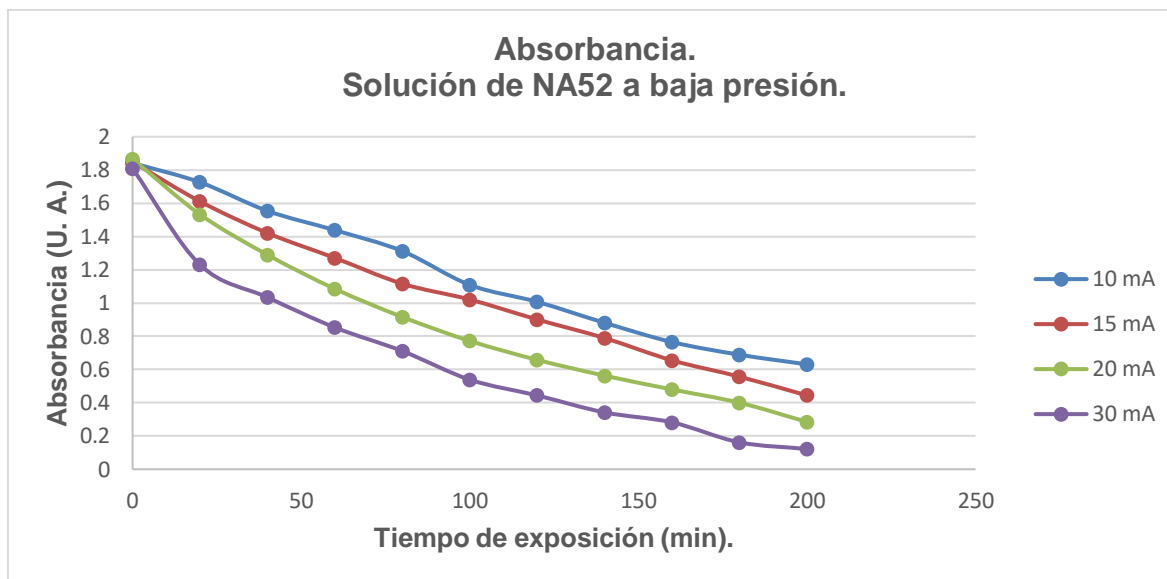


Figura 4.2. Absorbancia de solución acuosa de NA52 a baja presión y diferentes intensidades de corriente: 10 mA, 15 mA, 20 mA y 30 mA.

En términos generales se puede observar un comportamiento decreciente en el valor de la absorbancia como función del tiempo y de la potencia generadora del plasma. Mediante un ajuste matemático lineal y polinómico, se observó que la absorbancia (A_b) es descrita para cada corriente como función del tiempo de exposición (t), por ecuaciones con término lineal e independiente y polinomios cuadráticos con términos lineales e independientes respectivamente. En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones y los respectivos coeficientes de determinación para cada corriente.

Tabla 4.2. Polinomios matemáticos y coeficientes de determinación de absorbancia a baja presión.

Corriente generadora del plasma.	Polinomio.	Coefficiente de determinación.
10 mA	$A_b = -0.006 t + 1.81$	$R^2 = 0.9888$
15 mA	$A_b = -0.006 t + 1.72$	$R^2 = 0.9843$
20 mA	$A_b = 3 \times 10^{-5} t^2 - 0.013 t + 1.81$	$R^2 = 0.9950$
30 mA	$A_b = 4 \times 10^{-5} t^2 - 0.015 t + 1.65$	$R^2 = 0.9769$

En los valores de absorbancia para la solución expuesta a baja presión, se notan dos comportamientos lineales para los dos primeros tratamientos y dos polinómicos para los siguientes. Se alcanzaron valores al final del tiempo de exposición de: 0.631, 0.444, 0.285 y 0.122 cuando se emplearon intensidades de 10, 15, 20 y 30 mA, respectivamente. El valor de la absorbancia en cada uno de los experimentos siempre fue decreciente.

En particular, es evidente la mayor disminución de la absorbancia para todas las soluciones expuestas al plasma a presión atmosférica comparadas contra la disminución de la absorbancia a baja presión. Lo anterior, tiene explicación en el número de moléculas de aire dentro de la cámara de reacción presentes en el experimento, lo cual permite la realización de procesos químicos que aumentan la eficiencia del proceso de disminución de la absorbancia.

IV.2. Potencial de hidrógeno (pH)

En la figura 4.3 se muestra el comportamiento que tiene el pH de la solución acuosa NA52 a presión atmosférica, al ser expuesta a un plasma durante 200 minutos con variación en la intensidad de corriente.

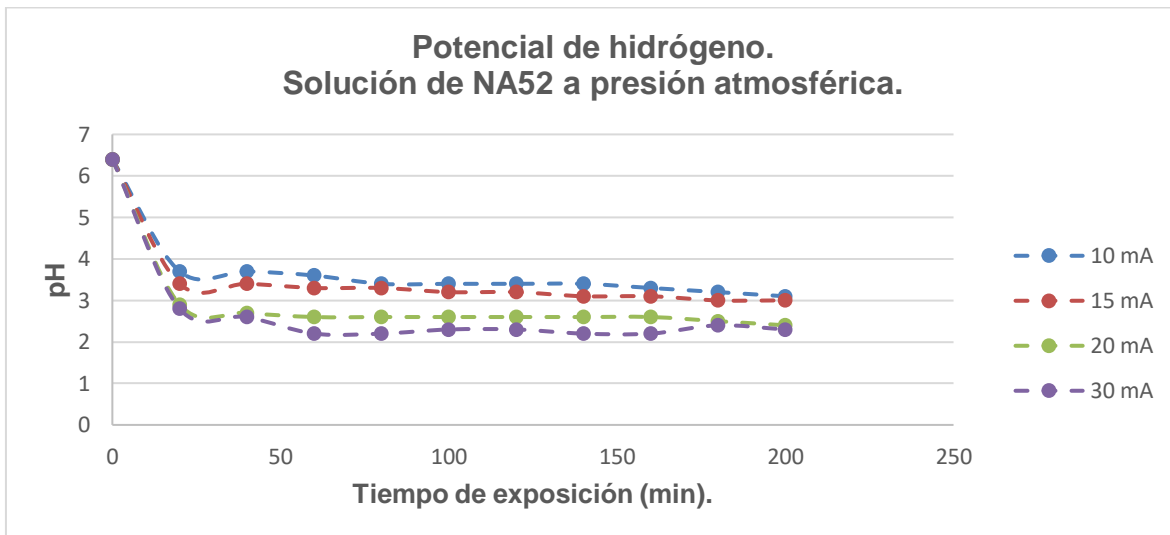


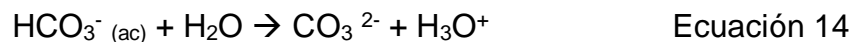
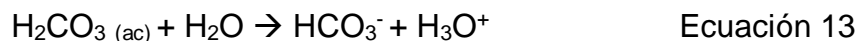
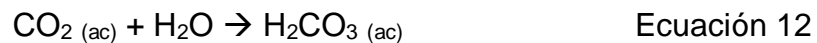
Figura 4.3. Comportamiento del pH de la solución acuosa de NA52 expuesta al plasma a presión atmosférica.

Se observa que el pH disminuye para todos los valores de corriente utilizados conforme pasa el tiempo. Es durante los primeros 20 minutos de exposición que el valor del pH disminuye notablemente. Para los siguientes minutos de exposición, los valores del pH cambian muy poco. Los comportamientos de las curvas de cambio de pH para diferentes corrientes son relativamente similares.

El valor mínimo de pH a presión atmosférica es de 2.2, y se obtiene a los 60 minutos de exposición para un valor de corriente de 30 mA.

La disminución del pH se atribuye a la generación de iones hidroxilo e iones hidronio, responsables de disminuir el pH del medio en el que se encuentran. Ambos iones se generan en procesos de autoionización y disociación del agua a temperatura ambiente, y su concentración aumenta a medida que aumenta la temperatura.

Puesto que el dispositivo experimental no es un sistema cerrado, esto implica que la solución está en contacto con el aire. El aire a su vez contiene CO₂, compuesto muy afín al agua destilada y, que al reaccionar con el sistema contribuye a una mayor generación de iones hidronio, tal como se muestra en las ecuaciones 12-14.



Reacciones químicas (Jiang *et al.*, 2014).

IV.2.1. Potencial de hidrógeno (pH) de solución acuosa de NA52 a baja presión

En la figura 4.4, se observa el comportamiento de las curvas de pH de una solución acuosa de NA52 a baja presión, tras ser sometida a un plasma con iguales parámetros que en el caso de presión atmosférica.

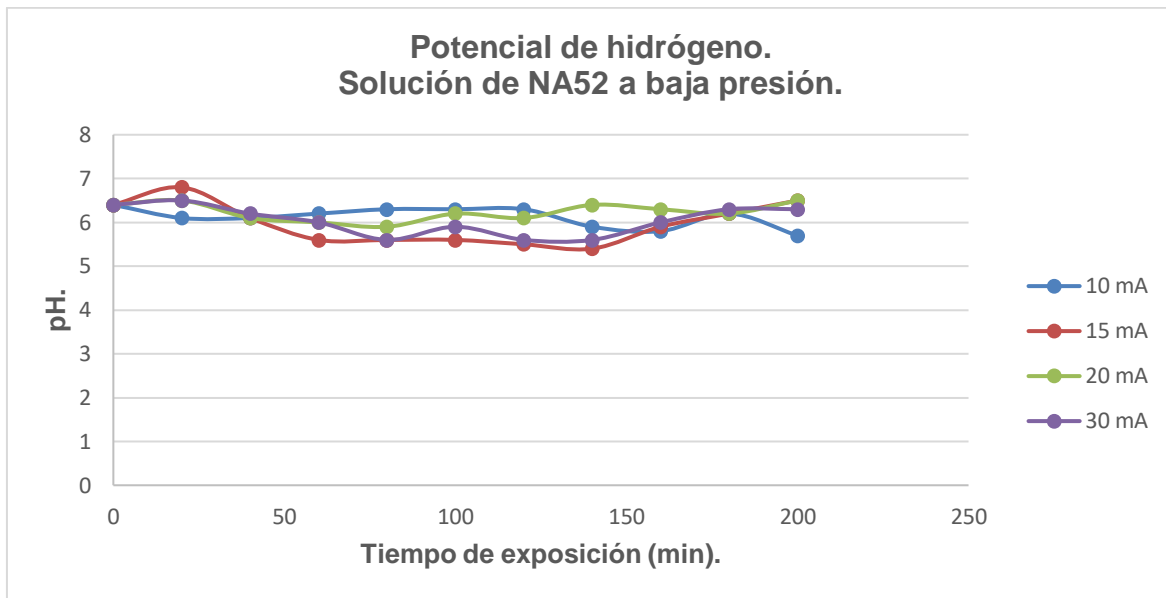


Figura 4.4. Comportamiento del pH de la solución acuosa de NA52 expuesta al plasma a baja presión y diferentes intensidades de corriente.

Los datos de los 4 tratamientos de la solución a baja presión presentan un comportamiento de escaso cambio.

En general los 4 tratamientos se comportaron de una manera similar, variando alrededor de los valores extremos 6.8 y 5.4.

IV.2.2. Comparación del potencial de hidrógeno en los dos diferentes escenarios (presión atmosférica y baja presión)

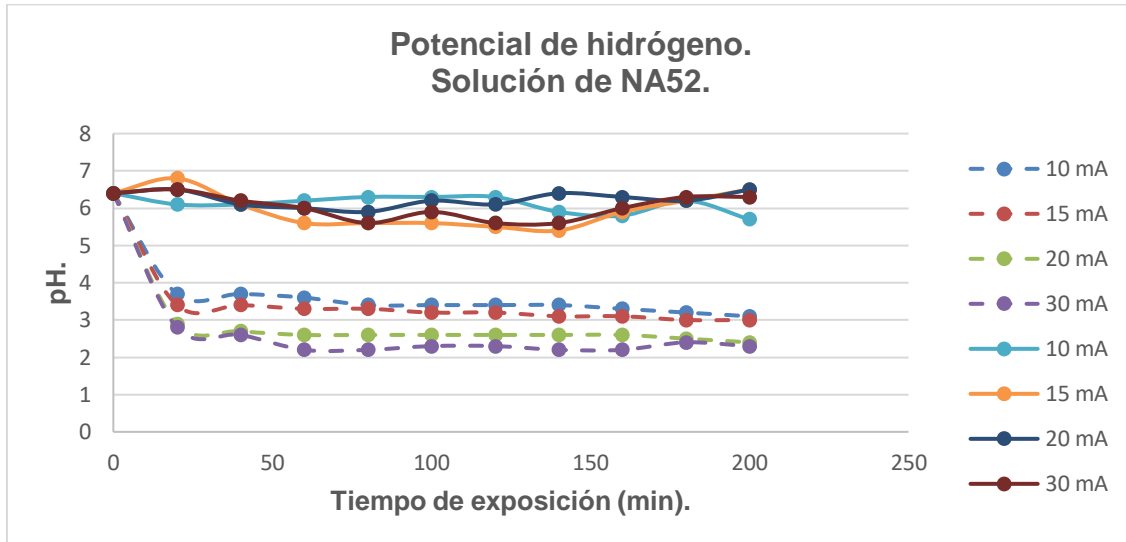


Figura 4.5. Comportamiento del pH de la solución acuosa de NA52 expuesta a un plasma a presión atmosférica y a un plasma a baja presión. las líneas punteadas corresponden a presión atmosférica.

En la figura 4.5, se muestra una comparación del comportamiento del pH de la solución con colorante NA52 en dos diferentes escenarios (presión atmosférica y baja presión), expuesta a los mismos parámetros de corriente e iguales tiempos de exposición.

En general se observa que a presión atmosférica se presentó una disminución notable del pH, mientras que a baja presión las variaciones fueron relativamente similares.

IV.3. Temperatura

En la figura 4.6 se presenta el comportamiento que tiene la temperatura en los diferentes escenarios (presión atmosférica y baja presión) sometidos a la misma situación en cuanto a los parámetros descritos anteriormente.

Se observa que los datos obtenidos a presión atmosférica (líneas punteadas) muestran un incremento en la temperatura para todos los tiempos de exposición y para las cuatro

intensidades de corriente generadoras del plasma. En particular, a mayor corriente, mayor temperatura conforme transcurre el tiempo.

Partiendo de valores de 15 °C, se alcanzaron valores de temperatura máximos de 41, 44, 49 y 52 °C para los experimentos con intensidades de corriente de 10, 15, 20 y 30 mA respectivamente.

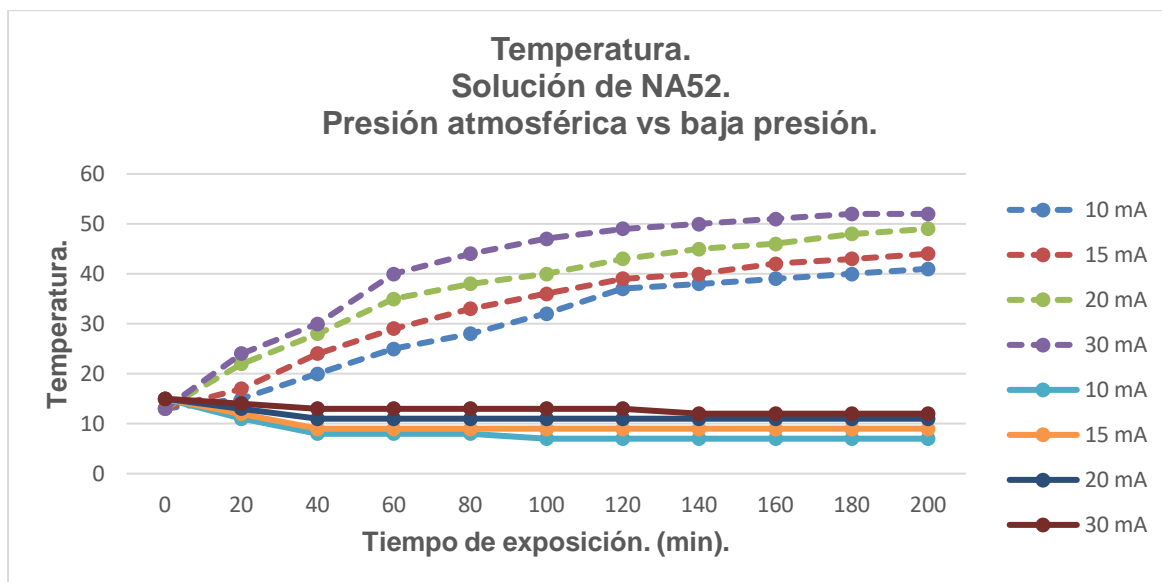


Figura 4.6. Comportamiento de la temperatura de la solución acuosa de NA52 expuesta al plasma a presión atmosférica y a baja presión. Las líneas punteadas corresponden al experimento a presión atmosférica.

IV.3.1. Temperatura de la solución acuosa de NA52 a baja presión

En este caso, las temperaturas fueron menores en comparación a la de los experimentos que fueron sometidos a presión atmosférica. Se puede observar que, durante 40 minutos de exposición al plasma la temperatura disminuyó un poco en los cuatro tratamientos. A partir de ese punto los tratamientos no mostraron un cambio significativo, ya que, los valores son casi similares entre ellos y presentan una trayectoria lineal en el resto del tiempo de exposición al plasma.

Partiendo de valores de 15 °C, se observó que la temperatura más baja registrada fue de 7 °C para el valor de corriente de 10 mA. En general, la temperatura disminuye en la solución expuesta al plasma a baja presión.

IV.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En las figuras 4.7 y 4.8 se muestra el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno de la solución de NA52 antes y después de ser sometida a un tratamiento de plasma a presión atmosférica, específicamente en los intervalos t_5 y t_{10} , es decir, después de haber transcurrido 100 minutos y 200 minutos de exposición a diferentes intensidades de corriente.

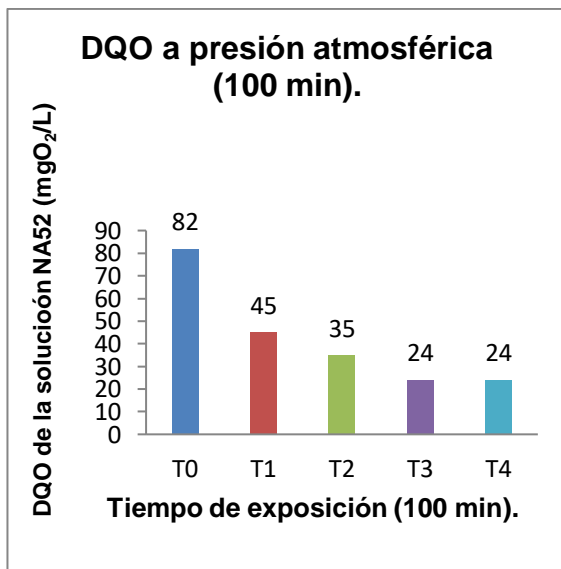


Figura 4.7. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno de la solución de NA52 al inicio y durante el tiempo de exposición de 100 minutos de cada tratamiento a presión atmosférica.

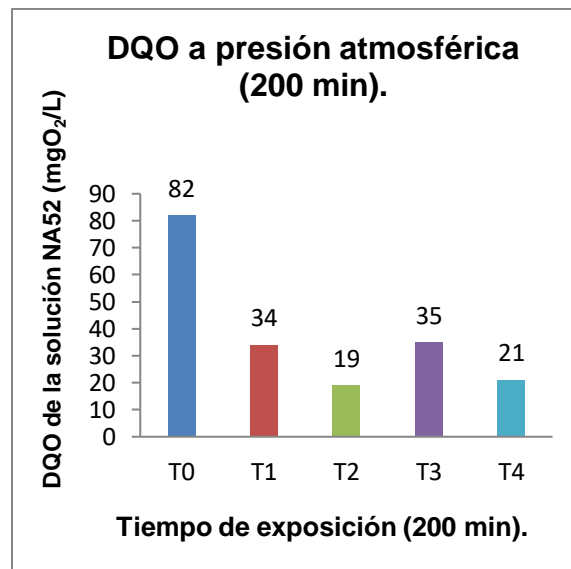


Figura 4.8. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno de la solución de NA52 al inicio y durante el tiempo de exposición de 200 minutos de cada tratamiento a presión atmosférica.

En las figuras 4.7 y 4.8 se observa que la DQO inicial (solución de NA52 en solución acuosa sin tratamiento) fue de 82 mg O₂/L. En el gráfico izquierdo, el tratamiento T1 (10 mA) registró un valor de 45 mg O₂/L, el tratamiento T2 (15 mA) presentó 35 mg O₂/L. En los tratamientos T3 y T4 la DQO disminuyó hasta un valor de 24 mg O₂/L.

En general, los valores de Demanda Química de Oxígeno disminuyen en todos los tratamientos, obteniéndose un rango de disminución del 45 al 71% aproximadamente.

Los datos muestran que los tratamientos más eficientes a 100 minutos de exposición fueron T3 y T4, en los cuales se obtuvo una reducción de aproximadamente el 71% comparándolo con el valor inicial de la solución con NA52.

En el gráfico derecho, se observa que los valores de DQO fueron de 34, 19, 35 y 21 mg O₂/L para los tratamientos T1, T2, T3 y T4, respectivamente, después de 200 minutos de exposición al plasma generado a presión atmosférica.

En este caso, los valores vuelven a disminuir considerablemente, llegando a un valor de 19 mg O₂/L, que fue el más bajo, lo que indica que a un tiempo de 200 minutos de exposición al plasma y utilizando una intensidad de corriente de 15 mA se logró la más alta reducción de la DQO.

En general se puede decir que el tiempo de exposición incide en la reducción de la DQO; entre mayor sea el tiempo de exposición, la demanda química de oxígeno será menor, como se puede observar en las gráficas 4.7 y 4.8.

IV.4.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la solución NA52 a baja presión

En las figuras 4.9 y 4.10, se observa el comportamiento que tiene la DQO, pero en este caso a baja presión al ser expuesta a los mismos tratamientos que se estudiaron a presión atmosférica.

En la gráfica 4.9 se puede observar que en el tratamiento 1 (con 10 miliamperios), la DQO disminuye hasta 25 mg O₂/L, destacando que fue el valor más bajo para el tiempo de exposición al plasma de 100 minutos. Con la intensidad de corriente de 15 miliamperios, la DQO fue de 35 mg O₂/L. Cuando se utilizaron intensidades de corriente de 20 y 30 miliamperios los valores de DQO fueron de 30 y 31 mg O₂/L para los tratamientos T3 y T4, respectivamente.

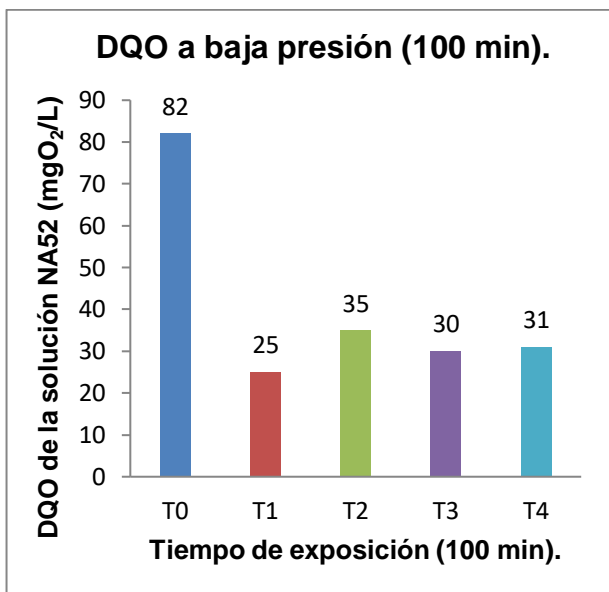


Figura 4.9. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno de la solución de NA52 al inicio y durante el tiempo de exposición de 100 minutos de cada tratamiento a baja presión.

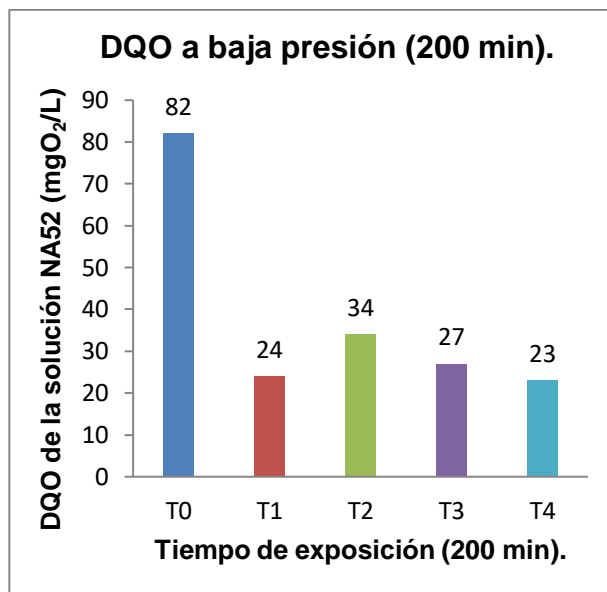


Figura 4.10. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno de la solución de NA52 al inicio y durante el tiempo de exposición de 200 minutos de cada tratamiento a baja presión.

En la gráfica 4.10 se puede observar que el tratamiento 1 tuvo un valor de 24 mg O₂/L, en el tratamiento 2 (efectuado a 15 mA) el valor fue de 34 mg O₂/L. En los tratamientos T3 y T4, efectuados a una intensidad de corriente de 20 y 30 mA, la DQO fue de 27 y 23 mg O₂/L, respectivamente. Es importante mencionar que el tiempo de exposición al plasma generado a bajas presiones tuvo un efecto ligeramente positivo, ya que todos los valores de DQO disminuyeron cuando los tratamientos se efectuaron durante 200 minutos.

IV.5. Carbono Orgánico Total (COT)

En la figura 4.11 se muestra el comportamiento del Carbono Orgánico Total de la solución de NA52 antes y después de ser sometida a un tratamiento de plasma, específicamente a 200 minutos de exposición a presión atmosférica.

En el gráfico se observa que el COT inicial (agua contaminada sin tratamiento) fue de 16 mg C/L. Así mismo se observan varios altibajos en los datos. En el gráfico 4.11, en el tratamiento T1 (10 mA) se registró un valor de 20 mg C/L, el valor fue de 13 mg C/L en el

tratamiento 2 (15 mA), 5 mg/L en el T3 y en el tratamiento 4 se obtuvo 1 mg C/L, siendo este último el menor de todos los valores.

De esta manera, los datos indican que el tratamiento más eficiente tomando en cuenta que el tiempo de exposición fue de 200 min, corresponde a la corriente de 30 mA; en este se obtuvo una reducción de aproximadamente el 93.75% comparándolo con el valor inicial de la solución (agua contaminada sin tratamiento).

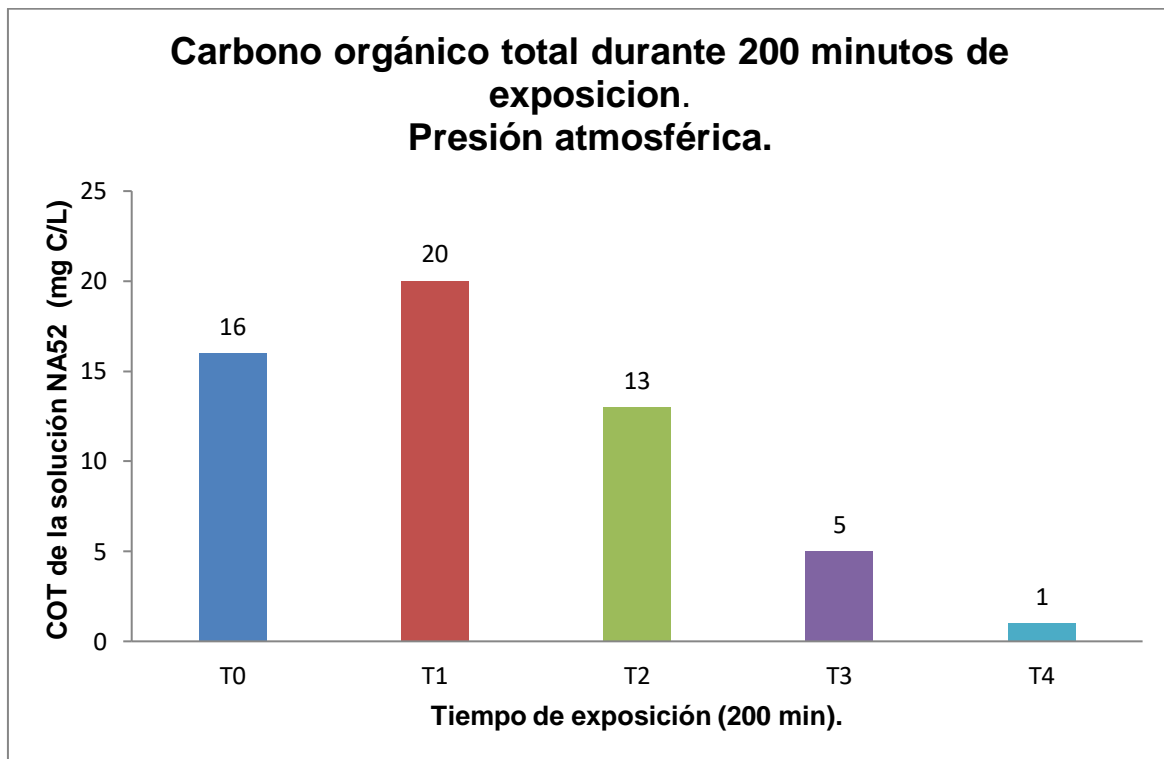


Figura 4.11. Comportamiento del Carbono Orgánico Total de la solución NA52 al inicio y final de cada tratamiento (Tratamientos 1, 2, 3 y 4) con una diferencia de potencial aplicada =1,500 V y una intensidad de corriente aplicada = 10, 15, 20 y 30 mA respectivamente, a presión atmosférica. En T0 no se aplicaron tratamientos.

A presión atmosférica el mejor tratamiento es el cuatro, ya que, al aumentar la intensidad de la corriente, el TOC disminuye considerablemente.

IV.6. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*)

En la figura 4.12 mostrada a continuación, se observa el porcentaje de germinación de las semillas de lechuga *Lactuca sativa* al ser hidratadas con una solución acuosa de Negro

Ácido 52, expuesta a un plasma con variación en los parámetros de generación y a presión atmosférica.

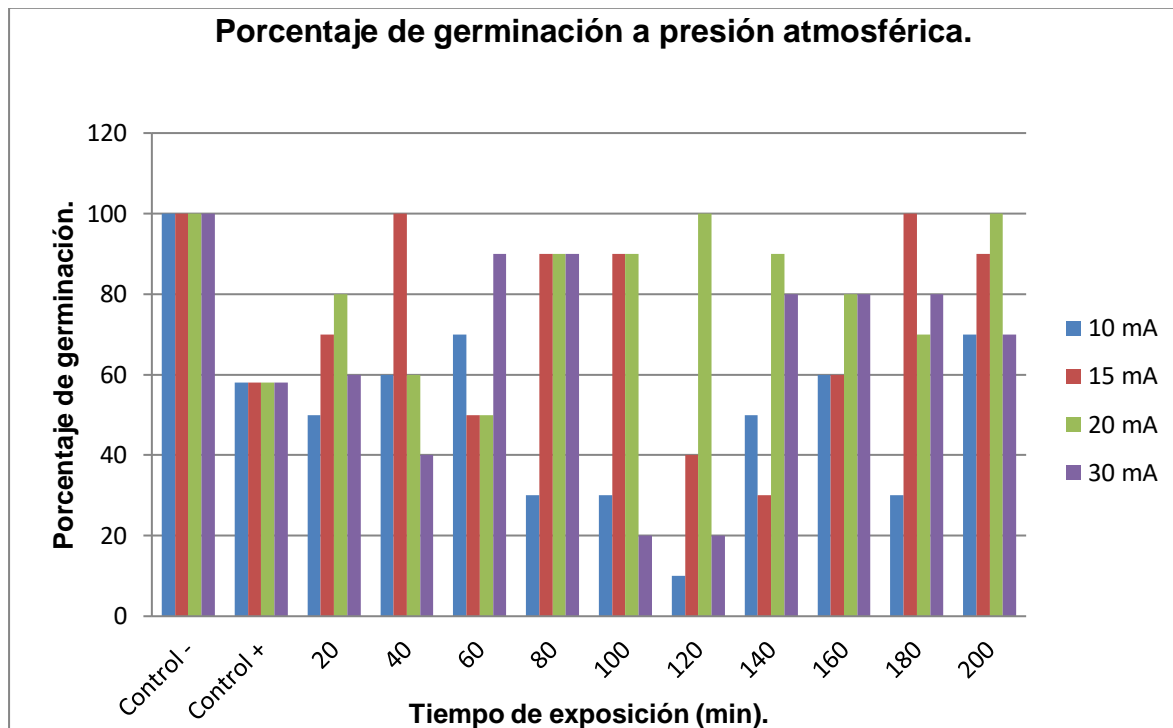


Figura 4.12. Porcentaje de germinación de semilla de lechuga *Lactuca sativa*, hidratadas con solución de NA52, expuesto a plasma a presión atmosférica. Control (-) agua destilada. Control (+) Solución de NA52.

En el gráfico se toman como referencia dos controles, uno negativo y uno positivo.

❖ **Control negativo:** Es un ensayo que evalúa todos los factores que pudieran afectar el resultado de germinación, excepto el contaminante de interés. En este proyecto se utilizó agua destilada como control negativo, de manera que se esperaba que la germinación fuera mayor a 90%.

❖ **Control positivo:** Es un ensayo realizado para evaluar la sensibilidad de los organismos (semillas de lechuga) al ser expuestos a una sustancia de referencia. En este trabajo se tomó como control positivo la solución de Negro Ácido 52 sin exponer al plasma.

En la figura 4.12 se puede observar que el porcentaje de germinación fue mayor en el intervalo de exposición de 80 minutos. Es el mejor, ya que, tuvo 90% de germinación para 3 tratamientos, el que tuvo menos porcentaje de germinación (T1 con 30%) quizá fue por la

baja intensidad de corriente. Sin embargo, comparado con el control positivo, el peor tratamiento o en donde se nota menores porcentajes de germinación, fue el tratamiento T1 (10 miliamperios). Es importante destacar el comportamiento de los resultados en el tratamiento 1 (10 mA), en el cual se presenta el mínimo porcentaje de germinación (10% después de 120 minutos de exposición).

A los 200 minutos de exposición al plasma, el porcentaje de germinación aumentó, con respecto al control positivo, en todos los tratamientos.

IV.6.1. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) en una solución de NA52 a baja presión

En la figura 4.13, se observa el porcentaje de germinación de las semillas de *Lactuca sativa*, al ser expuestas a una muestra de agua contaminada, previamente sometida a un tratamiento de plasma a baja presión, con los mismos parámetros que los aplicados a presión atmosférica.

En general, todos los tratamientos variaron constantemente durante todo el tiempo de exposición. Se puede observar en la gráfica 4.13 que el tratamiento 2 presenta un pequeño porcentaje de germinación mayor a los otros tratamientos. Llegando a tener un máximo porcentaje de (80%) a los 200 minutos de exposición, y el porcentaje menor de 40% en dos ocasiones (120 y 180 minutos de exposición respectivamente).

Es importante mencionar que en tratamiento 1 tuvo el mayor porcentaje de germinación comparándolo con el control positivo, llegando a un 90% durante 120 min de exposición.

En el tratamiento 4, después de 100 minutos de exposición, no hubo indicios de germinación, colocándolo como el peor tratamiento en cuanto a germinación.

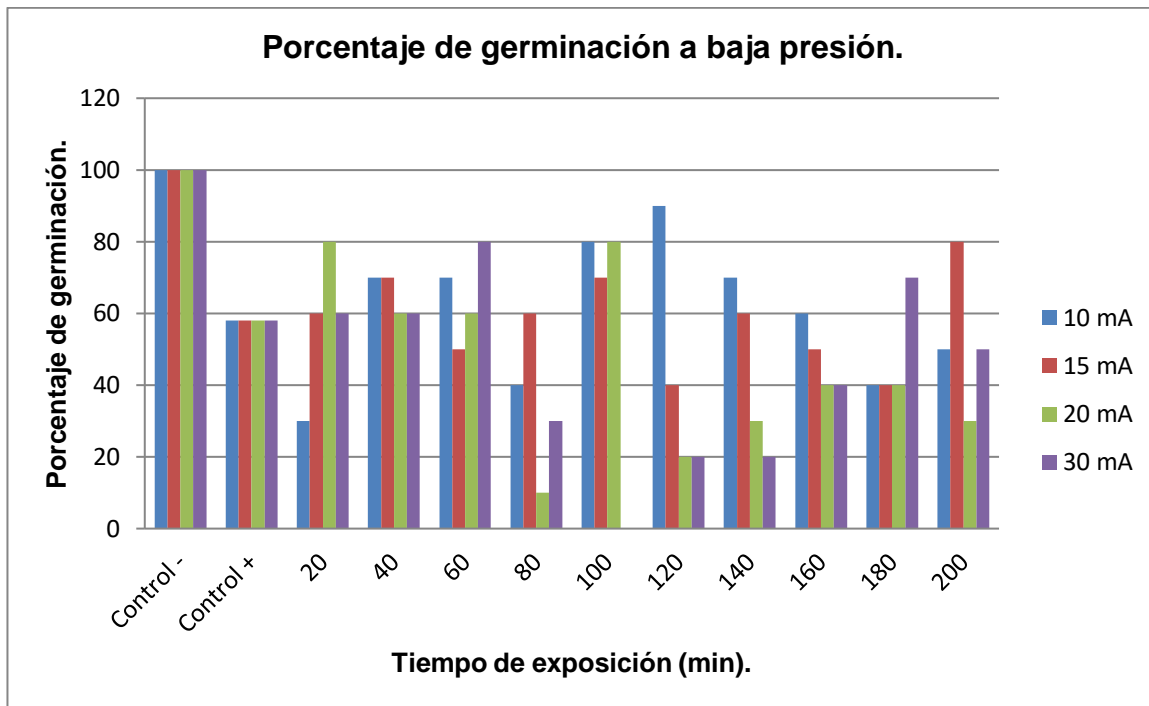


Figura 4.13. Porcentaje de germinación de semilla de lechuga *Lactuca sativa*, expuesta a la solución de NA52, sometida al tratamiento de plasma a baja presión. Control (-) agua destilada. Control (+) Solución de NA52.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.

- ❖ Se determinaron los cambios generados respecto de la absorbancia en una solución acuosa del colorante negro ácido 52 (NA52), tras su exposición a un plasma aire-agua no térmico de diferentes potencias (15, 22.5, 30 y 45 W), obtenidas a un voltaje constante de 1,500 V y a diferentes intensidades (10 mA, 15 mA, 20 mA y 30 mA).
- ❖ Se implementó un dispositivo experimental ajustable, con el que se logró la generación del plasma aire-agua a presión atmosférica y a baja presión, en presencia de la solución acuosa de colorante.
- ❖ Se expuso la solución acuosa de colorante ante el plasma no térmico aire-agua durante diferentes tiempos, los cuales fueron tomados de 20 en 20 minutos hasta llegar a un tiempo total de exposición de 200 minutos. Se realizó este proceso para diferentes intensidades del plasma, las cuales ya fueron mencionadas antes.
- ❖ Se observó y cuantificó el efecto que tiene el plasma aire-agua en el cambio de la absorbancia, temperatura, potencial de hidrógeno, COT, DQO y el efecto sobre la germinación de semillas de una solución con colorante como función del tiempo de tratamiento con el plasma y de la potencia de éste.
 - En general los valores de la absorbancia disminuyeron para todos los tratamientos tanto a presión atmosférica, como a baja presión. Los valores disminuyeron en función del aumento de los parámetros del plasma, así como del tiempo de exposición. Los valores de absorbancia disminuyeron hasta 0.083 para presión atmosférica y 0.122 para baja presión. La disminución se infiere o se debe a la descomposición del colorante, y de sus compuestos intermediarios, en la solución acuosa.

- El comportamiento del cambio en la temperatura es más notable a presión atmosférica, ya que, en este escenario la temperatura aumentó en los 4 tratamientos, especialmente en el tratamiento 4 (con una intensidad de corriente de 30 miliamperios) se obtuvo la mayor temperatura, que fue de 52 °C. A baja presión la temperatura disminuyó considerablemente en los cuatro tratamientos, comparándola con la de presión atmosférica. En este caso la menor temperatura fue de 7 °C y se obtuvo en el tratamiento 1, con la intensidad de corriente de 10 miliamperios.
- El comportamiento del pH durante el desarrollo de la experimentación mostró una tendencia decreciente conforme pasaba el tiempo, para los 4 tratamientos efectuados a presión atmosférica. Los valores de pH de la solución con NA52 cambiaron de 6.4 a 2.3 para el tratamiento efectuado utilizando una intensidad de 30 mA. Los tratamientos efectuados con 10, 15 y 20 mA presentaron valores finales de pH de 3.1, 3.0 y 2.4, respectivamente. Los datos de los tratamientos de la solución con colorante con plasma generado a baja presión presentan valores mayores de pH en comparación con los efectuados a presión atmosférica. Es importante mencionar que los valores de pH de los tratamientos de la solución con el plasma generado a baja presión prácticamente se mantienen estables, variando entre 5.4 y 6.8.

En conclusión, la solución con NA52 al ser expuesta al plasma aire-agua a presión atmosférica, disminuye considerablemente el pH.

- El Carbono Orgánico Total (COT) disminuyó con el plasma generado a presión atmosférica utilizando intensidades de corriente de 15, 20 y 30 mA, obteniéndose una mineralización del 93.75% empleando la intensidad de 30 mA.

Sólo se realizó la medición del COT en los tratamientos efectuados a presión atmosférica ya que los mejores resultados de los diferentes parámetros se obtuvieron bajo estas condiciones experimentales. De acuerdo a los resultados obtenidos, el grado de

mineralización del colorante aumentó con el incremento de la intensidad de corriente, es decir, con la mayor potencia del plasma generado a presión atmosférica.

- La Demanda Química de Oxígeno mostró una disminución para todos los tratamientos a presión atmosférica durante un tiempo de exposición de 100 minutos, alcanzando una disminución del 45 al 71%, aproximadamente. Para el tiempo de exposición de 200 minutos se obtuvo una reducción del 57 al 77 %.

Para el escenario a baja presión, durante el tiempo de exposición de 100 minutos se alcanzó una disminución del 57 al 70% de la DQO mientras que para el tiempo de exposición de 200 minutos se obtuvo una reducción del 59 al 72%.

- La toxicidad del colorante NA52 en solución acuosa a presión atmosférica disminuyó, al aplicar el plasma durante 200 minutos bajo los parámetros de 1,500 V y las intensidades de corriente ya antes mencionadas. Esto se puede notar a través de la comparación de la germinación semillas en los 4 tratamientos y con el control positivo, al cual se incorporó el colorante NA52 sin ningún tratamiento. En general el tratamiento ayudo a sobrepasar los estándares del control positivo con ligeras variaciones en algunos tratamientos y en diferentes intervalos de tiempo.
- La evaluación de la toxicidad de la solución acuosa con colorante Negro Ácido 52, tratada con plasma aire-agua generado a baja presión, efectuada mediante la germinación de semillas de *lechuga Lactuca sativa*, indicó una ligera disminución de la toxicidad que está en función del tratamiento y tiempo de exposición. Esto se pudo observar a través de la comparación del porcentaje de germinación de los 4 tratamientos y con el control positivo, que fue un indicador de medición, el cual no recibió ningún efecto ante el plasma aire-agua. Se puede decir que en todos los tratamientos se superó el estándar del control positivo, habiendo

porcentajes de germinación menores, pero en general la germinación aumento, gracias al efecto que tuvo el plasma aire-agua sobre el colorante.

- Con los valores obtenidos de las pruebas de DQO y bioensayos con semillas de lechuga *Lactuca sativa*, se concluye que el tratamiento en el cual se conjugan criterios de rapidez y efectividad; es el efectuado con el plasma generado a 20 mA y a presión atmosférica.
- En general, se disminuyó la toxicidad del colorante Negro Ácido 52 (NA52) en solución acuosa, es mediante la exposición de este a un plasma no térmico aire-agua. Lo anterior se verificó mediante la evaluación de los valores de toxicidad antes, durante y al finalizar el procedimiento experimental.

BIBLIOGRAFÍA

ACID DYES (Negro ácido 52) (2012). Consultada el 20 de abril de 2019, de: <http://www.worlddyevariety.com/acid-dyes/acid-black-52.html>.

(Borjas J.,2012). Estudio de la modificación superficial de nanofibras de carbón mediante plasma de etileno para la obtención de nanocompuestos de polietileno/nanofibras de carbón (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila.

(Chevallier P., Castonguay M., Turgeon S., Dubrulle N., Mantovani D., McBreen P. y Laroche G., 2001). Ammonia RF - Plasma on PTFE surfaces: chemical characterization of the species created on the surface by vapor - Phase chemical derivatization. Journal Physics Chemistry, 105. Pág. 12490-12497.

Colindres. (2010). Tratamiento de residuales líquidos textiles mediante oxidación con ozono (Tesis de doctorado). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.

(Díaz Ma. *et al.*, 2004). Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. Instituto Mexicano de tecnología del agua. Pág. 11-179.

(Durán J. y Vergara J., 2015). DEGRADACIÓN DE COLORANTE TEXTIL NEGRO ÁCIDO 52 (NA52) EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE UN PLASMA NO TÉRMICO. Jóvenes en la ciencia. Pág. 35-39.

FINE CHEMICALS (116750-Acid black 52 (C.I. 15711)) (2016). Consultada el 20 de abril de 2019, de: [http://www.dcfinechemicals.com/files2/Hojas%20de%20seguridad%20\(EN\)/116750-SDS-EN.pdf](http://www.dcfinechemicals.com/files2/Hojas%20de%20seguridad%20(EN)/116750-SDS-EN.pdf).

FRANCISCO J. GORDILLO VÁZQUEZ (Plasmas) (2015). Consultada el 22 de abril de 2019, de: <http://www-revista.iaa.es/41/plasmas>.

(Hung W., Cheng P., Chieh S., Taut J., Yuan Ch. y Nan K., 2009). UV-curable PDMS-containing PU system for hydrophobic textile surface treatment. *Journal Polymers Research*, 16. Pág. 601-610.

(Ilhan-Sarac O. y Akpek E., 2005). Current concepts and techniques in keratoprosthesis. *Curr. Opin. Ophthalmol.* 16(4). Pág. 246-50.

(Jiang B. *et al.*, 2014). Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. China University of Petroleum. 236. Pág. 348–368.

JOEL O. PACHECO SOTELO (El plasma, ese universo de todos... tan desconocido) (2010). Consultada el 22 de abril de 2019, de: http://inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/CONTACTO_28_PLASMA.pdf.

JXARLES (Colorantes Textiles) (2014). Consultada el 17 de abril de 2019, de: <http://www.cosmotex.net/es/content/colorantes-textiles>.

(Lloyd A., Faragher R. y Denyer S., 2001). Ocular biomaterials and implants. *Biomaterials*, 22(8). Pág. 769- 85.

(Martínez *et al.*, 2012). Biotechnology applied to the degradation of textile industry dyes. *Universidad y ciencia*. Pág.187-199.

(Manolache S., 2004). Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science. *Polymer Science*, 29, 815885.

(Mantovani D., Castonguay M., Pageau J., Fiset M. y Laroche, G., 1999). Ammonia RF-plasma treatment of tubular ePTFE vascular prostheses. *Plasmas and polymers*, 4(2-3). Pág. 159-182.

(Nahed A. y Reda, E., 2010). The use of new technologies in chloration of textile fibers. *Journal Material Science*, 45, Pág. 1143-1153.

NASSER E (Fundamental of gaseous Ionization and plasma electronics. Nueva York. Wiley Intersciences) (1971). Consultada el 30 de abril de 2019, de: [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1046821](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1046821).

NEIRA M. (Fundamentos De Espectrofotometría) (2010). Consultada el 26 de abril de 2019, de: https://www.u cursos.cl/odontologia/2010/2/OD0903/1/material_docente/previsualizar?id_material=566977.

NEOKEM (Colorantes Alimenticios) (2015). Consultada el 18 de abril de 2019, de: <https://www.neokem.mx/colorantes-alimenticios-aplicaciones.pdf>.

(Pablo z. **et al.**, 2018). Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review. Pág. 38-47.

PAULA (Los tintes textiles) (2017). Consultada el 17 de abril de 2019, de: <https://mangasisa.com/los-tintes-textiles/>.

QUIMINET (La importancia de los colorantes en la industria textil) (2011). Consultada el 17 de abril de 2019, de: <https://www.quiminet.com/articulos/la-importancia-de-los-colorantes-en-la-industria-textil-2637578.htm>.

REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE MORELOS (La sangre del universo: el plasma). Consultada el 25 de noviembre de 2019, de: <https://revistahypatia.org/fisica.html>.

(Saettone E., 2010). Aplicaciones de la física de plasmas en la industria. Ingeniería Industrial. Pág. 195-210.

(Simona **et al.**, 2016). Investigación del proceso de tintura sobre tejidos de algodón con colorantes naturales extraídos de micro y macro algas. *Arthrospira platensis*, *Synechococcus* sp., *Ulva* sp. pág.5-72.

S. KAPPE Y A. FERNÁNDEZ (Carbono Orgánico Total (COT)) (2015). Consultada el 22 de abril de 2019, de: <https://www.industriaquimica.es/articulos/20151112/carbono-organico->

total cot?fbclid=IwAR1MDugp9Ue
qHwMqrgd35KoBtqSjewWzT0G_LhwUzNs4B9N5x6ZSuKGMcE#.XJpi0NlzaUI.

TOXNET (Human Health Effects) (2018)). Consultada el 21 de abril de 2019, de:
<https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+4205>.

(Yasuda, H.,1985). Plasma polymerization. Estados Unidos de América: Academic Press
INC.