

COSTRUCCIÓN DE UN REACTOR FOTOCATALÍTICO MONITOREADO POR  
LabVIEW PARA DETERMINAR EL CICLO DE VIDA DE LA ILMENITA.

TATIANA CAROLINA BELTRÁN GONZÁLEZ

CRISTIAN DAVID RIVERA SÁNCHEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D. C.  
2018

CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR FOTOCATALÍTICO MONITOREADO POR  
LabVIEW PARA DETERMINAR EL CICLO DE VIDA DE LA ILMENITA.

TATIANA CAROLINA BELTRÁN GONZÁLEZ  
CRISTIAN DAVID RIVERA SÁNCHEZ

Proyecto integral de grado para optar el título de

INGENIERO QUÍMICO

INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

César Augusto Quiñones Segura  
Dr. Sc.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D. C.  
2018

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado Docente Investigador

---

Firma del jurado 1

---

Firma del jurado 2

Bogotá D. C., Agosto de 2018

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano General de la Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director de Investigaciones y Proyección Social

**Dr. MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ**

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

**Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL**

Director del Departamento de Ingeniería Química

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los Elaboración propia.

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres, Edgar y Angélica, a mi hermana Melanie, a mis abuelos, Manuel y Omaira, y a mi tío Manuel, por ser el motor y la energía que llena mis días.

**TATIANA CAROLINA BELTRÁN GONZÁLEZ**

Este trabajo de grado está dedicado a mis padres, y a mi familia que siempre me motivaron en cada paso de mi carrera, por el impulso que me dieron cada vez que me caía, sobre todo en mi formación como ser humano. Este trabajo también se lo dedico a mi novia, amigos, maestros y al grupo de materiales fotoactivos por como acogieron a un ingeniero mecánico en su grupo de químicos. A mis abuelos, en especial a Álvaro Sánchez por llevar la mecánica en la sangre.

**CRISTIAN DAVID RIVERA SANCHEZ**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por guiar siempre mi camino, darme los recursos, el tiempo, la energía y disposición para cada objetivo.

A mis padres por siempre estar conmigo, brindándome todo de sí mismos, en especial su comprensión y una paciencia sin límites; a mi hermana por ser mi compañera de aventuras y mi mejor amiga; a mi abuelita por ser una mujer incondicional, mi confidente, y especialmente consentirme tanto; a mi abuelito por enseñarme la importancia del estudio, sus grandes consejos y su inmensa nobleza; a mi tío Manuel, por su picardía y la dedicación a sus sobrinas, a Vanessa por largas jornadas de charlas, también a mis tíos, primos y familiares, quienes aportaron su granito de arena para que pudiera cumplir mis sueños, por brindarme su apoyo incondicional y su amor.

A las hermanas que me dio la vida, a Vivian, Tatiana, Jully, Paula, y la nueva integrante Sofia. Construimos lazos que cada año se fortalecen y siguen creciendo, es emocionante ver como cada una va construyendo poco a poco su futuro, y este es solo uno de muchos escalones en los que seguiremos avanzando juntas. A mis compañeras de la universidad, Daniela, Stephany, por ser mis amigas, mis confidentes, y apoyarme en cada cosa que se me ocurría, sin dejar atrás a Sebastián, Johanna, Verónica, Andrés, por acompañarme y compartir tantos momentos de risas y alegrías; a Lina por ser ahora un ángel que nos acompañará desde el cielo, siempre recordaré tus cuidados y tu gran sonrisa.

A mi director, Dr. Sc. César Augusto Quiñones Segura, por su tiempo, orientarme en el presente trabajo de grado, y enseñarme grandes lecciones de vida. También al grupo de Materiales Fotoactivos, por su gran entrega, dedicación y compromiso en todas las etapas de este proceso, por enseñarme tantas cosas además de las académicas, a mis compañeras Paola y Emily por acompañarme, apoyarme y siempre motivarme, quienes más que un grupo de investigación son como una familia. Al Politécnico Grancolombiano, por todos los aportes a este trabajo, por su disposición y acogernos tan amablemente en sus instalaciones.

A mi compañero Cristian Rivera, por su paciencia, su compromiso, su ayuda y dedicación a lo largo de este trabajo, que con obstáculos logramos culminar con éxito. De manera muy especial, mis agradecimientos a Yenny, Alejandro y a la monitoria de los laboratorios, quienes día a día aportaron, ayudaron y vivieron con nosotros todo el desarrollo de nuestro trabajo.

***Tatiana Carolina Beltrán González***



## **AGRADECIMIENTOS**

Primero le doy gracias al Todo poderoso, por todas las bendiciones que he recibido en mi vida, y sobre todo haber tenido la posibilidad de realizar mis estudios profesionales, ser luz de esperanza cada vez que me he caído en mi vida.

Agradezco a mis padres Cecilia Sánchez y Guillermo Rivera, por sus enseñanzas y oraciones, que me ayudaron a cumplir mis sueños, me protegieran de todo mal y peligro. Gracias porque sus palabras hoy me ayudan ser una persona de bien, con el impulso brindado en los momentos más difíciles de mi carrera. En el cielo le agradezco a mi tía y segunda madre Gloria Alcira Sánchez porque todas las enseñanzas las veo hoy reflejadas al desempeñarme como persona.

A mi primo el Ing. Wilson Castellanos Sánchez por los retos y ser un ejemplo a seguir, por todos sus consejos y ayudarme ser un mejor profesional y a su mentor Álvaro Sánchez por ser una fuente de inspiración en mi camino profesional, sus formas de perseverar en la vida y modelo para no rendirse nunca.

Le doy las gracias al Dr. Sc. Cesar Augusto Quiñones Segura por ser más que mi director de proyecto de grado un gran amigo y maestro de vida, que por sus consejos y gran experiencia logró que hiciera realidad la construcción de este proyecto, de igual forma que me ayudo en mi crecimiento personal y más que todo profesional. Le agradezco de todo corazón.

Quedo completamente agradecido por el apoyo brindado por el Grupo de Materiales Fotoactivos, el SEIA y el Grupo de Simulación e Instrumentación, puesto que me acogieron en su familia de ingenieros químicos e ingenieros ambientales, respectivamente, puesto que sus aportes fueron muy importantes para el desarrollo de este proyecto.

Y le doy un agradecimiento muy especial a mi compañera Tatiana Carolina Beltrán. Por seguir mis locuras y hacer este proyecto relacionando las dos carreras, además por la paciencia y respeto que me tuvo para lograr hacer este gran equipo de trabajo.

Gracias a mis compañeras de trabajo de grado Paola Poveda y Dayanna Bohórquez, por ser un apoyo en el desarrollo de este proyecto y a los demás integrantes del grupo de investigación Daniela Manjarres, Ophyr Virgüez, Katherine Cuervo, Andrea Rojas, Andrea Daza, Leidy Herrera, Eliana Quevedo, Lizeth Peña, Karen Escarraga y Jaime Callejas, al Politécnico Grancolombiano por las herramientas prestadas para lograr esta meta.

***Cristian David Rivera Sánchez***

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>21</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
<b>1.FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>23</b>
1.1 PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN	23
1.1.1 Fotocatálisis heterogénea	24
1.2 AZUL DE METILENO	24
1.3 ILMENITA	25
1.4 REACTORES FOTOCATÁLITICOS	26
1.5 INSTRUMENTACIÓN CON INSTRUMENTOS VIRTUALES	27
1.5.1 Adquisición y Generación de Datos	27
1.6 TRANSDUCTORES	28
1.6.1 Sensor de temperatura LM35.	29
1.6.2 Sensor de nivel.	29
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>31</b>
2.1 CURVA DE CALIBRACIÓN DE AZUL DE METILENO	31
2.2 REACTOR ESCALA LABORATORIO	32
2.2.1 Ilmenita	32
2.2.1.1 Ilmenita suspendida	33
2.2.1.2 Discos de ilmenita	34
2.3 MONITOREO CON LabVIEW	35
2.3.1 Elaboración de software y ensamblaje de hardware de control.	35
2.3.1.1 Estructura de programación	35
2.3.1.2 Generación de datos digitales	42
2.3.1.3 Adquisición de datos digitales y análogos	42
2.3.1.4 Lazo de control	43
2.4 DISEÑO DE REACTOR	44
2.4.1 Parámetros de diseño.	44
2.4.1.1 Luz	44
2.4.1.2 Aireación	45
2.4.1.3 Volumen	45
2.4.1.4 Contaminante o sustancia a tratar	45
2.4.1.5 Agua	45
2.4.1.6 Geometría	46
2.4.1.7 Fotocatalizador.	46
2.4.2 Requerimientos	46
2.4.2.1 Robustez	46
2.4.2.2 Materiales de fácil adquisición	47
2.4.2.3 Ensamble sencillo	47

2.4.2.4	Uso de la interfaz National instruments	47
2.4.3	Estructuras	47
2.4.1.1	Estructura interna	49
2.4.1.2	Estructura externa	50
2.4.4	Sistema de aireación	51
2.4.5	Sistema de iluminación	52
2.4.6	Contenedor de material fotocatalítico.	53
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>54</b>
3.1	REACTOR ESCALA LABORATORIO	54
3.1.1	Ilmenita suspendida.	54
3.1.1.1	Agitación magnética.	54
3.1.1.2	Tamaños de partícula	56
3.1.2	Discos de ilmenita	58
3.2	PROGRAMA DE CONTROL	69
3.3	REACTOR PROTOTIPO	73
3.3.1	Cantidad de ilmenita.	73
4.	MANUALES DEL REACTOR FOTOCATALÍTICO	76
4.1	MANUAL DE INSTALACIÓN	76
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>83</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>84</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>89</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
<b>Ilustración 1.</b> MyDAQ dispositivo de adquisición de datos	28
<b>Ilustración 2.</b> Sensor LM35 configuración de pines	29
<b>Ilustración 3.</b> Curva de calibración	31
<b>Ilustración 4.</b> Disco que contiene el material fotocatalítico. SolidEdge ST 10	34
<b>Ilustración 5.</b> Operación de una máquina de estados	36
<b>Ilustración 6.</b> Esquema de funcionamiento del programa. Microsoft Visio 2013	41
<b>Ilustración 7.</b> Lazos de control	43
<b>Ilustración 8.</b> Estructura del reactor prototipo. Solidedge ST10	48
<b>Ilustración 9.</b> Diagramas instrumentación del proceso. EDraw 8.1	49
<b>Ilustración 10.</b> Estructura interna del reactor. Solidedge ST10	50
<b>Ilustración 11.</b> Parte exterior del reactor. Solidedge ST 10	51
<b>Ilustración 12.</b> Sistema de aireación o agitación. Solidedge ST10	52
<b>Ilustración 13.</b> Sistema de iluminación. Solidedge ST10	52
<b>Ilustración 14.</b> El ajuste del disco en la estructura interna. Solidedge ST10	53
<b>Ilustración 15.</b> Panel frontal: estado de configuración. LabVIEW 2016	69
<b>Ilustración 16.</b> Panel frontal: estado de inicialización. LabVIEW 2016	70
<b>Ilustración 17.</b> Panel frontal: estado de llenado. LabVIEW 2016	70
<b>Ilustración 18.</b> Panel frontal: estado de degradación. LabVIEW 2016	71
<b>Ilustración 19.</b> Panel frontal: estado de vaciado. LabVIEW 2016	71
<b>Ilustración 20.</b> Panel frontal: estado de purga. LabVIEW 2016	72
<b>Ilustración 21.</b> Parada de emergencia. LabVIEW 2016	72
<b>Ilustración 22.</b> Ubicación del instalador del programa y drivers	77
<b>Ilustración 23.</b> Pantalla de inicio del instalador	78
<b>Ilustración 24.</b> Selección de lugar de instalación del programa y drivers	79
<b>Ilustración 25.</b> Ventaja de programas y complementos a instalar	80
<b>Ilustración 26.</b> Ventana del proceso de instalación	81
<b>Ilustración 27.</b> Ventana de finde instalación del programa	82

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Curva de calibración de azul de metileno. OriginLab	32
<b>Gráfica 2.</b> Remoción de AM con ilmenita (ST) agitada magnéticamente. OriginLab.	55
<b>Gráfica 3.</b> Remoción de azul de metileno en distintas cantidades de ilmenita sin agitación magnética. OriginLab	55
<b>Gráfica 4.</b> Remoción de azul de metileno con diferentes tamaños de partícula de ilmenita 2g. OriginLab	57
<b>Gráfica 5.</b> Remoción de azul de metileno con 2g de ilmenita en discos de diferentes materiales. OriginLab	58
<b>Gráfica 6.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita sin tamizar y fondos en diferentes cantidades. OriginLab	59
<b>Gráfica 7.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita de 0.5g. OriginLab	60
<b>Gráfica 8.</b> Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 0.5g. OriginLab	61
<b>Gráfica 9.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita de 1g. OriginLab	62
<b>Gráfica 10.</b> Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 1g. OriginLab	62
<b>Gráfica 11.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita de 1.5g. OriginLab	63
<b>Gráfica 12.</b> Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 1.5g. OriginLab	64
<b>Gráfica 13.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita de 2g. OriginLab	64
<b>Gráfica 14.</b> Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 2g. OriginLab	65
<b>Gráfica 15.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita de 2.5g. OriginLab	65
<b>Gráfica 16.</b> Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 2.5g. OriginLab	66
<b>Gráfica 17.</b> Remoción de AM con discos de ilmenita de 3g. OriginLab	66
<b>Gráfica 18.</b> Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 3g. OriginLab	67
<b>Gráfica 19.</b> Remoción de AM en el reactor prototipo con diferentes cantidades de ilmenita en discos. OriginLab	73
<b>Gráfica 20.</b> Remoción de AM con 200g de ilmenita en el prototipo del reactor. OriginLab	74
<b>Gráfica 21.</b> Replica de remoción de AM con 200g de ilmenita	75

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición química de la Ilmenita y sus cantidades.	25
<b>Tabla 2.</b> Aberturas de las Mallas del tamiz.	34
<b>Tabla 3.</b> Estado de inicialización del programa	37
<b>Tabla 4.</b> Estado de llenado del programa.	37
<b>Tabla 5.</b> Estado de Degradación del programa	38
<b>Tabla 6.</b> Estado de vaciado del programa	38
<b>Tabla 7.</b> Estado de purga del programa	39
<b>Tabla 8.</b> Estado de configuración del programa	39
<b>Tabla 9.</b> Estado de parada de emergencia del programa	40
<b>Tabla 10.</b> Posición de los canales de generación en el programa como en la interfaz de potencia	42
<b>Tabla 11.</b> Posición de canales de adquisición en el dispositivo NI MyDAQ	42
<b>Tabla 12.</b> Porcentajes de remoción de azul de metileno con ilmenita agitada y sin agitar magnéticamente.	56
<b>Tabla 13.</b> Porcentajes de remoción de azul de metileno con ilmenita suspendida, diferentes tamaños de partícula.	57
<b>Tabla 14.</b> Porcentajes de remoción de azul de metileno con 2g de ilmenita con discos de ilmenita de diferentes materiales	58
<b>Tabla 15.</b> Puntajes para los diferentes materiales de discos de ilmenita.	59
<b>Tabla 16.</b> Porcentajes de remoción de azul de metileno para diferentes cantidades de ilmenita sin tamizar y fondos.	60
<b>Tabla 17.</b> Porcentajes de remoción de cada disco y cada uso.	67
<b>Tabla 18.</b> Porcentajes de remoción de las réplicas de cada disco y cada uso.	68
<b>Tabla 19</b> Porcentaje de remoción de AM en el reactor prototipo con diferentes cantidades de ilmenita.	74

## ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A</b> Certificado de origen	90
<b>Anexo B</b> Circuito de conexiones tarjeta de adquisición e interfaz de potencia	92
<b>Anexo C</b> Plano de reactor fotocatalítico descripción de piezas	93
<b>Anexo D</b> Plano de tapa led	94
<b>Anexo E</b> Plano de tapa disco	95
<b>Anexo F</b> Plano de junta torica	96
<b>Anexo G</b> Plano de base de disco	97
<b>Anexo H</b> Plano de cinta led	98
<b>Anexo I</b> Plano de bisagra parte 2	99
<b>Anexo J</b> Plano de pasador	100
<b>Anexo K</b> Plano de tornillo goloso 4.5M*10mm	101
<b>Anexo L</b> Plano de bisagra parte 1	102
<b>Anexo M</b> Plano de contenedor de disco 2	103
<b>Anexo N</b> Plano de contenedor de disco 1	104
<b>Anexo O</b> Plano de manguera	105
<b>Anexo P</b> Plano de depurador de Oxigeno	106
<b>Anexo Q</b> Plano de tapa base	107
<b>Anexo R</b> Plano de contenedor	108

## ABREVIACIONES

**AM:** Azul de metileno

**PPM:** Partes por millón.

**ST:** Sin Tamizar.

**F:** Fondos.

**N.A:** No aplica.



## UNIDADES

**eV:** unidad de medida de energía correspondiente a electronvoltio.

**g:** gramos.

**Ks/s:** cantidad de muestras que se puede obtener por cada canal de adquisición de datos en la MyDAQ.

**mAmp:** Unidad para medir la intensidad de corriente eléctrica. Mil veces más pequeño que la unidad internacional patrón el Amperio.

**mL:** mililitros.

**nm:** Nanómetros.

**mm:** Milímetros

**W:** watts

## GLOSARIO

**AZUL DE METILENO:** colorante de uso industrial, y en el campo de la medicina como antiséptico, posee una estructura compleja y es patrón de degradación en el grupo de Materiales Fotoactivos.

**BAND GAP:** espacio comprendido entre la banda de conducción y la banda de valencia, la cual permite el paso de electrones

**CICLO DE VIDA:** cantidad de veces que se puede usar algún objeto o dispositivo, hasta que pierda su utilidad o rendimiento adecuado.

**DEGRADACIÓN:** proceso de eliminación de algún compuesto o sustancia, mediante procesos químicos.

**ILMENITA:** mineral ampliamente usado en el campo de la fotocatalisis, débilmente magnético y fuente principal de obtención de dióxido de titanio.

**JUNTA TORICA (ORING):** empaque generalmente hecho en goma en forma de circunferencia, empleado normalmente para retención de líquidos.

**LabVIEW:** software de ingeniería diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware.<sup>1</sup>

**LENGUAJE G:** lenguaje de programación basado en gráficos, el cual permite una construcción sencilla de algoritmos.

**LEY DE LAMBERT-BEER:** relaciona la absorbancia y la concentración de una sustancia. Depende principalmente del tipo de sustancia, su concentración, y la distancia que la luz recorre.

**MÁQUINA DE ESTADOS:** tipos de programación la cual se basad en crear estados de operación y relacionarlos entre ellos mismos con el algoritmo o procedimiento a seguir.

**MyDAQ:** tarjeta de adquisición de datos fabricada por la empresa National Instruments enfocada al sector educativo, consta de 8 canales digitales y 2 analógicos.

**PEGADIT:** es un adhesivo especial instantáneo para la unión de gran variedad de materiales dando un pegue con unas propiedades y resistencias excelentes, hecho que lo hace apropiado para trabajos delicados, difíciles y rápidos; Soporta

---

<sup>1</sup> NATIONAL INSTRUMENTS. Learn Labview. [en línea] Disponible en [http://www.ni.com/academic/learn\\_labview/esa/](http://www.ni.com/academic/learn_labview/esa/)

temperaturas entre 30°C y 80°C, dependiendo de los sustratos; Resistente al agua, sistemas alcalinos, aceite y alcoholes.

**PROTOTIPO:** versión de prueba u ejemplar diseñado para demostración o pruebas experimentales.

**REACTOR:** dispositivo en el cual se lleva a cabo una reacción química en su interior, puede ser de diversos tamaños, materiales y formas.

**REMOCIÓN:** proceso de eliminación y/o adsorción de un compuesto.

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se realiza el diseño conceptual y construcción de un reactor fotocatalítico, para lo cual se desarrollan pruebas a escala laboratorio con capacidad de 25ml, donde se evalúan parámetros del semiconductor como tamaño de partícula, cantidad y disposición dentro del reactor; alcanzando una remoción de azul de metileno de 96,5% logrado con 2,5g de ilmenita sin tamizar contenida en discos, en un tiempo de una hora. Posteriormente se construye el reactor fotocatalítico en PVC, con capacidad de 1,2L, monitoreado y controlado con el software de ingeniería LabVIEW. Dicha programación se lleva a cabo mediante máquinas de estado, obteniendo siete estados para el reactor, correspondientes a: inicialización, llenado, degradación, vaciado, purga, configuración y finalmente parada de emergencia. Posterior a esto, se integra el sistema de control con el reactor y finalmente se determina el ciclo de vida del semiconductor de ilmenita contenida en discos. Haciendo un trabajo en equipo de ingeniería química y mecánica para llevar a cabo este proyecto en su totalidad, obteniendo resultados de remoción de azul de metileno en el reactor fotocatalítico de 91,2% en 2 horas y 10 minutos.

**Palabras clave:** Azul de metileno, Ilmenita, Reactor, LabVIEW, Degradación.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas actuales es la protección al medio ambiente, desencadenado en que hoy por hoy, a pesar de todos los avances tecnológicos, miles de seres humanos, especialmente niños mueren día a día por la falta de agua, o consumo de agua contaminada. En un reportaje de la UNICEF, destacan que cerca de 1.000 niños mueren cada día a causa de enfermedades asociadas con agua contaminada<sup>2</sup>. Debido al problema crítico relacionado con el manejo de residuos y contaminación del agua, la fotocatalisis heterogénea presenta una solución innovadora y eficaz, en el tratamiento de contaminantes y residuos de diferentes tipos<sup>3</sup>; mediante la excitación con luz de un material semiconductor, el cual genera radicales libres, quienes rompen los enlaces moleculares de las sustancias a tratar, reduciendo o eliminando su peligrosidad, haciendo de la fotocatalisis una alternativa de gran interés en la descontaminación de aguas<sup>4</sup>.

Este trabajo de grado se encuentra enmarcado en el proyecto general del grupo de investigación de Materiales Fotoactivos, gracias a sus estudios en descontaminación de agua y apoyándose en su filosofía de servicio, desea brindar una ayuda a una escuela de la primera infancia en condición vulnerable, donde no cuentan con los recursos para un tratamiento de descontaminación de aguas. Por lo cual el presente trabajo de grado diseña y construye un prototipo de reactor fotocatalítico, donde se realizan pruebas a escala laboratorio, para establecer los parámetros relacionados con el semiconductor, se trabajará con ilmenita por ser un mineral naturalmente dopado, de fácil acceso y económico;<sup>5</sup> evaluando tamaño de partícula, disposición de la ilmenita en el reactor y cantidad de usos bajo condiciones establecidas. Posteriormente se desarrolla el sistema de control, con el software LabVIEW, donde se integra software y hardware para brindar un sistema robusto y modular al reactor.

---

<sup>2</sup> UNICEF [en línea][citado el 13 de marzo 2018] Disponible en: <https://www.unicef.es/noticia/dia-mundial-del-agua-1000-ninos-mueren-cada-dia-por-falta-de-agua-potable>

<sup>3</sup> Gil, E., Cabrera M., y Jaramillo S. Fotooxidación del sistema cromo hexavalente -4-clorofenol Universidad Eafit, vol.39, julio-septiembre pag.60-75

<sup>4</sup> Garcés Giraldo, Luis Fernando, Mejía Franco, Edwin Alejandro, Santamaría Arango, Jorge Julián, La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación [en línea] 2004, 1 (junio) : [Citado: 3 de marzo de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013>> ISSN 1794-4449

<sup>5</sup> Mora C., y Murcia M. Evaluación De La Actividad fotocatalítica De La Ilmenita Modificada Con Ácido Sulfúrico Para La Degradación De Azul De Metileno. Bogotá, D. C.: Fundación Universidad de América, 2012.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Construir un reactor fotocatalítico monitoreado con LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita en la degradación de azul de metileno.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir los parámetros y requerimientos para el diseño conceptual del reactor.
- Construir el reactor según parámetros de diseño.
- Diseñar el software y hardware de control en el entorno de programación LabVIEW.
- Integrar el sistema de control con el reactor.
- Determinar el ciclo de vida del fotocatalizador de ilmenita en la degradación de azul de metileno.

## 1.FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se mencionan y definen los conceptos teóricos necesarios para el correcto desarrollo del presente trabajo de grado. Donde la ingeniería química y mecánica se complementan en un campo interdisciplinar, abarcando temas como la fotocatalisis, ilmenita, LabVIEW entre otros, como se muestra a continuación.

### 1.1 PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Los procesos avanzados de oxidación, también llamados tecnologías avanzadas de oxidación, son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, como por ejemplo el radical hidroxilo<sup>6</sup> el cual es altamente oxidante<sup>7</sup>, lo cual genera cambios profundos en la estructura de los contaminantes<sup>8</sup>. Los procesos avanzados de oxidación se dividen en procesos fotoquímicos, (foto-fenton, fotocatalisis heterogénea, fotólisis del agua, entre otros;) y no fotoquímicos (ozonización, oxidación electroquímica, descarga electrohidráulica, etc.)

---

<sup>6</sup> DOMÈNECH, Xavier; JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: Eliminación De Contaminantes Por Fotocatalisis Heterogénea. Cap. vol. 1,

<sup>7</sup> ARROYAVE Roja, J A; Garcés Giraldo, L F; Arango Ruiz, Á d J; Agudelo López, C M; (2008). La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. Revista lasallista de Investigación, 5() 20-27

<sup>8</sup> Garcés Giraldo, L F; Mejía Franco, E A; Santamaría Arango, J J; (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, 1() 83-92.

1.1.1 Fotocatálisis heterogénea. La fotocatalisis heterogénea presenta una ventaja considerable respecto a los demás procesos avanzados de oxidación, como lo es su no selectividad y la capacidad para degradar compuestos orgánicos,<sup>9</sup> así como su uso para tratar mezclas complejas de contaminantes<sup>10</sup>. El proceso se desarrolla gracias a la excitación de un semiconductor que absorbe energía radiante, ultravioleta o visible<sup>11</sup>, generando pares hueco-electrón<sup>12</sup> en la superficie del semiconductor. Posteriormente se producen radicales hidroxilos, los cuales rompen los enlaces moleculares de los contaminantes, reduciendo su grado de contaminación o peligrosidad<sup>13</sup>. Para poder llevar a cabo el proceso fotocatalítico, se necesita una fuente de luz, contaminante o sustancia a tratar, medio que se desea descontaminar, y una fuente de aireación.

## 1.2 AZUL DE METILENO

Es un colorante con aplicaciones industriales<sup>14</sup> <sup>15</sup> y solución patrón en el grupo de Materiales Fotoactivos para poder hacer comparaciones entre degradaciones. Se emplea el método de seguimiento por espectrofotometría, donde un rayo de luz pasa a través de una solución, midiendo la absorbancia de la solución a una longitud de onda específica<sup>16</sup>; tomando como punto de partida la Ley de Lambert-Beer, la cual relaciona directamente la absorbancia de una sustancia con su concentración y de esta manera poder determinar la concentración a lo largo del proceso fotocatalítico.

---

<sup>9</sup> 19 HERRAMANN, J.M. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatalisis heterogénea. UnisersitéCALude Bernard Lyon. p 156-157.

<sup>10</sup> J. Blanco, S. Malato, D. Bahnemann, D. Bockelman, D. Weichgrebe, F. Carmona y F. Martínez, Proceedings of 7th Inter. Symp. on Solar Thermal Conc. Tech., IVTAN Ed. ISBN 5-201-09540-2, 540-550, Moscow, Russia, (1994).

<sup>11</sup> LLANES, Carolay Yaneth Guarín y BENAVIDES, Adriana Consuelo Mera. Fotocatálisis heterogénea con TiO<sub>2</sub> para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. En: REVISTA INGENIERÍAS UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN. 2011.vol. 10, no. 19, p. 80-87

<sup>12</sup> N.S. Lewis, M.L. Rosenbluth (et al). Photocatalysis, Fundamentals and Applications. New York: 1989. p. Cap 3.

<sup>13</sup> ROSALES GARCÍA, José Alain. Materiales Para Fotocatálisis Y Electro fotocatalisis. Universidad Veracruzana, Región Coatzacoalcos-Minatitlán.: 2010. p. 3

<sup>14</sup> RAFATULLAH, M., SULAIMAN, O., HASHIM, R. & AHMAD, A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. En: Journal of hazardous materials. May 2010. Vol. 177, N°. 1-3. p. 70-80.

<sup>15</sup> DENG, H.; *et al.* Adsorption of methylene blue on adsorbent materials produced from cotton stalk. En: Chemical Engineering Journal. August 2011. Vol. 172, N°. 1. p. 326-334.

<sup>16</sup> HARRIS, Daniel. Fundamentos de espectrofotometría. Sexta Edición. Ed. Reverté. 2007. P 410



### 1.3 ILMENITA

Material débilmente magnético, semiconductor, es uno de los minerales más comunes de la corteza terrestre<sup>17</sup>. Su fórmula general es  $ATiO_3$  donde A representa mayormente hierro, y en pocas cantidades compuestos como óxido de zinc, magnesio, manganeso, cobalto, entre otros<sup>18</sup>, como se puede evidenciar en la tabla 1, donde se encuentra la composición química de la ilmenita y sus cantidades, mostrada a continuación:

**Tabla 1.** Composición química de la Ilmenita y sus cantidades.

Compuesto químico	Composición
Na <sub>2</sub> O	0.2
MgO	1.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0
SiO <sub>2</sub>	4.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.3
SO <sub>3</sub>	<0.1
K <sub>2</sub> O	0.1
CaO	0.5
TiO <sub>2</sub>	47.3
CrO <sub>3</sub>	0.1
MnO	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.6
ZnO	<0.1
ZrO <sub>2</sub>	0.1
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.1

Fuente: MATÍAS, Diógenes.  
Distribuidores de ilmenita.  
[Consultado: febrero 13 2018].  
Disponible en:  
<http://distribuidoresdeilmenita.com/>

<sup>17</sup> MEHDILO, Akbar; IRANNAJAD, Mehdi y REZAI, Bahram. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. En: MINERALS ENGINEERING. 2015.vol. 70, p. 64-76

<sup>18</sup> SÁENZ,Hermann. Ilmenita, mineral prometedor para purificar el agua. En: UN Periódico. No 151.

La ilmenita está conformada por capas de óxido de hierro (44,6%) y dióxido de titanio (47%)<sup>19</sup>. Gracias a su alto contenido en dióxido de titanio, la ilmenita es empleada como materia prima del dióxido de titanio<sup>20</sup>, donde se mezcla la ilmenita con ácidos fuertes y se obtiene hasta un 95% de dióxido de titanio<sup>21</sup>.

Tiene un Band Gap de 2.58-2.9eV<sup>22</sup>, por lo que absorbe luz visible<sup>23</sup>, “por lo cual la ilmenita presenta una doble acción catalítica”<sup>24</sup>. Es decir, por un lado, gracias al hierro contenido en su estructura se lleva a cabo el proceso de Fenton heterogéneo, y por el otro la fotocatalisis que se produce en las moléculas de hierro y titanio.

## 1.4 REACTORES FOTOCATÁLITICOS

Son reactores especializados para llevar a cabo en su interior el proceso de fotocatalisis, los cuales deben cumplir características específicas<sup>25</sup> tales como el caudal de la sustancia a tratar, la fuente de luz y la manera en que se va a dispersar, el suministro de aireación y su flujo dentro del reactor<sup>26</sup>. Y finalmente uno de los aspectos más importantes es el semiconductor: la cantidad, la

---

<sup>19</sup> MEHDILO, Akbar; IRANNAJAD, Mehdi y REZAI, Bahram. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. En: MINERALS ENGINEERING. 2015.vol. 70, p. 64-76

<sup>20</sup> TORRES LUNA, Juan Alberto; CARRIAZO, José Gregorio. Degradación Fotocatalítica del colorante Amarillo Reactivo 145 Empleando Estructuras de Fe(III)-TiO<sub>2</sub> Sintetizadas del Mineral Ilmenita. Revista Facultad de Ciencias Básicas, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 42-49, feb. 2017. ISSN 2500-5316.

<sup>21</sup> Mora C., y Murcia M. Evaluación De La Actividad fotocatalítica De La Ilmenita Modificada Con Ácido Sulfúrico Para La Degradación De Azul De Metileno. Bogotá, D. C.: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>22</sup> CHEN, YH. Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. En: Journal of non-crystalline solids. Enero, 2011, vol. 357, p. 136-139

<sup>23</sup> AMETHYST GALLERIES: MINERAL GALLERY. The Mineral Ilmenite [En línea]. Citado marzo 2018. Florida: Estados Unidos de América. Disponible en: <http://www.galleries.com/Ilmenite>

<sup>24</sup> CASAS, J.A., GARCÍA P., BAHAMON A., ZAZO J., RODRIGUEZ J; Procedimiento de eliminación de nitratos de aguas por reducción fotocatalítica. Octubre, 2017. Universidad Autónoma de Madrid.

<sup>25</sup> RUBIANO H., Claudia, LAGUNA C William., Zapata S. Carmen., Marin S Juan. "Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso". Gestión y Ambiente, vol. 8, no. 1, 2005, pp. 105-121. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

<sup>26</sup> C. Párraga, R. Espinel. Análisis de la actividad agrícola como contaminante del agua, alternativas tecnológicas para la desinfección del agua para consumo humano en comunidades rurales y recursos legislativos para la prevención y su conservación. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, 2009.

disposición de este dentro del reactor y la manera en que el semiconductor estará en contacto con la sustancia a tratar<sup>27</sup>, asegurando un contacto íntimo entre estos.

## 1.5 INSTRUMENTACIÓN CON INSTRUMENTOS VIRTUALES

LabVIEW es un entorno de programación y lenguaje gráfico o lenguaje G, creado por National Instruments con el fin de otorgar iconos a cambio de texto para crear aplicaciones, y permite entregar confiabilidad y facilidad al trabajar. LabVIEW se divide en dos partes las cuales son: el diagrama de bloques, donde va el desarrollo de programación y el panel frontal donde se crea interfaz usuario-máquina.<sup>28</sup>

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) es un lenguaje de programación que ayuda a científicos e ingenieros en la automatización e instrumentación de los experimentos. Este lenguaje está basado en la instrumentación virtual, lo que permite el empleo fácil en la adquisición de datos y el análisis de señales en minutos; además permite la conexión con distintos dispositivos y plataformas en hardware.<sup>29</sup>

1.5.1 Adquisición y Generación de Datos. El dispositivo de adquisición de datos NI MyDAQ de datos portátil, el cual es energizado por el puerto USB tiene la capacidad de combinar software con hardware lo que le permite que tenga 8 instrumentos listos para el uso como el generador de función, multímetro digital, entre otros.<sup>30</sup>

El dispositivo está constituido por 2 entradas análogas a 200 Ks/s y 16 bits, ocho entradas digitales y líneas de salida con una resolución de 32 bits las cuales toma dos valores 0V y 5V con una corriente de 4mAmp, cuenta con una línea de alimentación de 5V DC para el suministro de energía hasta de 1 Amperio. En la ilustración 1 se muestra el dispositivo de adquisición de datos NI MyDAQ.<sup>31</sup>

---

<sup>27</sup> Moctezuma, E., Zamarripa, H. y Leyva, E. Degradación fotocatalítica de soluciones de alta concentración de paraquat. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2003.19 (3): 117-125,

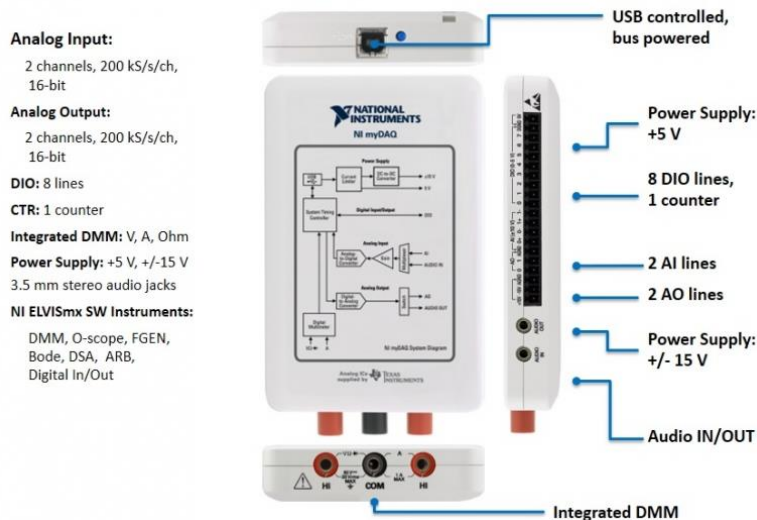
<sup>28</sup> BELEÑO A, Jeison . Adecuación de un reactor fotocatalítico para la Degradación de H<sub>2</sub>S en fase gaseosa con seguimiento en Labview. Bogota D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías,2017. 27p

<sup>29</sup> PONCE CRUZ, Pedro; DELA CUEVA, Víctor H. and PONSE ESPINOSA, Hiram. *Robótica aplicada con LabVIEW y LEGO*. 1st ed. Alfaomega Grupo Editor SA de C.V., Mexico, 2016. 63p

<sup>30</sup> Diseño e implementación de un oxímetro de pulso con LabVIEW y la NI MyDAQ. México D.F., Abril de 2015, No 55, Especial No2. ISSN: 2007-0411

<sup>31</sup> NATIONAL INSTRUMENTS. *Manuals. Specifications NI MyDAQ* [en línea]. Disponible en <http://www.ni.com/pdf/manuals/373061f.pdf>. 4p

## Ilustración 1. MyDAQ dispositivo de adquisición de datos



Fuente: National Instruments. Taking Circuit Concepts Beyond the Classroom with Multisim and NI MyDAQ. Obtenido de: <http://www.ni.com/tutorial/12268/es/>

## 1.6 TRANSDUCTORES

Un sensor es un dispositivo capaz de medir cantidades físicas y expresar esa información en una señal que pueda ser leída o interpretada por otro dispositivo o equipo de cómputo. En el mercado la mayoría de los sensores expresan las mediciones por medio de señales eléctricas.<sup>32</sup> Estas señales son manipuladas para así mantener el control de una variable física, como puede ser la temperatura, el desplazamiento, intensidad lumínica, entre otros.

Según la magnitud a medir son clasificados en los siguientes tipos:

- Sensores Resistivos.
- Sensor Capacitivos.
- Sensores Inductivos.
- Sensores Ópticos.
- Sensores Termoeléctricos.
- Sensores Ultrasónicos.<sup>33</sup>

<sup>32</sup> PONCE CRUZ, Pedro; DELA CUEVA, Victor H. and PONSE ESPINOSA, Hiram. Robótica aplicada con LabVIEW y LEGO. 1st ed. Alfaomega Grupo Editor SA de C.V., Mexico, 2016. 7-11p

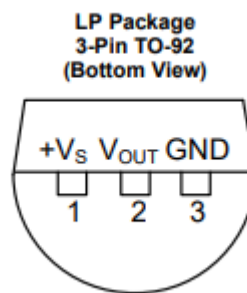
<sup>33</sup> APPEL, Kenneth; GASTINNEAU, Jhon E; BAKKEN, Clarence; VERNIER, David. Physics with Computers, Vernier software. USA. 1998. 10-13p.

1.6.1 Sensor de temperatura LM35. El dispositivo de medición de temperatura es un circuito integrado denominado LM35, tiene la característica de no necesitar una calibración para realizar el funcionamiento, posee la particularidad que la temperatura que mide es proporcional linealmente a la tensión de salida.

El sensor LM35 posee un rango de trabajo de 0 a 100 °C, con una de alimentación de 4 a 20V y una salida de 0 a + 10mV/°C, con esto dando un bajo consumo energético y viables para aplicaciones que posean poca resolución al momento de realizar la medida.

Su configuración lo vuelve uno de los sensores más cómodos. La ilustración 2 indica, cual es el polo a tierra, el positivo y el negativo, para conectarlo de manera adecuada, tal como se muestra a continuación:<sup>34</sup>

**Ilustración 2.** Sensor LM35 configuración de pines



Fuente: Electrónica Caldas.  
LM35 Precision Centigrade  
Temperature Sensors  
Obtenido de:  
[http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/LM35\\_TI.pdf](http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/LM35_TI.pdf)

1.6.2 Sensor de nivel. El sensor de nivel se caracteriza porque cambia su resistencia con base a la variación de altura del fluido dentro de un tanque u otro recipiente. Generalmente, este tipo de sensor funciona como alarma, indicando un sobre llenado, o al contrario una alarma de nivel bajo. Los sensores de nivel continuos son más sofisticados y pueden realizar el seguimiento del nivel de todo un sistema. Este tipo de sensores poseen una salida análoga que se correlaciona directamente con el nivel del recipiente.

---

<sup>34</sup> TEXAS INSTRUMENT. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Diciembre de 2017, 1-25p

Los sensores de nivel se dividen en 4 tipos diferentes, de esa forma también la forma de medición del sensor:

- Potenciómetro o interruptores de flotador
- Sensor de nivel ultrasónico sin contacto
- Sensor de nivel ultrasónico de contacto
- Sensor de nivel por capacitancia<sup>35</sup>

---

<sup>35</sup> OMEGA, Sensor de nivel, ¿Qué es un sensor de nivel? [en línea] Disponible en <https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>

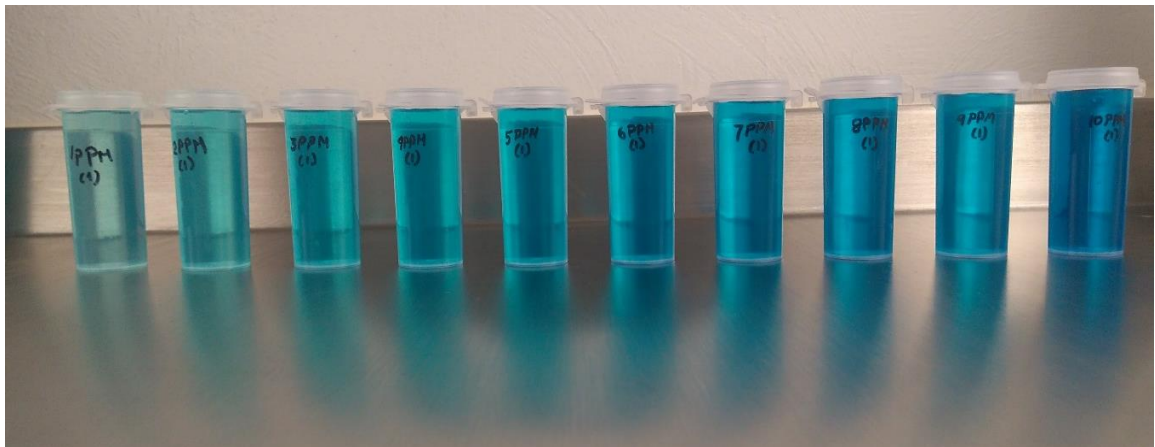
## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el desarrollo experimental, necesarios para el desarrollo de este proyecto. Se realizaron experimentaciones en un reactor a escala laboratorio con capacidad de 25mL; y en el prototipo del reactor con capacidad de 1.2 litros; donde se tomaron en cuenta aspectos como la disposición dentro del reactor, el tamaño de partícula de la ilmenita, agitación magnética, la cantidad de ilmenita empleada para la remoción de azul de metileno, entre otros.

### 2.1 CURVA DE CALIBRACIÓN DE AZUL DE METILENO

Se realiza una curva de calibración, aplicando el método de Lambert-Beer donde se relaciona la absorbancia con la concentración, esto con el fin de cuantificar la remoción de azul de metileno a lo largo de las pruebas realizadas. Se utiliza un espectrofotómetro Spectrocuant Prove 300 para realizar las medidas, empleando una longitud de onda de 665nm<sup>36</sup>. En la ilustración 3, se muestra una imagen de las soluciones desde 1ppm hasta 10ppm. Posteriormente en la gráfica 1, se observa la curva obtenida, la ecuación de la recta y el coeficiente de relación correspondiente:

**Ilustración 3.** Curva de calibración

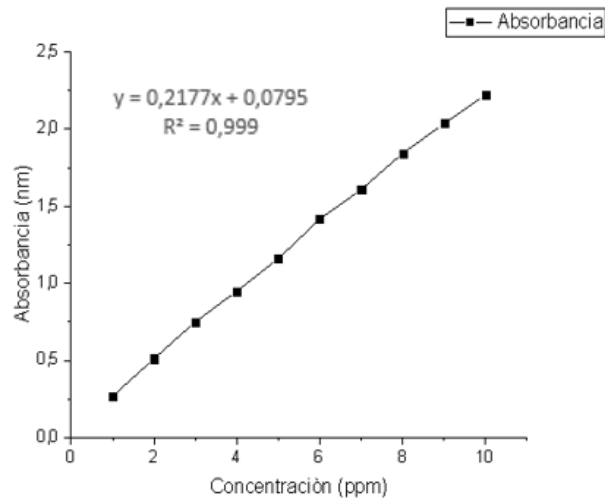


Fuente: Elaboración propia.

---

<sup>36</sup> ROSAS, José. Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes. Trabajo de maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo Leon. 2012, p.4

**Gráfica 1.** Curva de calibración de azul de metileno.  
OriginLab.



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para calcular el porcentaje de remoción de azul de metileno se encuentra expresado en la ecuación 1.

**Ecuación 1.** % de Remoción de AM.

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} * 100$$

## 2.2 REACTOR ESCALA LABORATORIO

Se realizan pruebas en un reactor a escala laboratorio con el fin de establecer si es viable escalar el proceso actual al prototipo del reactor, donde se evalúan diferentes parámetros como la cantidad de ilmenita y la disposición de esta dentro del reactor.

2.2.1 Ilmenita. La ilmenita es el semiconductor que se utiliza en el proceso fotocatalítico, algunos estudios indican que este material debe activarse térmicamente o modificarse químicamente para obtener porcentajes de degradación iguales o superiores al dióxido de titanio. No obstante, investigaciones realizadas por el grupo de Materiales Fotoactivos, realizadas con ilmenita de origen nacional, indican que no es necesario activar la ilmenita térmicamente, ni modificarla, pues la ilmenita por si sola tiene porcentajes de degradación considerablemente altos.



En el grupo de Materiales Fotoactivos, se han realizado 13 tesis (Disponibles en la base de datos de la Fundación Universidad de América.) empleando como semiconductor la ilmenita. Analizando dichas tesis se encontró para la modificación química, 9 de las 13 tesis concluyen que es mejor la ilmenita sin modificar químicamente, alcanzando porcentajes de degradación hasta del 98,8% como es el caso de la tesis titulada diseño conceptual y construcción de un reactor de bajo costo utilizando  $\text{TiO}_2$  soportado en PVC, además la modificación química es un proceso costoso y con un riesgo considerable pues se emplea ácido sulfúrico concentrado.

Por otro lado, analizando la modificación térmica, 7 de las 13 tesis no activaron térmicamente la ilmenita alcanzando un porcentaje de 92.4% registrado en la tesis devaluación del diseño de un fotorreactor cilindro-parabólico híbrido con seguimiento para la degradación de azul de metileno por medio de fotocatalisis heterogénea. Tomando en cuenta los trabajos de investigación desarrollados en el grupo (disponibles en las bases de datos de la Fundación Universidad América.) se decide que la mejor opción es no activar la ilmenita térmicamente ni modificarla químicamente.

Para este trabajo de grado se empleó ilmenita extraída de la mina de aluvión de Barbacoas Nariño. Ver anexos A para certificado de origen. Donde posteriormente se trabaja con la ilmenita en forma suspendida y en discos dentro del reactor.

2.2.1.1 Ilmenita suspendida. Se evalúa ilmenita suspendida en el reactor a escala laboratorio con el fin de tener un área de contacto mayor entre el semiconductor y el azul de metileno, favoreciendo el proceso fotocatalítico. Adicionalmente se evalúan posibles aspectos para la disposición de la ilmenita en el reactor prototipo.

- Agitación magnética. Se realizaron experimentos con diferentes cantidades de ilmenita suspendida con agitación magnética y sin agitación magnética, para observar si era un parámetro fundamental durante el proceso.
- Tamaños de partícula. Para determinar si el tamaño de partícula influye en el proceso, se realizaron experimentos con ilmenita sin tamizar e ilmenita tamizada. La ilmenita sin tamizar proveniente del municipio de Barbacoas, de la empresa Minerales Colombianos; e ilmenita de diferentes tamaños de partícula, tomada del grupo de Materiales Fotoactivos. En la tabla 2, se muestran las mallas del tamiz y la abertura en nm correspondiente a cada malla utilizada:

**Tabla 2.** Aberturas de las Mallas del tamiz.

Mallas	Abertura (nm)
80	180
100	150
120	125
140	106
Fondos	88
Sin tamizar	No determinado

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.2 Discos de ilmenita. Con el fin de tener una manera fácil y rápida para disponer la ilmenita en cuanto su uso, se realizaron discos mediante una junta tórica (o-ring), silicona para unir las piezas y tres tipos diferentes de materiales para cubrir el o-ring, tal como se muestra en la ilustración 4. Dichos materiales se escogieron con características tales que fueran resistentes, de fácil acceso y manejo, además económicos; para que permitieran una buena interacción entre el semiconductor y el azul de metileno.

**Ilustración 4.** Disco que contiene el material fotocatalítico. SolidEdge ST 10



Fuente: Elaboración propia.

Se realizan pruebas para establecer cuál era el mejor material, para la construcción de los discos. Se escoge entre filtro para café, tela lienzo y tela quirúrgica, estableciendo una figura de mérito como se muestra en la ecuación 2 la cual promedia características que se consideran importantes en cada material, como el acceso, el manejo, la economía, entre otros. Permitiendo obtener un puntaje para cada uno y de esta manera seleccionar el material con el puntaje más alto.

## Ecuación 2. Figura de mérito.

$$m = (0.2v) + (0.2w) + (0.2x) + (0.2y) + (0.2z)$$

Donde:

*m*: Puntaje de mérito.

*v*: Resistencia del material

*w*: Acceso

*x*: Manejo.

*y*: Economía.

*z*: Interacción del material en la reacción.

Asignando a cada variable un puntaje de 1 a 5; donde 1 es deficiente, 2 es malo, 3 es regular, 4 es bueno y finalmente 5 es excelente.

## 2.3 MONITOREO CON LabVIEW

En esta sección se explica cómo se desarrolló el sistema de control, conformado por el software y el hardware. Se detalla la realización del software, empleando LabVIEW, mediante 7 máquinas de estado, se describe cada una y se muestra como están conectadas una con otra. Posteriormente que instrumentos se emplearon para el hardware y la manera cómo van conectados en el dispositivo de NI MyDAQ.

2.3.1 Elaboración de software y ensamblaje de hardware de control. Para el desarrollo del programa usando el lenguaje G se usó el entorno de programación de LabVIEW, con ello elementos de interfaz de potencia, sensor LM35, sensor de luz, potenciómetro, final de carrera y el dispositivo de adquisición de datos NI MyDAQ

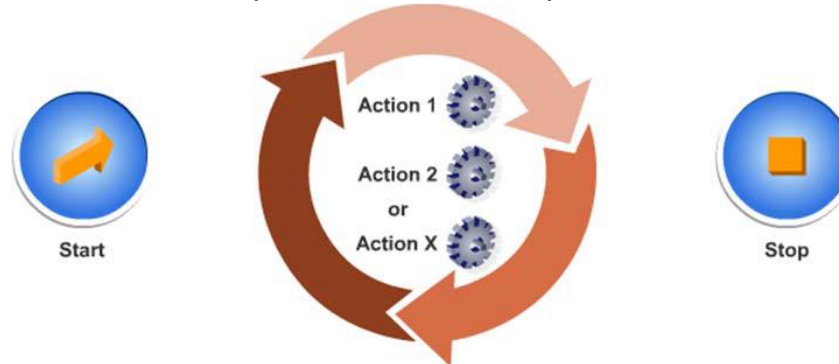
2.3.1.1 Estructura de programación. La estructura de programación en la que se basa este programa es máquina de estados, puesto que este tipo de programación ayuda que sea escalable.

La ilustración 5 muestra el patrón de la máquina de estados, el cual tiene una fase de arranque y cierre. La aplicación principal ejecuta un código diferente cada vez que se ejecuta el bucle, dependiendo de alguna condición.<sup>37</sup>

---

<sup>37</sup> NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW™ Core 2 Participant Guide, Austin, USA. Course Software Version 2014, 55p

### Ilustración 5. Operación de una máquina de estados



Fuente: LabVIEW Core 2 Participant Guide, Course software Version 2014, 55p

Los estados del programa empleado para el reactor prototipo son 7 los cuales generan el control del reactor:

- Inicialización
- Llenado
- Degradación
- Vaciado
- Expulsión de muestra
- Configuración
- Parada de emergencia

Una vez completada la función del estado pasa automáticamente al proceso siguiente, este proceso se puede interrumpir con el aviso que arroja el programa retornando al estado de inicialización.

Una vez instalado el programa se inicia haciendo una evaluación de funcionamiento a los actuadores y sensores que tienen, este proceso se hace en el estado de configuración, eso solo se ejecuta una sola vez de forma automática, para regresar a ese estado se puede de forma manual o porque se ha cumplido el ciclo de vida del material fotocatalítico. Los estados anteriormente mencionados, operan en el programa como se muestra en las tablas a continuación.

El primer estado del programa es el de inicialización, el cual está para la obtención de datos del usuario, tiene la opción de selección del material fotocatalítico a usar, y el tiempo de reacción que se desea. En la tabla 3 se indica que sistemas, sensores y válvulas están habilitados en este estado. Se tiene la opción de selección del material fotocatalítico dado que el presente proyecto se encuentra enmarcado en el proyecto general del grupo de Materiales Fotoactivos titulado "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN FOTOREACTOR OPERADO CON LUZ VISIBLE PARA EL TRATAMIENTO MICROBIOLÓGICO DE AGUAS EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN BERNARDO, CORREGIMIENTO 12, IBAGUÉ- TOLIMA ", donde se emplean semiconductores diferentes a la ilmenita,

lo cual no se contempla en este proyecto. Los siguientes estados de funcionamiento se ven esquematizados en la ilustración 6.

**Tabla 3.** Estado de inicialización del programa  
Inicialización

Válvula de admisión	Deshabilitado
Válvula de escape	Deshabilitado
Válvula de purga	Deshabilitado
Sistema de iluminación	Deshabilitado
Sistema de agitación	Deshabilitado
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Deshabilitado
Sensor de luz	Deshabilitado
Sensor de nivel	Deshabilitado

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente es el estado llenado, se realiza de forma implícita, puesto que se da apertura a la válvula de admisión hasta que el sensor arroje el nivel requerido, tal como se evidencia en la tabla 4. Posteriormente pasa de forma automática al proceso de degradación a menos que el usuario cancele el salto a este estado. (Véase la sección 1.6 Transductores)

**Tabla 4.** Estado de llenado del programa.  
Llenado

Válvula de admisión	Habilitado
Válvula de escape	Deshabilitado
Válvula de purga	Deshabilitado
Sistema de iluminación	Deshabilitado
Sistema de agitación	Deshabilitado
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Deshabilitado
Sensor de luz	Deshabilitado
Sensor de nivel	Habilitado

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se encuentra el estado de degradación, es el que tiene más duración en el programa, por tanto, los sistemas de agitación y de iluminación deben estar encendidos para realizar el proceso, tal como se muestra en la tabla 5, además se hace un seguimiento a la temperatura del proceso puesto que si supera los 30°C el proceso fotocatalítico se puede ver afectado. (Véase sección 1.6.1 Sensor de temperatura LM35). Una vez finalizado este proceso pasa al estado de vaciado.

**Tabla 5.** Estado de Degradación del programa  
Degradación

Válvula de admisión	Deshabilitado
Válvula de escape	Deshabilitado
Válvula de purga	Deshabilitado
Sistema de iluminación	Habilitado
Sistema de agitación	Habilitado
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Habilitado
Sensor de luz	Habilitado
Sensor de nivel	Deshabilitado

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente estado es vaciado, proceso se realiza en forma automática como lo muestra la tabla 6, donde solo está habilitada la válvula de escape, el sistema de apertura y el sensor de nivel; puesto que la válvula de escape se abre para dar salida al fluido y este llegue a un tanque de almacenamiento. Una vez completado el proceso retorna al estado de llenado para iniciar de nuevo con el proceso de degradación completando el siguiente ciclo de vida del fotocatalizador. (Véase la sección 1.6 Transductores)

**Tabla 6.** Estado de vaciado del programa  
Vaciado

Válvula de admisión	Deshabilitado
Válvula de escape	Habilitado
Válvula de purga	Deshabilitado
Sistema de iluminación	Deshabilitado
Sistema de agitación	Deshabilitado
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Deshabilitado
Sensor de luz	Deshabilitado
Sensor de nivel	Habilitado

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de expulsión de muestra (purga) se activa a voluntad del usuario y es notificado de la acción realizada, una vez en este proceso se da por hecho que el lote de agua a tratar tiene algún problema y por ello se envía al proceso de configuración para realizar un test de actuadores y el cambio del material fotocatalítico. Tal como se observa en la tabla 7 para el estado de purga solo está habilitada la válvula de purga, el sistema de apertura y el sensor de nivel. (Véase la sección 1.6 Transductores)

**Tabla 7.** Estado de purga del programa  
Expulsión de muestra

Válvula de admisión	Deshabilitado
Válvula de escape	Deshabilitado
Válvula de purga	Habilitado
Sistema de iluminación	Deshabilitado
Sistema de agitación	Deshabilitado
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Deshabilitado
Sensor de luz	Deshabilitado
Sensor de nivel	Habilitado

Fuente: Elaboración propia.

Estado de configuración es para realizar los ajustes necesarios para el mejor funcionamiento del reactor. Con ello se realizan pruebas a los sensores, actuadores e interfaz de potencia, para que estén cumpliendo con su objetivo, tal como se muestra en la tabla 8. Una vez que todos los dispositivos que controlan el reactor estén en orden pasa al estado de inicialización. (Véase la sección 1.6 Transductores)

**Tabla 8.** Estado de configuración del programa  
Configuración

Válvula de admisión	Prueba de funcionamiento
Válvula de escape	Prueba de funcionamiento
Válvula de purga	Prueba de funcionamiento
Sistema de iluminación	Prueba de funcionamiento
Sistema de agitación	Prueba de funcionamiento
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Deshabilitado
Sensor de luz	Habilitado
Sensor de nivel	Habilitado

Fuente: Elaboración propia.

El estado de parada de emergencia se llega por medio de fallos, si hay una apertura en la tapa del reactor, alta temperatura o se oprime el botón de emergencia, se deshabilitan todos actuadores para no causar daños a terceros o al mismo reactor, como se puede observar en la tabla 9 mostrada a continuación:

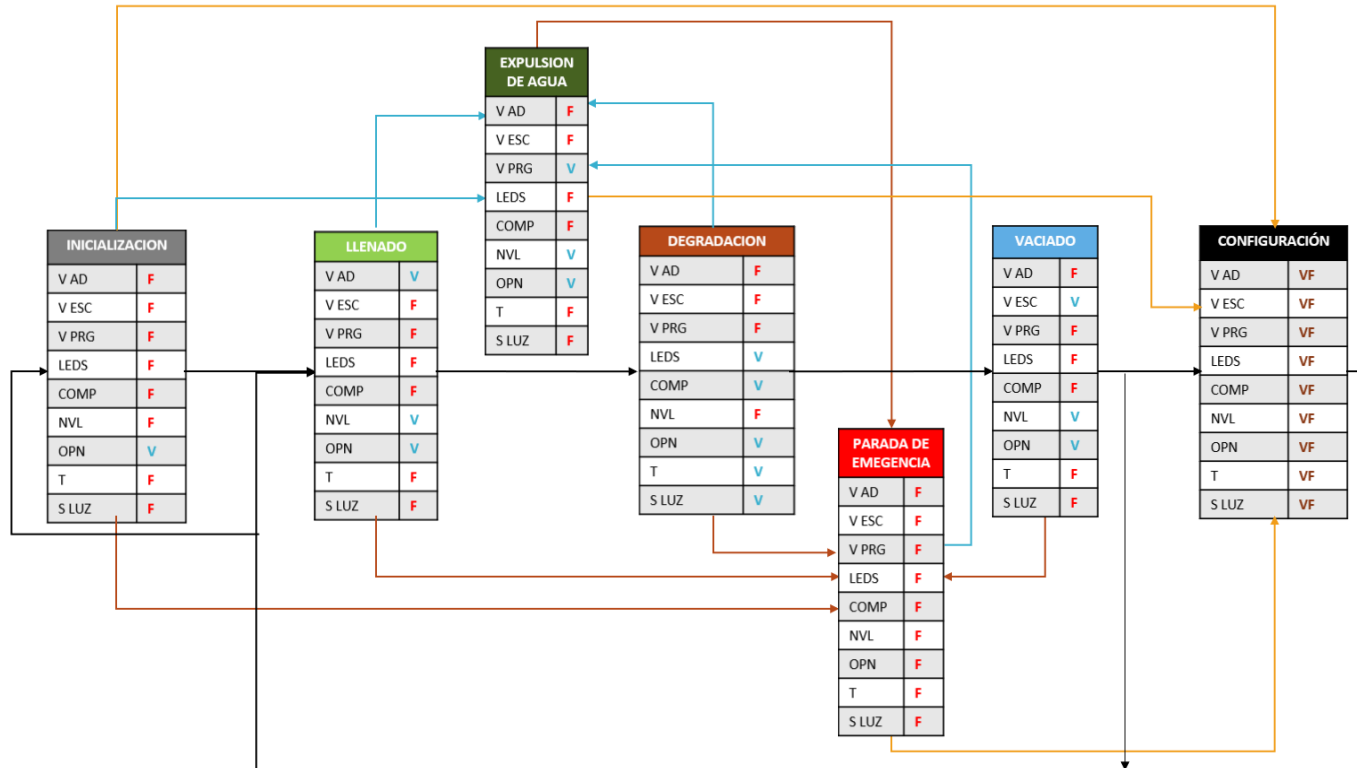
**Tabla 9.** Estado de parada de emergencia del programa

Parada de emergencia	
Válvula de admisión	Deshabilitado
Válvula de escape	Deshabilitado
Válvula de purga	Deshabilitado
Sistema de iluminación	Deshabilitado
Sistema de agitación	Deshabilitado
Sistema de apertura	Habilitado
Sensor de temperatura	Deshabilitado
Sensor de luz	Habilitado
Sensor de nivel	Habilitado

Fuente: Elaboración propia.



**Ilustración 6.** Esquema de funcionamiento del programa. Microsoft Visio 2013



Fuente: Elaboración propia.

La ilustración 6 muestra cómo es el funcionamiento del programa. Las flechas negras indican el comportamiento ordinario sin ninguna eventualidad, las flechas azules muestran de qué estados se puede ir al estado de expulsión de agua, teniendo en eso las flechas de color rojo que nos llevan al estado de parada de emergencia sin importar el estado, para poder salir de este estado de emergencia se debe ir al estado de configuración del reactor y verificar que todos los actuadores están en orden.

2.3.1.2 Generación de datos digitales. En esta sección se describe la conexión de cada canal digital de salida en el dispositivo NI MyDAQ con cada actuador, como las válvulas, el sistema de iluminación y el compresor, con la interfaz de potencia y finalmente el color asignado a cada conexión, tal como lo especifica la tabla 10 mostrada a continuación:

**Tabla 10.** Posición de los canales de generación en el programa como en la interfaz de potencia

<b>Elemento</b>	<b># en relé</b>	<b>Canal</b>	<b>Posición</b>	<b>Color</b>
Válvula de admisión	3	Digital 0	Salida	Blanco
Válvula de escape	4	Digital 3	Salida	Azul
Válvula de purga	5	Digital 7	Salida	Café
Sistema de iluminación	1	Digital 1	Salida	Gris
Compresor	2	Digital 2	Salida	Morado

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.3 Adquisición de datos digitales y análogos. La tabla 11 muestra la posición de los elementos de adquisición de datos, como son los sensores de posición, temperatura, luz y finalmente el botón de emergencia; los cuales están monitoreando el sistema para cualquier eventualidad.

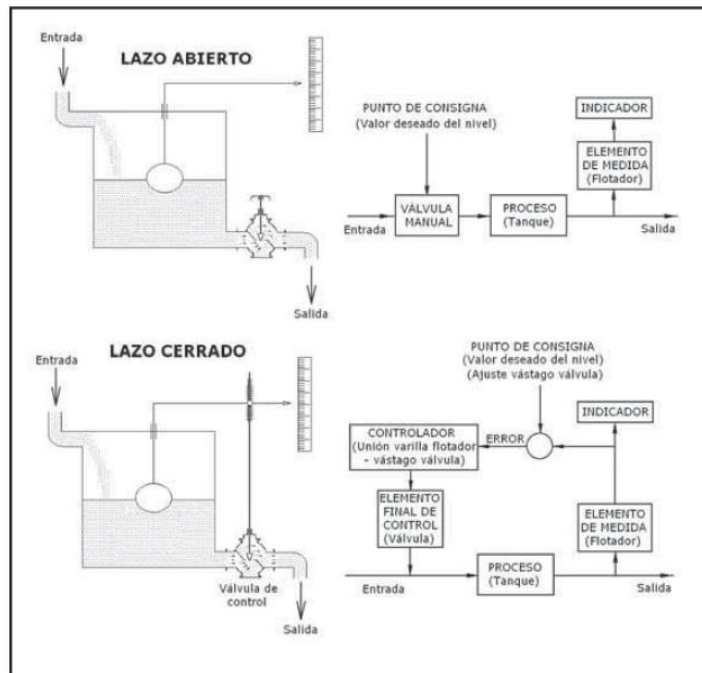
**Tabla 11.** Posición de canales de adquisición en el dispositivo NI MyDAQ

<b>Elemento</b>	<b># en relé</b>	<b>Canal</b>	<b>Posición</b>	<b>Color</b>
Sensor de nivel	N/A	Análogo 0	Entrada	Rojo
Sistema de apertura	N/A	Digital 4	Entrada	Verde
Sensor de temperatura	N/A	Análogo 1	Entrada	Rojo
Botón de emergencia	N/A	Digital 5	Entrada	Amarillo
Sensor de luz	N/A	Digital 6	Entrada	Naranja

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4 Lazo de control. En la ilustración 7 se muestra como es la operación de un lazo de control abierto y un lazo de control cerrado con un breve ejemplo. En el presente proyecto de grado, se emplea un lazo de control cerrado, debido a corrección en la variable de volumen y un lazo de control abierto para las variables como el ciclo de vida y la temperatura, a razón de que en estos dos aspectos se realiza un monitoreo y no un control, debido que al controlarlos se necesitan equipos de refrigeración y esto incrementa el costo y no es una de las variables poco probables a cambiar.

**Ilustración 7. Lazos de control**



Fuente: Creus, Antonio. Instrumentación industrial, 8 ed. 2 p

Un sistema de control que permite el mantenimiento de variables se define como aquel que realiza un proceso comparativo, o la condición a controlar sin que se realice una intervención humana<sup>38</sup>, por tanto, el sistema que permite el paso del fluido siempre se está comparando para así realizar el estado de llenado y de igual forma en el estado de vaciado, y siendo el volumen la variable que manipula el lazo de control.

<sup>38</sup> CREUS, Antonio, Instrumentación industrial, 8ed, Barcelona- España, Alfaomega Grupo Editor 1p. ISBN 978-84-267-1668-2

## 2.4 DISEÑO DE REACTOR

En este reactor se realiza partiendo de resultados obtenidos en experimentación los reactores a escala laboratorio, donde se hace una prueba con diferentes cantidades de ilmenita en discos para establecer la cantidad adecuada, se escoge una cantidad específica y con esta se hacen reutilizaciones para evaluar su ciclo de vida y se realiza una réplica.

Por las condiciones donde se trabajará el reactor no se considera un reactor abierto, puesto que al estar a la intemperie se expone la muestra a contaminantes de tipo orgánico, inorgánico y de tipo microbiológico que pueden estar dispersos en el aire, por lo cual el diseño es centrado a un reactor cerrado para evitar dichos contaminantes. Adicionalmente no se realiza la experimentación con luz solar dado que presenta un tiempo de radiación limitado, además la radiación solar no es continua y constante durante el día, lo que afecta el proceso de degradación alargando los tiempos.

2.4.1 Parámetros de diseño. En esta sección se indican los parámetros del diseño del reactor, donde se tienen en cuenta aspectos como luz, aireación, volumen, fotocatalizador y geometría, explicadas brevemente. Adicional a esto se mencionan los proyectos de investigación tomados del grupo de investigación de Materiales Fotoactivos (disponibles en la base de datos de la universidad), que contienen información importante acerca de los parámetros mencionados.

2.4.1.1 Luz. Uno de los parámetros primordiales para hacer el proceso de degradación como se hace referencia en el numeral 1.1.1 Fotocatálisis heterogénea, en este explica cómo es la generación de los radicales libres a partir de la excitación del semiconductor con fotones. En el trabajo de grado “EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN FOTORREACTOR HÍBRIDO Y PORTÁTIL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA QUEBRADA SANTA ISABEL”, el cual explica cómo se controla la variable lumínica, y el arreglo de LED’s adecuado para instalar en el reactor.

Este es una de las variables que ya se han trabajado en la experimentación en grupo de materiales fotoactivos, como lo menciona el trabajo de grado titulado “DISEÑO CONCEPTUAL Y CONSTRUCCIÓN DE UN FOTORREACTOR DE BAJO COSTO UTILIZANDO TiO<sub>2</sub> SOPORTADO EN PVC” el cual especifica este parámetro, utilizando de alta potencia de 5W.

2.4.1.2 Aireación. La variable de aireación se ve determinada en el trabajo de grado titulado “DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FOTO-REACTOR AGITADO CON AIRE EN PRESENCIA DE ILMENITA PARA LA DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO” donde dan los parámetros de aireación por medio de una bomba de aire de pulsos, con ello se produce una agitación lo que ayuda a que el proceso mejor.

2.4.1.3 Volumen. La cantidad de líquido se calcula por medio de la población estudiantil del colegio San Bernardo del corregimiento 12 de Ibagué, las personas que se encuentran en este recinto académico son aproximadamente de 300 personas, dichas personas están en la institución aproximadamente 12 horas.

El consumo de agua por una persona al día es de 2 litros<sup>39</sup>, por tanto, se realiza el siguiente calculo mostrado en la ecuación 3.

**Ecuación 3** Consumo de agua estimado.

$$\frac{2 \text{ lt de } H_2O / \text{ persona}}{24 \text{ horas}} * 12 \text{ horas} * 300 \text{ persona} = 300 \text{ lt de } H_2O$$

Por consecuente se requiere que el equipo tenga características modulares y escalable, teniendo así la capacidad que se pueda usar un solo modulo para la experimentación del presente trabajo.

4.1.4 Contaminante o sustancia a tratar. En el grupo de Materiales Fotoactivos se han trabajado diferentes tipos de contaminantes, para poder realizar una comparación para los porcentajes de remoción entre los diferentes proyectos de grado, se emplea azul de metileno como sustancia patrón a remover, además de los demás contaminantes. El presente proyecto de grado solo se compromete a remover azul de metileno, tal como se muestra en la delimitación del anteproyecto.

2.4.1.5 Agua. Es la sustancia que se desea tratar mediante el proceso de fotocatalisis. Se realiza una solución de azul de metileno y agua destilada, la cual se deposita en el reactor para la remoción de azul de metileno.

---

<sup>39</sup> El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo; La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales, pg 32

2.4.1.6 Geometría. Siguiendo los parámetros del ya preestablecidos en los trabajos de grado anteriormente mencionados, la geometría que se usada es circular con forma de tubo, como lo son los reactores a escala laboratorio. La cual permite que el material semiconductor tenga una exposición mejor a la luz una óptima agitación y aireación.

2.4.1.7 Fotocatalizador. En el grupo de Materiales Fotoactivos, emplea dos semiconductores en sus investigaciones, el dióxido de titanio y la ilmenita. En este proyecto el fotocatalizador empleado es la ilmenita, un mineral semiconductor, (Véase sección 2.2.1 ilmenita).

- Disposición del fotocatalizador. Otro de los parámetros, es la disposición que tendrá el fotocatalizador dentro del reactor. En este proyecto se realizan experimentos con ilmenita suspendida, e ilmenita contenida en discos. (Véase sección 2.2.1.1 ilmenita suspendida y sección 2.2.1.2 ilmenita en discos).
- Tamaño de Partícula. Se busca determinar si el tamaño de partícula es un parámetro influyente en el proceso fotocatalítico, por lo cual se utiliza ilmenita sin tamizar e ilmenita tamizada, correspondiente a las mallas del tamiz 80,100, 120, 140 y fondos del tamiz. (Véase sección 2.2.1.1 tamaños de partícula y la sección 3.1.1.2 tamaño de partícula para visualizar los resultados dados.)
- Cantidad. En este proyecto también se evalúa la cantidad de la ilmenita, en el reactor a escala laboratorio y en el reactor prototipo, para determinar si este parámetro tiene algún tipo de influencia en el proceso. De acuerdo a la experimentación para los reactores a escala laboratorio mostrada en la sección 3.1.2 Discos de ilmenita, se establece que es un parámetro importante, de igual manera en el reactor prototipo mostrada en sección 3.3.1 cantidad de ilmenita.

2.4.2 Requerimientos. Son las características que se deben conseguir al momento de diseñar una maquina o dispositivo, puesto que, con estos conceptos, y los cuales fueron primordiales para el desarrollo del proyecto.

2.4.2.1 Robustez. Al usar esta característica física con la que cuenta el reactor por ello, los materiales empleados en la construcción del reactor son de un espesor considerable como se nombra en el numeral 2.4.1. Lo que convierte al proyecto resistente a la intemperie y a golpes, debido a que el reactor estará en ese ambiente al ser instalado en la escuela.

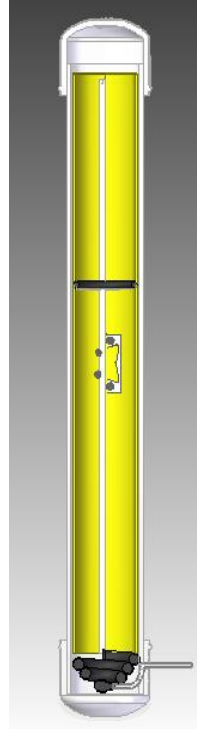
2.4.2.2 Materiales de fácil adquisición. Al usar materiales que sean de fácil adquisición, da la posibilidad a los usuarios que puedan conseguir los elementos de construcción en una gran variedad de lugares como ferretería, tiendas de lamparas, entre otras. Lo que le da al proyecto la capacidad de tener siempre repuestos a disposición y económicos para los usuarios.

2.4.2.3 Ensamble sencillo. Con conocimientos básicos en plomería o tubería que puedan unir las piezas que diseñaron, no necesita elementos y/o herramientas extrañas para poder el proceso de ensamblaje, las piezas poseen un sistema anti tonto, lo cual no permite que error en el proceso.

2.4.2.4 Uso de la interfaz National instruments. Se usa este tipo de interfaz de adquisición de datos, debido a que es del mismo creador del lenguaje G, este tipo de interfaz permite tener una fuente de alimentación de 5 voltios la cual se usa para la alimentación de los sensores y a la interfaz de potencia para lo actuadores.

2.4.3 Estructuras. Para la estructura del reactor se diseña de tal forma que la luz pueda irradiar cada parte del semiconductor, adicional se busca que el reactor tenga una oxigenación lo más homogénea posible para que pueda realizar todo el proceso de degradación. Por tanto, se selecciona una geometría circular para realizar el proceso degradativo en forma de tubo, mediante dos estructuras una interna y otra externa, la externa para contener el líquido que se va a degradar y la interna para mantener los discos que contienen el material fotocatalítico fijos en el reactor; tal como lo muestra la ilustración 8 realizada en el programa Solid Edge ST10. Posteriormente se muestra el control realizado por medio de una interfaz de potencia y de la NI MyDAQ.

**Ilustración 8.** Estructura del reactor prototipo.  
Solidedge ST10

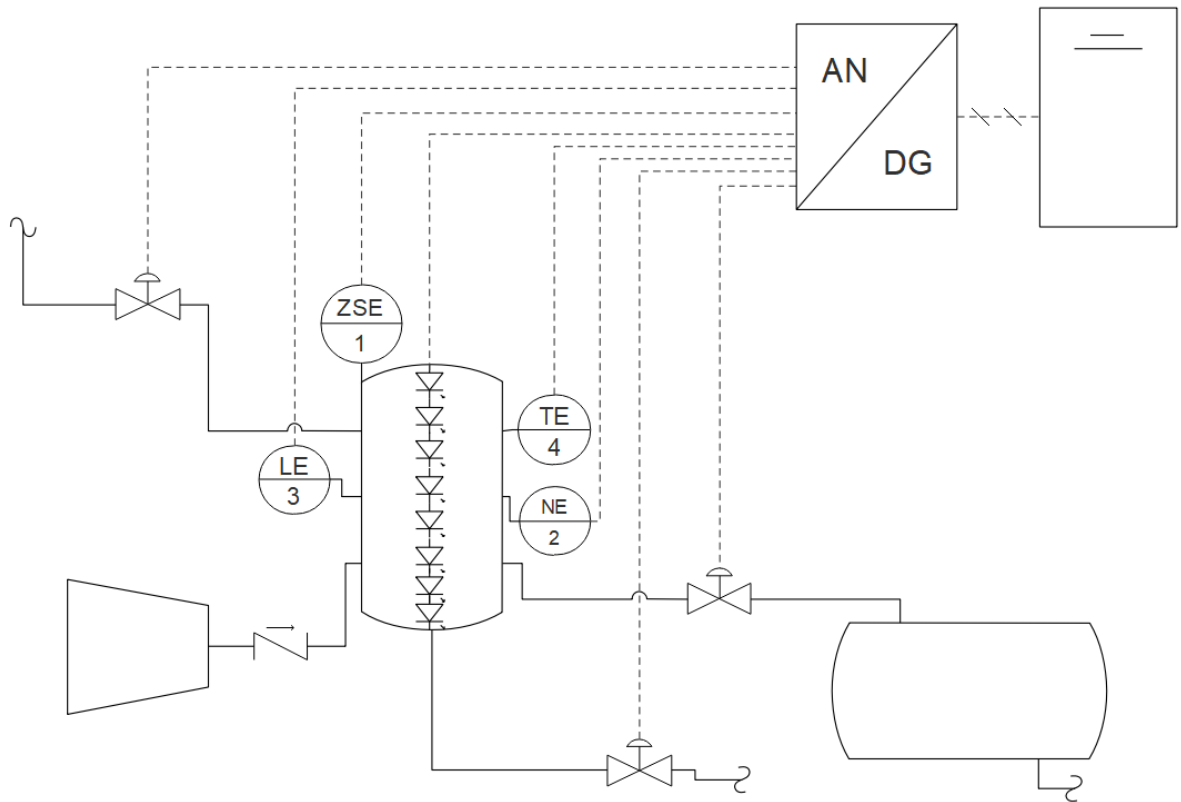


Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se realiza un diagrama de instrumentación del proceso tal como se muestra en la ilustración 9, manteniendo un lazo cerrado y 5 lazos abiertos para generar el control del reactor. Como se explicó anteriormente en el título de lazo de control. Por tanto, la ilustración 9 según la norma ISA muestra los elementos usados para controlar y monitorear el reactor.



**Ilustración 9.** Diagramas instrumentación del proceso. EDraw 8.1

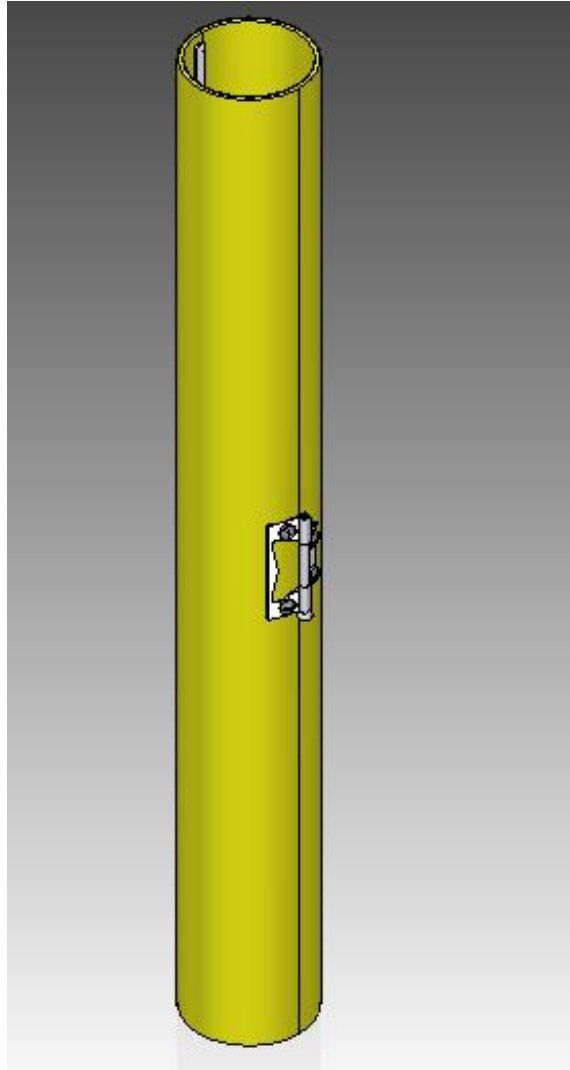


Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 10 y 11 muestran como está conectado se puede hacer una comparación con el diagrama de conexiones en el anexo B

2.4.1.1 Estructura interna. Como se muestra en la ilustración 10, la estructura interna consta de dos medios tubos de un diámetro de 58 mm como se evidencia en el plano en el anexo M y anexo N, unidos por medio de una bisagra rotatoria la cual pega con los tubos con tornillos golosos como se ven en los anexos C, anexo I, anexo L. Estos permiten que se unan los dos medios tubos para tenerle una apertura y así poder poner los discos de ilmenita dentro de ellos, la ilustración fue realizada en el programa Solid Edge ST10. también estos medios tubos poseen dos cintas led de 10 a 13 vatios por metro para que así puedan irradiar el material fotocatalítico y hacer el proceso de degradación.

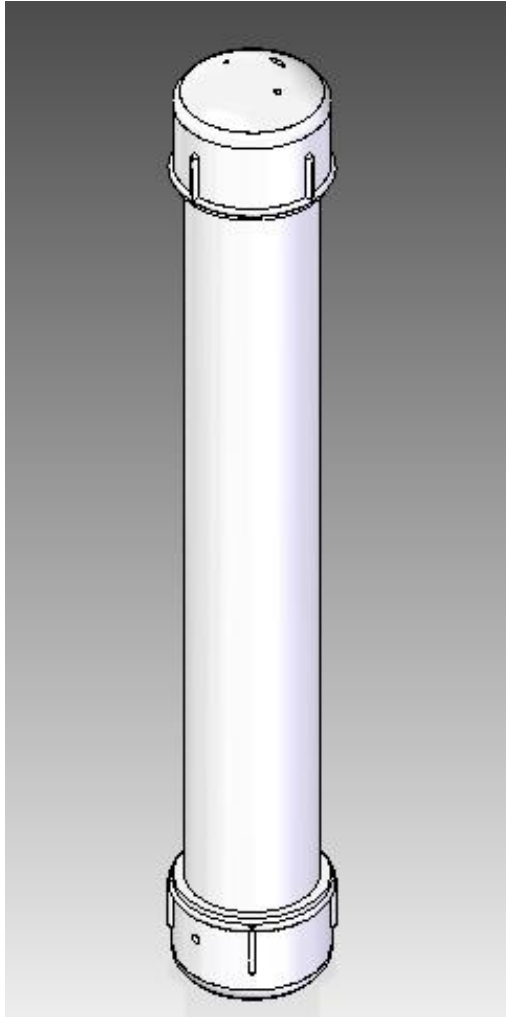
**Ilustración 10.** Estructura interna del reactor. Solidedge ST10



Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.2 Estructura externa. La estructura externa está hecha de un material de PVC tubos tipo tubería sanitaria de un diámetro interno 65,2mm y un espesor de 7,6mm el cual le permite y almacenar de 1.2 litros de agua para poder realizar el proceso de degradación, este reactor es robusto y de fácil manejo. A la tapa superior se realizan unas perforaciones con el fin de poder instalar el cableado para tener la alimentación de Led dentro del reactor, y en la tapa inferior con el fin de conectar la bomba de aire (compresor) con la parte interna del reactor, la que realiza el la aireación y agitación de le la sustancia.

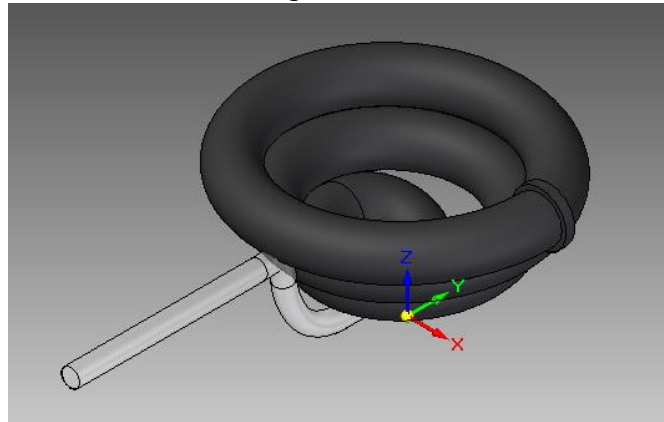
**Ilustración 11.** Parte exterior del reactor. Solidedge ST 10



Fuente: Elaboración propia.

2.4.4 Sistema de aireación. El sistema de aireación se hace por medio de un difusor de oxígeno de pecera, como se muestra en la ilustración 12 el cual tiene una longitud de 12 centímetros de largo. Está construido con un material de foamy, el cual tiene micro perforaciones que ayudan a que la agitación se haga de una forma homogénea, esta se conecta una bomba de aire de pulsos directamente para generar agitación por medio de burbujeo, este burbujeo es controlado por medio de una señal discreta que está emitida por el programa realizado en el lenguaje G.

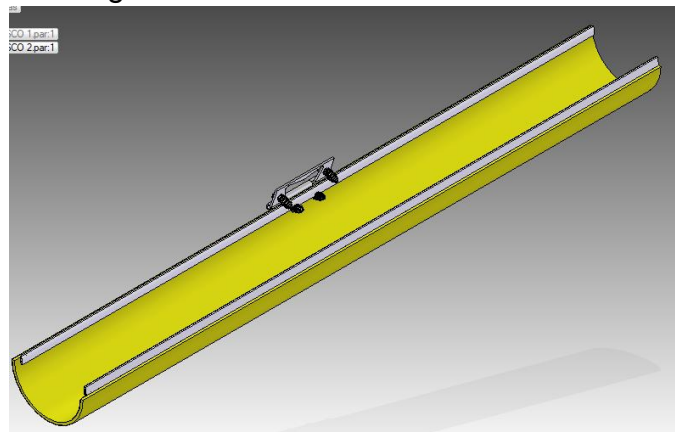
**Ilustración 12.** Sistema de aireación o agitación.  
Solidedge ST10



Fuente: Elaboración propia.

2.4.5 Sistema de iluminación. El sistema iluminación se muestra en la ilustración 13, la cual se realiza por medio de dos cintas led siliconadas enfrentadas entre sí; de 50 cm cada una para generar una potencia total de 13 vatios por metro, permitiendo que el material fotocatalítico tenga una buena radiación lumínica. Se emplea un adhesivo llamado Pegadit, el cual desempeña dos funciones, la primera es mejora su capacidad de ser sumergible ayudando a su impermeabilidad; y la segunda es la adherencia de la cinta led al PVC en la estructura interna. Posteriormente se dicha cinta led se conecta a un adaptador de 12 voltios 1 amperio, ya que puede resistir la corriente sin ningún inconveniente. Las ventajas de este sistema es que la cinta led por medio del proceso de impermeabilización permite que ésta sea sumergible y no tenga ningún problema para el funcionamiento en un medio acuoso.

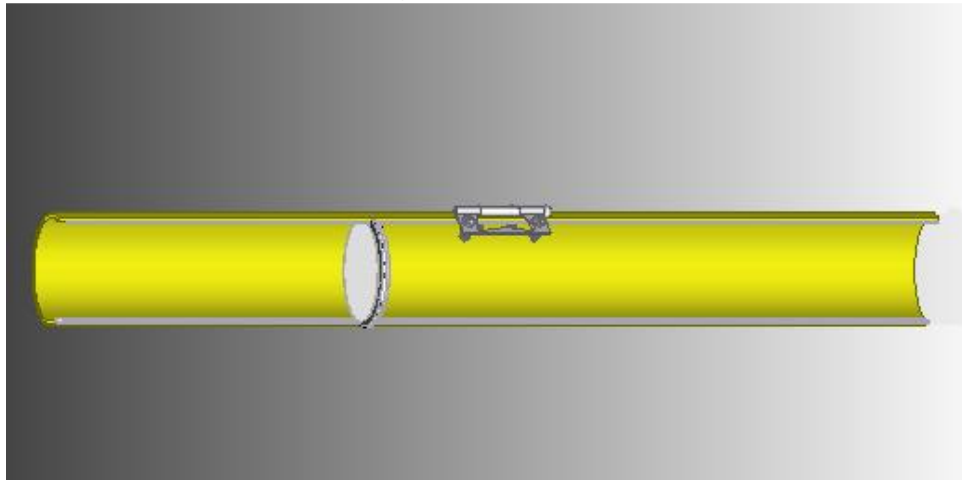
**Ilustración 13.** Sistema de iluminación.  
Solidedge ST10



Fuente: Elaboración propia.

2.4.6 Contenedor de material fotocatalítico. Los materiales que se escogieron para hacer los discos de la ilmenita son papel para filtro de café, tela lienzo y tela quirúrgica. Dichos materiales se escogen con base en su fácil acceso y que permitan contener la ilmenita de manera adecuada, es decir que la ilmenita no se escape de los discos. Por tanto, se utiliza una junta tórica (o-ring) como estructura del disco el cual se recubre con una capa del material anteriormente descritos. Estos discos, que contienen la ilmenita quedan a la medida exacta de la estructura interna, lo cual permite que no se desajusten ni se desacomoden los discos.

**Ilustración 14.** El ajuste del disco en la estructura interna.  
Solidedge ST10



Fuente: Elaboración propia.

### **3.RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En el presente proyecto se realizó una experimentación a escala laboratorio, la cual nos ayudó a determinar aspectos del semiconductor relevantes, como el material a usar para mantener la ilmenita compacta, el tamaño de partícula apropiado para usar en el reactor, como se evidencia en los numerales 2.3 Monitoreo con LabVIEW y el numeral 2.4 Diseño del reactor.

Con base a los resultados obtenidos en la experimentación con el reactor a escala laboratorio se toman las variables de diseño mencionadas en el numeral 2.4.1 Parámetros de diseño.

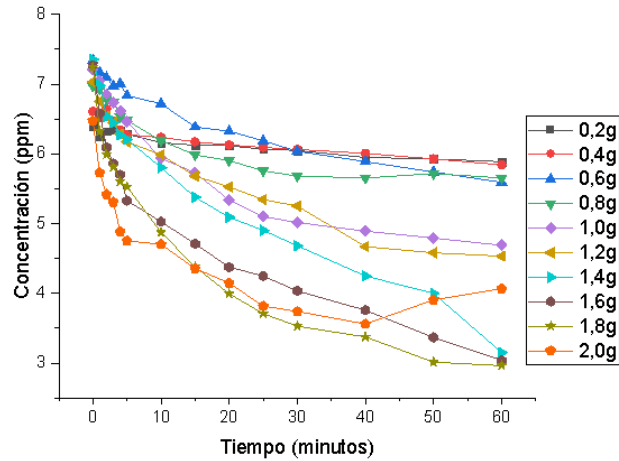
#### **3.1 REACTOR ESCALA LABORATORIO**

El reactor a escala laboratorio tiene una capacidad de 25 mL es elaborado en vidrio, con una base de madera y una tapa de nylon, se encuentra en el laboratorio de investigación de la Fundación Universidad América. La experimentación se divide en dos partes atribuidas a la disposición del semiconductor en el reactor; la primera parte fue utilizando la ilmenita en suspensión y la segunda parte empleando discos de ilmenita.

3.1.1 Ilmenita suspendida. En esta sección se realizaron experimentos con agitación magnética, diferentes tamaños de partícula mencionados en el desarrollo experimental, y con diferentes cantidades de ilmenita.

3.1.1.1 Agitación magnética. En este proceso se realizaron pruebas con distintas cantidades de ilmenita sin tamizar, suspendida, con agitación y sin agitación magnética, para determinar si es un parámetro relevante. Se obtuvieron los resultados expuestos en la gráfica 2.

**Gráfica 2.** Remoción de AM con ilmenita (ST) agitada magnéticamente. OriginLab.

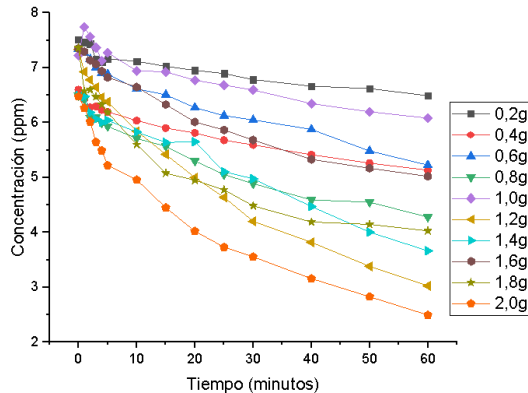


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 2, la remoción de AM con 2g respectivamente se evidencia un aumento de la absorbancia, donde durante la experimentación se observa que a medida que pasa el tiempo, la solución de azul de metileno fue tomando una coloración gris, esto debido a que, al agitar la ilmenita suspendida, desprende impurezas a la solución, reflejado en el aumento de la absorbancia y el cambio de coloración de la solución de azul a gris.

Para la experimentación de AM sin agitación magnética se obtuvieron los resultados expuestos en la gráfica 3.

**Gráfica 3.** Remoción de azul de metileno en distintas cantidades de ilmenita sin agitación magnética. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3 se evidencia que hay una relación directa entre la cantidad de ilmenita y la remoción de azul de metileno, dado que entre mayor cantidad de ilmenita mayor fue el porcentaje de degradación. En esta prueba ninguna cantidad de ilmenita presentó desprendimiento de impurezas. En la tabla 12, se presentan los porcentajes de remoción, entre la ilmenita agitada y sin agitar magnéticamente.

**Tabla 12.** Porcentajes de remoción de azul de metileno con ilmenita agitada y sin agitar magnéticamente.

Cantidad de ilmenita	Con agitación magnética (%)	Sin agitación magnética (%)
0,2 g	8,0	13,6
0,4g	11,6	22,2
0,6g	23,9	28,9
0,8g	18,9	34,1
1g	35,0	15,9
1,2g	35,5	58,8
1,4g	57,1	43,6
1,6g	58,2	31,7
1,8g	59,1	45,3
2 g	37,2	61,5

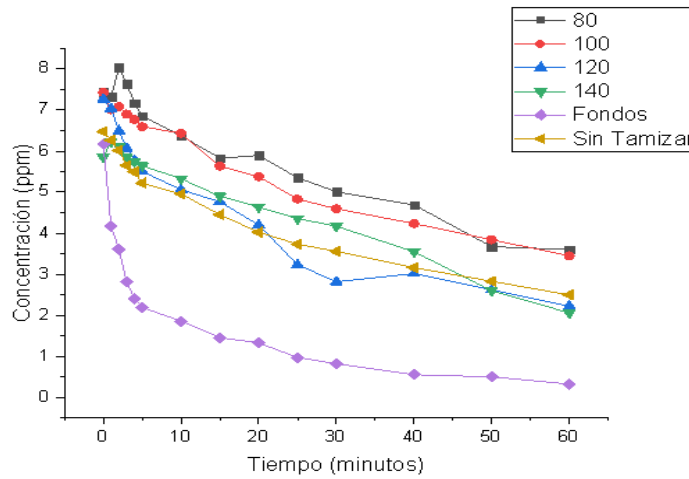
Fuente: Elaboración propia.

Basado en la tabla 12, se realiza una comparación entre los porcentajes de degradación entre la ilmenita agitada magnéticamente y la ilmenita sin agitación magnética, se determina que el cambio de la degradación es significativo cuando se emplea ilmenita de 2g donde se obtiene un porcentaje de remoción para la agitación magnética de 37.2% en comparación con la ilmenita sin agitar que presentó una remoción de 61.5%. Sin embargo, en algunas cantidades como 1.6g se obtuvo que fue mejor la remoción de AM con ilmenita agitada magnéticamente con 58.2% en comparación con la ilmenita sin agitar con 31.7%; sin embargo, al necesitarse un equipo adicional como lo es la plancha de agitación, se realizan las experimentaciones sin agitación magnética, ahorrando costos y equipos en el desarrollo de la experimentación.

3.1.1.2 Tamaños de partícula. Se realizaron remociones de azul de metileno con ilmenita en diferentes tamaños de partícula obteniendo los resultados reportados en la gráfica 4, donde se evidencia que el mejor porcentaje de remoción lo obtuvo la ilmenita de los fondos del tamiz, con un 94,8%, seguido a este se encuentra la ilmenita sin tamizar con un porcentaje de remoción correspondiente al 61.5%.



**Gráfica 4.** Remoción de azul de metileno con diferentes tamaños de partícula de ilmenita 2g.  
OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 13, se muestran los porcentajes de remoción correspondientes para cada uno:

**Tabla 13.** Porcentajes de remoción de azul de metileno con ilmenita suspendida, diferentes tamaños de partícula.

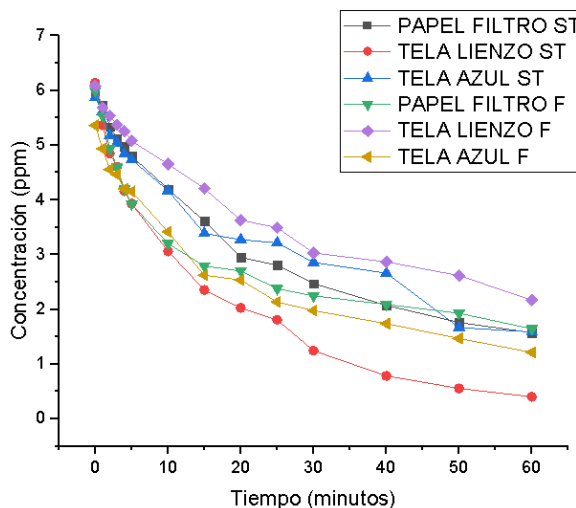
Malla	% Degradación
80	51,6
100	53,6
120	60,9
140	58,0
Fondos	94,8
Sin tamizar	61,5

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior se seleccionó la ilmenita de los fondos del tamiz, dado que fue la que presentó mayor porcentaje de degradación, adicional también se escogió ilmenita sin tamizar para las siguientes pruebas, con el fin de comparar si es necesario el proceso de tamizado, puesto que al emplear la ilmenita sin tamizar se ahorraría el proceso y los costos del tamizado.

3.1.2 Discos de ilmenita. Se realizan discos de ilmenita de 2g, sin tamizar y fondos del tamiz. Dichos discos se realizan con diferentes materiales, (ver sección 2.4.6 Contenedor de material fotocatalítico). Con el fin de observar cual material presenta un mejor comportamiento se realizan experimentos con cada uno, obteniendo los resultados de la gráfica 5, donde la ilmenita sin tamizar con la tela lienzo muestra mejores porcentajes de remoción de AM, con el 93.4%, seguido de la ilmenita de los fondos del tamiz en tela azul o tela quirúrgica, con el 77.3%, evidenciados en la tabla 14. Por lo cual se emplea ilmenita sin tamizar, dado que presenta mejores porcentajes de remoción que la ilmenita de los fondos del tamiz, siendo una alternativa competitiva frente a la ilmenita de los fondos del tamiz.

**Gráfica 5.** Remoción de azul de metileno con 2g de ilmenita en discos de diferentes materiales. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 14.** Porcentajes de remoción de azul de metileno con 2g de ilmenita con discos de ilmenita de diferentes materiales

Material	% Remoción ST	% Remoción F
Papel filtro	73,6	72,5
Tela Lienzo	93,4	64,2
Tela quirúrgica	72,9	77,3

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a una figura de mérito (expresada en la sección 2.2.1.2 Discos de ilmenita), se asignan puntajes donde se toma en cuenta la accesibilidad del material, la facilidad en el manejo del material, el costo y finalmente que permita llevar a cabo el proceso. Obteniendo los puntajes obtenidos en la tabla 15.

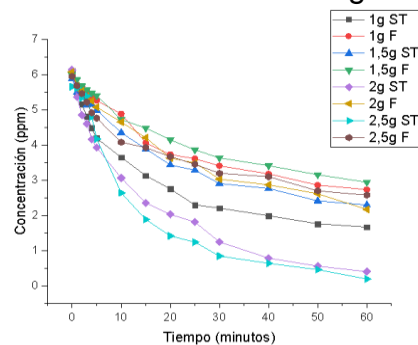
**Tabla 15.** Puntajes para los diferentes materiales de discos de ilmenita.

Material	Resistencia	Acceso	Manejo	Economía	Interacción del material en el proceso.	Puntaje total
Papel filtro	3	4	3	4	3	3,4
Tela lienzo	5	4	5	4	5	4,6
Tela quirúrgica.	5	3	4	5	4	4,2

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla 15, respecto a los materiales del disco, se decide escoger la tela lienzo por el puntaje obtenido, correspondiente a 4.6 sobre 5. Posteriormente, se realizó un análisis con discos de ilmenita sin tamizar y los fondos en diferentes cantidades con el fin de escoger cual era el mejor en el proceso de degradación. A continuación, se muestra la gráfica 6, correspondiente a las degradaciones mencionadas, donde nuevamente, los mejores porcentajes de remoción los presenta la ilmenita sin tamizar, en una cantidad de 2.5g con un porcentaje correspondiente a 96.6%; seguida de 2g de ilmenita sin tamizar con 93.4%. La ilmenita del fondo del tamiz presento porcentajes de remoción de 72.7% para 1g de ilmenita, siendo el porcentaje más alto, seguido de 2g de ilmenita, con un porcentaje de 69.3%.

**Gráfica 6.** Remoción de AM con discos de ilmenita sin tamizar y fondos en diferentes cantidades. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

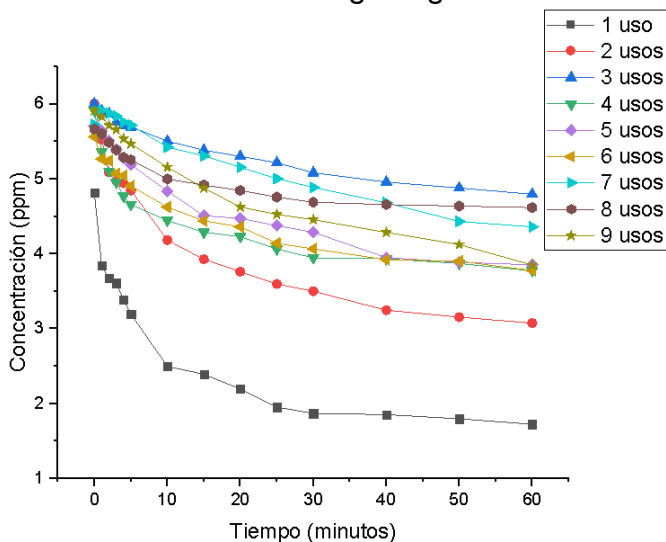
**Tabla 16.** Porcentajes de remoción de azul de metileno para diferentes cantidades de ilmenita sin tamizar y fondos.

Cantidad de ilmenita	Sin Tamizar (%)	Fondos (%)
1g	54,5	72,7
1,5g	60,9	50,7
2g	93,4	64,3
2,5g	96,6	56,7

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados de la tabla 16, se decide hacer la experimentación siguiente con ilmenita sin tamizar en discos de tela lienzo, dado que fue la que mejor comportamiento mostro durante las degradaciones. En las pruebas siguientes se probaron diferentes cantidades de ilmenita en cada disco como se muestra a continuación y se realiza una réplica con ilmenita sin tamizar, pero con un proceso de molienda para disminuir el tamaño general de partícula y poder determinar si es influyente en el proceso.

**Gráfica 7.** Remoción de AM con discos de ilmenita de 0.5g. OriginLab

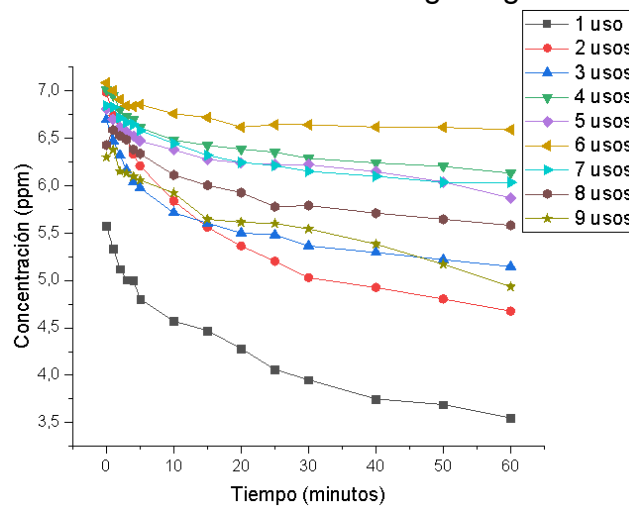


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 7 se aprecia una diferencia notable entre el primer uso, con los demás. El primer uso tiene un porcentaje de remoción de 64,2%, el segundo tiene un porcentaje de remoción de 48,8%, después de estos usos, el porcentaje de

degradación tiende a disminuir lentamente entre casa uso, donde después de nueve usos presentó un porcentaje de degradación de 34,9%. Para este disco, se obtiene una cantidad de usos correspondiente a 2 usos, bajo las condiciones establecidas en la parametrización.

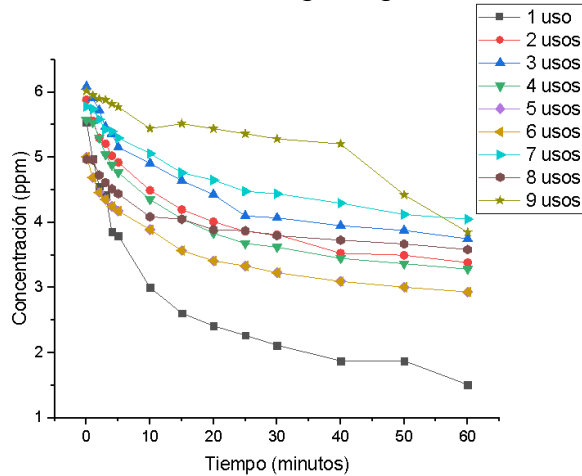
**Gráfica 8.** Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 0.5g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 8, como se esperaba, el primer uso del disco de ilmenita de 0.5g tuvo una diferencia significativa respecto a los demás, donde el primer uso tiene un porcentaje de degradación de 36.6%; el segundo uso presenta un porcentaje de remoción de 33,1% y en el noveno uso, una degradación de 21,7%. Este disco no presenta porcentajes de remoción adecuados para su uso en el reactor.

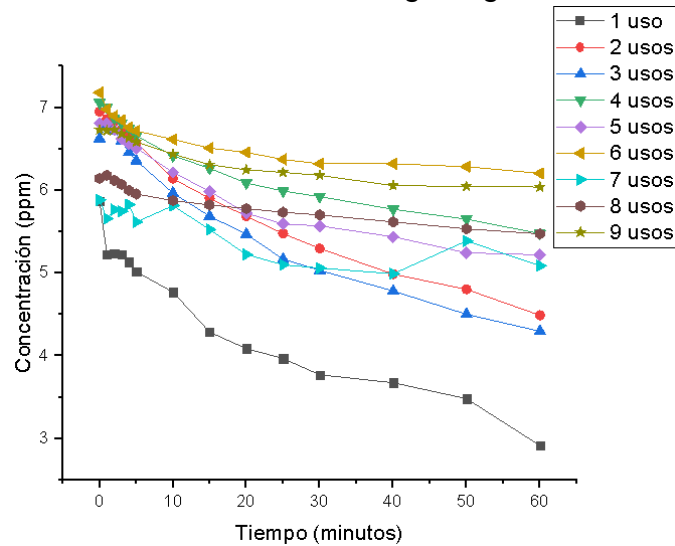
**Gráfica 9.** Remoción de AM con discos de ilmenita de 1g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

Para los discos de ilmenita de 1g se obtuvieron porcentajes de degradación para el primer uso de 72.7%; el segundo uso 42,5% y el porcentaje de degradación disminuye lentamente hasta el noveno uso completa un porcentaje de degradación de 36,0%, tal como se muestra en la gráfica 9. Dicho disco reporta que solo se puede hacer utilizar una sola vez, de acuerdo a los porcentajes de remoción mostrados anteriormente.

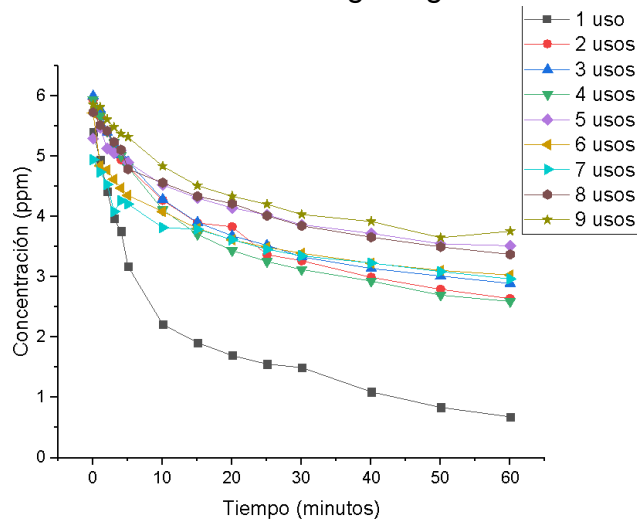
**Gráfica 10.** Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 1g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 10, la réplica se muestra un comportamiento estable, a excepción del séptimo uso de la réplica que presentó un comportamiento anormal puesto que el disco se desacomodó y esto fue solo evidenciado al desmontar el reactor. Se obtuvo un porcentaje para el primer uso de 50,4%; el segundo uso de 35,4% y finalmente el noveno uso de 10,4%. Este disco presenta un ciclo de vida de un solo uso.

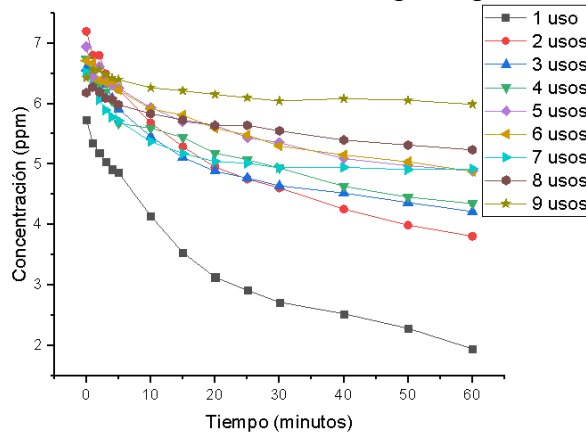
**Gráfica 11.** Remoción de AM con discos de ilmenita de 1.5g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En las remociones con discos de ilmenita de 1,5g mostradas en la gráfica 11 el primer uso del disco presentó un porcentaje de remoción de 87,4% donde disminuye considerablemente con la remoción del segundo uso correspondiente a 55,5% y finalmente el noveno uso disminuye a un 35,8%. Este disco puede usarse 4 veces en el reactor bajo las condiciones establecidas.

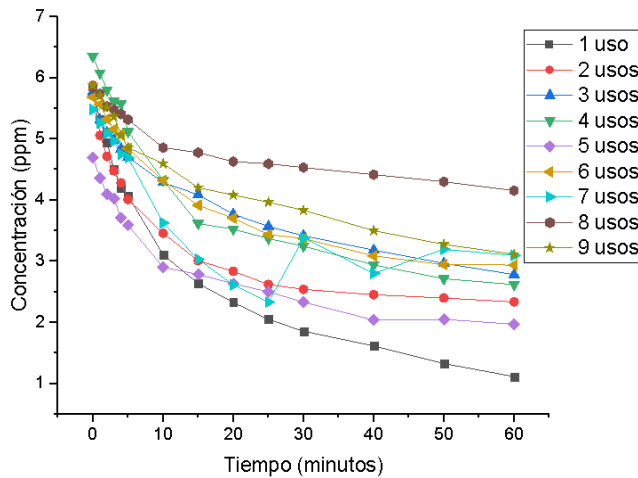
**Gráfica 12.** Réplica de remoción de AM con discos de ilmenita de 1.5g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 12 se muestra la réplica se muestra un comportamiento similar entre las remociones evidenciando la diferencia significativa entre el primer uso y los demás para cada degradación el primer uso presentó un porcentaje de remoción de 66,1%, el segundo uso de 47,1% y el ultimo uso de 6,8%. Este disco se puede usar 2 veces en el reactor

**Gráfica 13.** Remoción de AM con discos de ilmenita de 2g. OriginLab

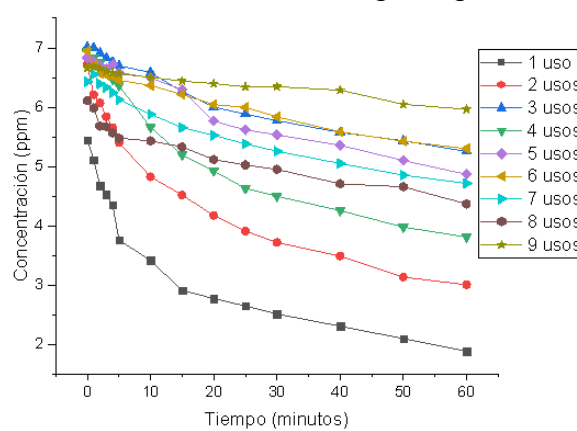


Fuente: Elaboración propia.



De acuerdo a la gráfica 13, en las remociones con discos de 2g de ilmenita se obtuvo un porcentaje de remoción de 80,7 % para el primer uso; 60,3% para el segundo uso, y finalmente 46,9% para el noveno uso. Este disco es uno de los que presenta mejores porcentajes de remoción, y una cantidad de usos más elevada, con una cantidad de 6 usos.

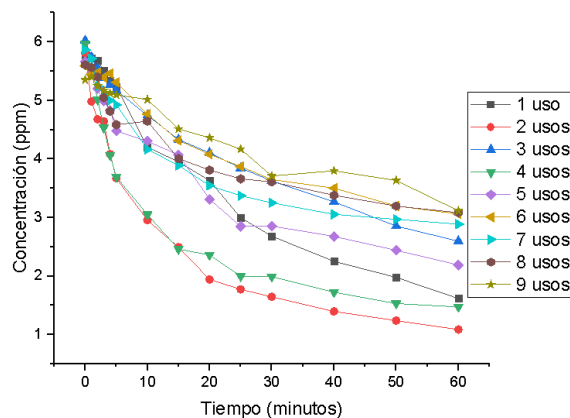
**Gráfica 14.** Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 2g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica 14, en la remoción con discos de ilmenita de 2g se obtuvo un porcentaje para el primer uso de 65,3%; para el segundo uso 55,2% y para el ultimo uso de 10, 44%. Este disco se puede utilizar hasta 4 veces.

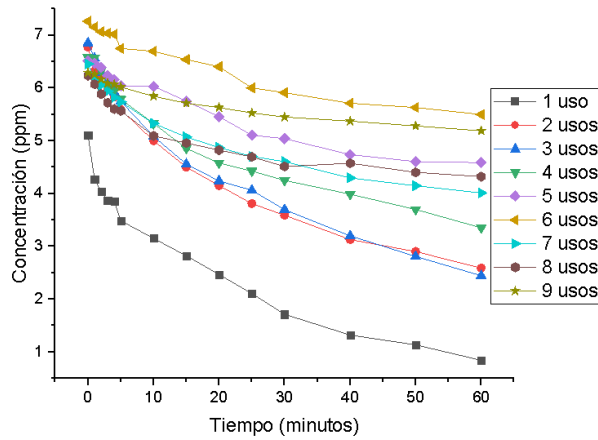
**Gráfica 15.** Remoción de AM con discos de ilmenita de 2.5g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la remoción con discos de ilmenita de 2.5g presentada en la gráfica 15, se obtuvo un porcentaje de remoción para el primer uso de 71,9% en el segundo uso el porcentaje aumento siendo un comportamiento atípico con un porcentaje de 81,3% y para el noveno uso 41,8%. Este disco puede usarse hasta 8 veces.

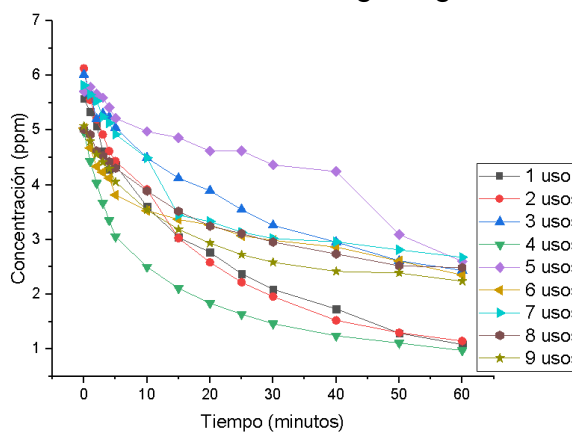
**Gráfica 16.** Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 2.5g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la réplica se obtuvo un porcentaje de remoción para el primer uso de 83,5%; el segundo uso de 61,8% y finalmente el noveno uso presentó una remoción de 17,5%, tal como se muestra en la gráfica 16. Este disco se puede usar 4 veces, bajo los parámetros establecidos.

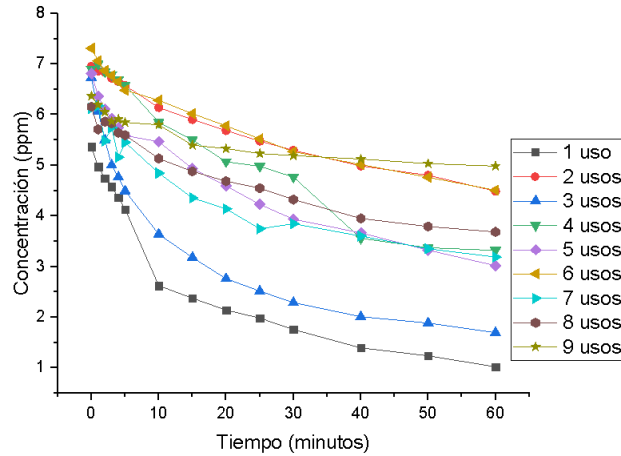
**Gráfica 17.** Remoción de AM con discos de ilmenita de 3g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En las remociones con discos de ilmenita de 3g mostradas en la gráfica 17, muestran un comportamiento más estable que los discos anteriores, donde el porcentaje de remoción del primer uso fue 80,6%; el segundo uso de 81,3% y el noveno uso de 55,9%. Este disco presenta una cantidad de usos elevada, se puede usar 9 veces, en el reactor.

**Gráfica 18.** Replica de remoción de AM con discos de ilmenita de 3g. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 18 se muestra la réplica, la cual obtuvo un porcentaje de remoción para el primer uso 84,94% el segundo uso de 35,4% debido a una variación en el flujo de la aireación, finalmente el noveno uso de 21,7%. Esta replica presenta un comportamiento inestable, en los porcentajes de remoción, en cada uso, esto debido a una falla en la aireación y la iluminación, debido a picos de energía que se presentaron en ese momento en el laboratorio. En la tabla 17, se observan los porcentajes de degradación, correspondientes a cada disco y cada uso:

**Tabla 17.** Porcentajes de remoción de cada disco y cada uso.

Cantidad de ilmenita	1 uso	2 usos	3 usos	4 usos	5 usos	6 usos	7 usos	8 usos	9 usos
0,5g	64,2	48,8	20,1	36,2	32,5	32,1	23,9	18,5	34,9
1g	72,7	42,5	38,4	41,1	41,4	41,4	29,9	27,8	36,0
1,5g	87,4	55,5	51,8	56,3	33,5	47,0	40,0	41,1	35,8
2g	80,7	60,3	51,8	58,7	58,0	48,3	43,5	28,7	47,0
2,5g	71,9	81,3	56,9	75,3	61,3	45,3	50,8	45,0	41,8
3g	80,6	81,3	59,5	80,4	54,4	53,3	54,0	50,3	55,9

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las gráficas y la tabla anterior, se determina que para el reactor escala laboratorio, los discos que presentan un mejor comportamiento son el de 3g y 2,5g respectivamente. Aunque algunos discos muestran porcentajes de remoción más altos en el comienzo, como es el caso del disco de 1,5g en el primer uso, con el 87,4 %, se ve que a lo largo de los usos su rendimiento disminuye rápidamente, con lo que se escogen los discos de 2,5g y 3g por su estabilidad con la cantidad de usos.

Tomando como partida un porcentaje de remoción superior al 45%, como un disco útil; se puede establecer que el disco de 0,5 g no tiene un desempeño adecuado; mientras que el disco de 1g solo se puede usar una vez; los discos de 1,5g y 2g se pueden usar dos veces; el disco de 2.5g se puede usar 4 veces y finalmente el disco de 3g se puede usar cinco veces.

Es así como, entre mayor cantidad de ilmenita, se puede observar que aumenta el porcentaje de degradación. Adicionalmente, también se encuentra que con mayores cantidades de ilmenita se pueden usar los discos más número de veces, pues el porcentaje de degradación no disminuye de manera acelerada con el número de usos, como es el caso de los discos con menores cantidades de ilmenita.

En la tabla 18, se muestran los porcentajes de remoción de las réplicas de cada disco y cada uso:

**Tabla 18.** Porcentajes de remoción de las réplicas de cada disco y cada uso.

Cantidad de ilmenita	Cantidad de usos								
	1 uso	2 usos	3 usos	4 usos	5 usos	6 usos	7 usos	8 usos	9 usos
0,5g	36,32	33,04	23,12	12,55	13,81	6,98	11,81	13,19	21,69
1g	50,36	35,42	35,16	22,42	23,36	13,59	13,52	10,92	10,27
1,5g	66,08	47,11	36,03	35,43	29,62	27,30	24,47	15,27	6,81
2g	65,36	55,25	25,05	45,16	28,76	23,71	26,68	28,48	10,44
2,5g	83,50	61,76	64,32	49,04	29,56	24,29	37,85	30,68	17,50
3g	80,94	35,42	74,78	51,88	55,70	38,31	47,95	40,13	21,71

Fuente: Elaboración propia.

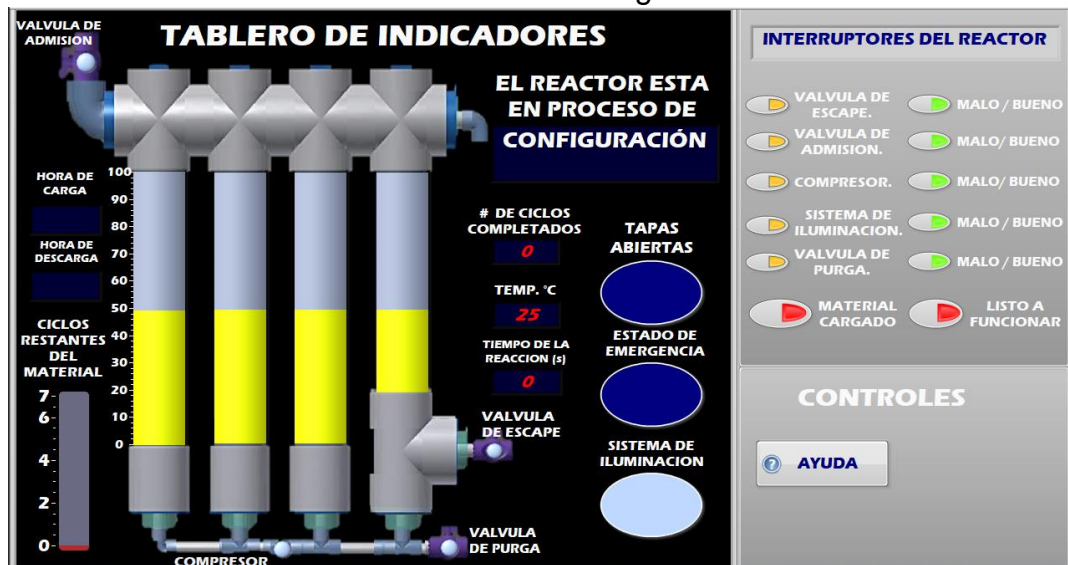
Estableciendo una comparación entre el experimento y la réplica, se puede observar que existe una diferencia en los porcentajes de remoción, lo cual es un indicador clave pues existe una diferencia con la ilmenita sin tamizar empleada, entre la ilmenita sin moler que fue el experimento original, y la ilmenita molida que fue la réplica. La ilmenita presenta unos mejores porcentajes de remoción y un comportamiento más estable en la cantidad de usos es la ilmenita sin tamizar y sin moler.

### 3.2 PROGRAMA DE CONTROL

En esta sección se explica el programa de control, el cual se realiza por medio de la máquina de estados; consta de siete estados (ver sección 2.3 monitoreo con LabVIEW). A continuación, se muestra la vista del panel frontal de cada estado del programa de monitoreo del reactor prototipo, visto por el usuario, destacando su manejo fácil e intuitivo.

En la ilustración 15 se observa el panel frontal cuando se encuentra en el estado de configuración, mostrando los controles disponibles, los interruptores del reactor y un esquema general del monitoreo del proceso

Ilustración 15 Panel frontal: estado de configuración. LabVIEW 2016



Fuente: Elaboración propia.

En el estado de inicialización se observa el esquema general y se pide al usuario completar los datos, tales como el material, el tiempo de reacción, la cantidad de usos y un correo para comenzar con el proceso, tal como se muestra en la ilustración 16.

Ilustración 16. Panel frontal: estado de inicialización. LabVIEW 2016



Fuente: Elaboración propia.

La ilustración 17 muestra el estado de llenado, es un estado automático donde el tanque se llena al nivel deseado, empleando sensores para medir su nivel.

Ilustración 17. Panel frontal: estado de llenado. LabVIEW 2016



Fuente: Elaboración propia.

La ilustración 18 muestra el estado de degradación es un proceso automático que se lleva a cabo de acuerdo a la información ingresada en el estado de inicialización.

**Ilustración 18.** Panel frontal: estado de degradación. LabVIEW 2016



Fuente: Elaboración propia.

El estado de vaciado se lleva a cabo cuando el proceso de degradación ha terminado, o cuando por algún motivo se desea vaciar el tanque, el proceso se realiza de manera automática una vez se da la orden tal como lo muestra la ilustración 19.

**Ilustración 19.** Panel frontal: estado de vaciado. LabVIEW 2016

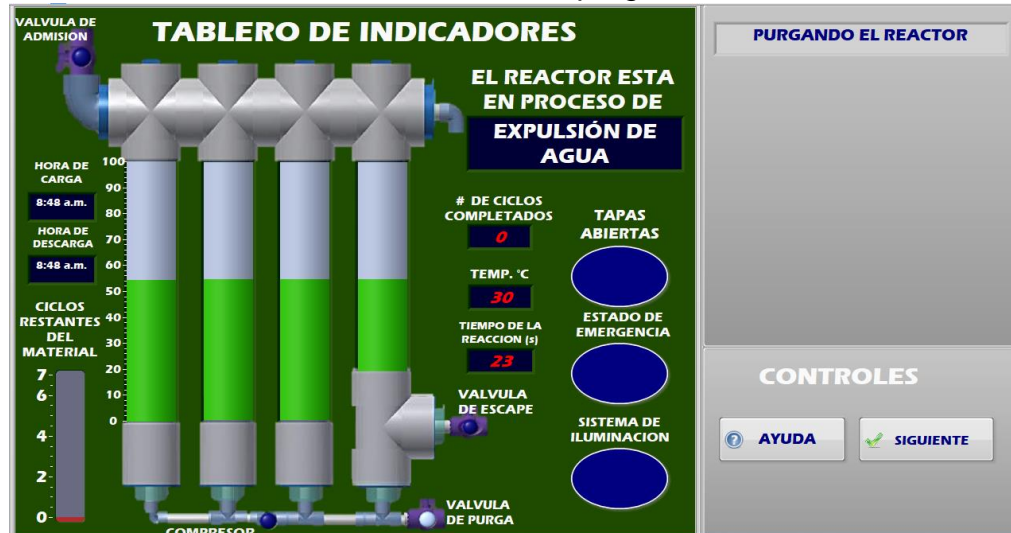


Fuente: Elaboración propia.



La ilustración 20 muestra el estado de expulsión de muestra de agua al cual se llega por voluntad del usuario, como su nombre lo indica expulsa el agua, por ello se ve el nivel de agua con ese aspecto obligando a qué usuario en ese momento manipule la máquina. Esto se da por qué el usuario detecto alguna irregularidad

**Ilustración 20.** Panel frontal: estado de purga. LabVIEW 2016



Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 21 se encuentra el estado de parada de emergencia, como su nombre lo indica permite parar cualquier estado en el proceso que se encuentre de manera rápida y segura.

**Ilustración 21.** Parada de emergencia. LabVIEW 2016



Fuente: Elaboración propia.



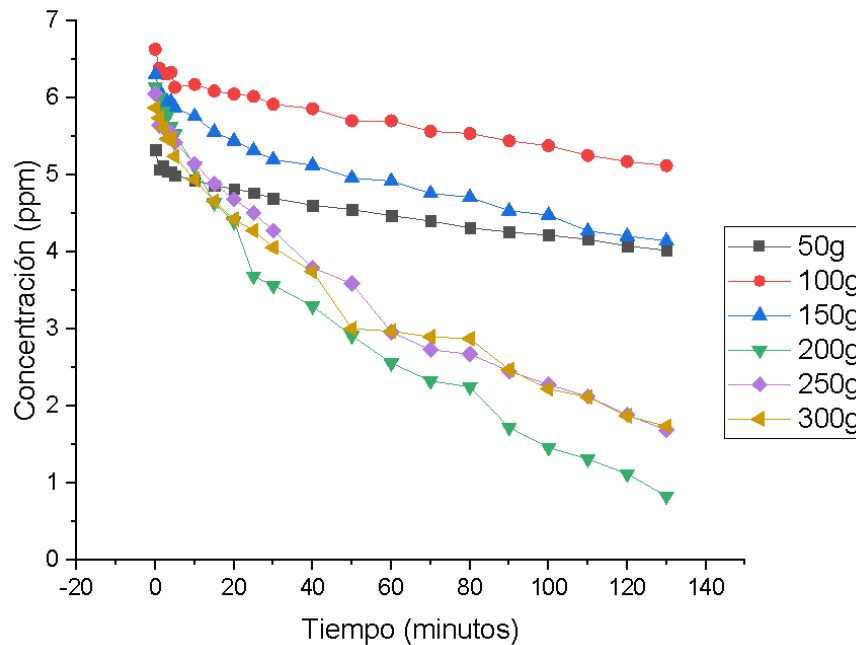
En la ilustración 21 se encuentra el estado de parada de emergencia, como su nombre lo indica permite parar cualquier estado en el proceso que se encuentre de manera rápida y segura.

### 3.3 REACTOR PROTOTIPO

El reactor prototipo fue elaborado con tubos de PVC, en el cual se determinó la cantidad adecuada de ilmenita en los discos del reactor, y la cantidad de usos de los discos. Las dimensiones empleadas en el reactor son 65.2 mm de diámetro y 550 mm como se evidencia del anexo C y al anexo R, teniendo en las 2 estructuras principales del proyecto.

3.3.1 Cantidad de ilmenita. Se hicieron pruebas en el reactor prototipo con el fin de comparar con el reactor a escala laboratorio, la cantidad de ilmenita y su influencia en el proceso, en la gráfica 19, se muestran las degradaciones con diferentes cantidades de ilmenita, donde se obtuvo la mejor degradación con 200g de ilmenita, seguida por 250g y 300g respectivamente, las degradaciones con menos de 150g no presentan buenos porcentajes de remoción.

**Gráfica 19.** Remoción de AM en el reactor prototipo con diferentes cantidades de ilmenita en discos. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

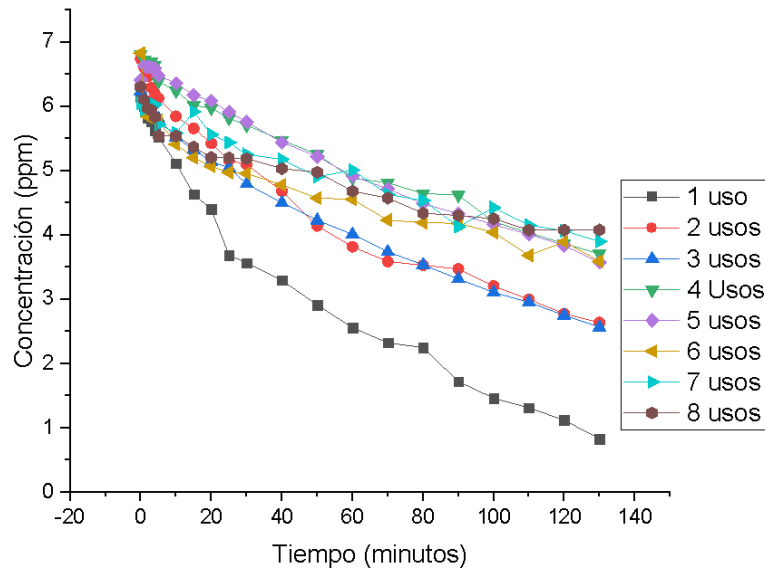
**Tabla 19** Porcentaje de remoción de AM en el reactor prototipo con diferentes cantidades de ilmenita.

Cantidad de ilmenita	50g	100g	150g	200g	250g	300g
% de remoción	24,6	22,8	34,2	86,5	72,1	70,4

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 19 se observa que la cantidad de ilmenita en el reactor prototipo que muestra un mejor desempeño es de 200g, contenida en 4 discos cada uno de 50g; obteniendo un porcentaje de remoción de 86.5%. Se puede observar que con más de 200g de ilmenita, se satura el reactor con el semiconductor, afectando el proceso fotocatalítico y haciendo que los porcentajes de remoción disminuyan, como se observa en la tabla 19. Es por esto que los siguientes experimentos se realizan con 200g de ilmenita contenida en 4 discos cada uno de 50g, mostradas en la gráfica 20.

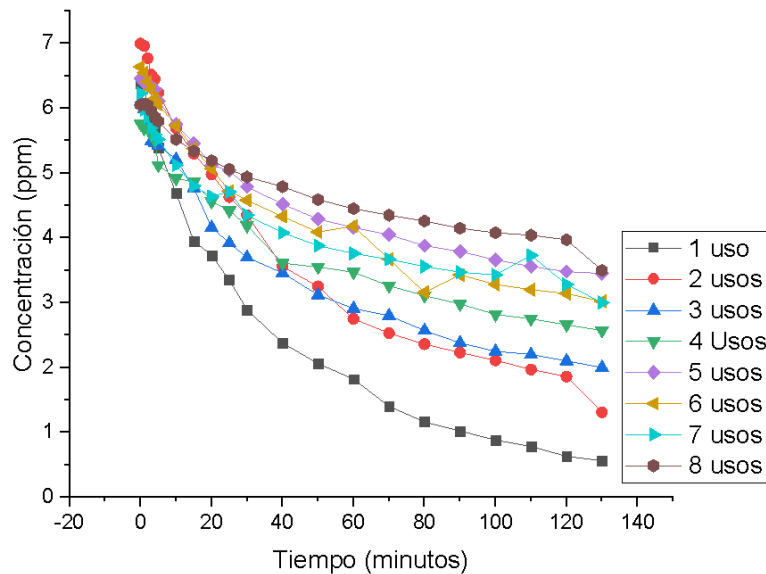
**Gráfica 20.** Remoción de AM con 200g de ilmenita en el prototipo del reactor. OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 20 se presenta la remoción con 200g de ilmenita contenida en discos encontramos porcentajes para el primer uso de 86.5%; para el segundo uso de 60,8% y para el noveno uso de 35,4%. Dichos discos presentan un ciclo de vida de 5 usos.

**Gráfica 21.** Remoción de AM con 200g de ilmenita en el prototipo del reactor. (réplica)-OriginLab



Fuente: Elaboración propia.

Para la réplica mostrada en la gráfica 21 se obtienen porcentajes de remoción para el primer uso de 91,2%; para el segundo uso de 81,32% y finalmente para el octavo uso de 42,22%. Estos discos de ilmenita se pueden usar un total de 7 veces en el reactor prototipo.

Donde se obtienen porcentajes de remoción aún más altos que en los reactores a escala laboratorio, y evidenciando el funcionamiento del reactor, pues en los experimentos realizados se alcanza una remoción de 91,2% en un tiempo de 2 horas y 10 minutos, con 200g de ilmenita contenida en discos. Tomando como partida un porcentaje de remoción superior al 45%, como un disco útil; se puede establecer que el ciclo de vida de la ilmenita contenida en discos es de 7 usos establecidas las condiciones de iluminación, flujo de aire y volumen de 1.2L

## 4.MANUALES DEL REACTOR FOTOCATALÍTICO

En este capítulo, se muestran los manuales de instalación del programa de control, el cual se puede realizar en cualquier equipo que tenga un sistema operativo de Windows, donde no es necesario tener el programa LabVIEW instalado.

### 4.1 MANUAL DE INSTALACIÓN

# *INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN*



# *“CONTROL DEL REACTOR FOTOCATALÍTICO”*

*INSTRUCCIONES DE INSTALACION “CONTROL DEL REACTOR FOTOCATALÍTICO”*

#### **REQUISITOS DE SISTEMA:**

-Windows 8, 8.1 ,10 (32-64 bits)

Este programa no requiere tener LabVIEW instalado en el equipo. Los requisitos del sistema, en cuanto a memoria, procesador y demás son muy bajos y pueden ser cumplidos por cualquier computador actual.

#### **REQUISITOS DE HARDWARE:**

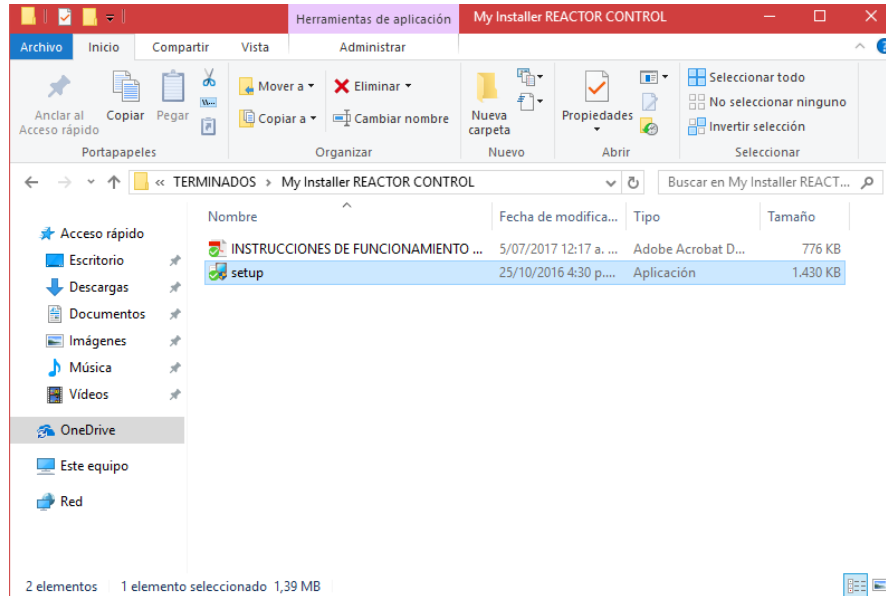
Requiere el reactor de microbiología ensamblado por el grupo de investigación materiales fotoactivos.

**Nota: Procure realizar todos los pasos como se indican para evitar problemas con la instalación.**

*CONTROL DE REACTOR FOTOCALITICO* es un programa que permite el control y la medición de un reactor, dicho programa se instala ejecutando el archivo

setup.exe que se encuentra en la carpeta “My Installer REACTOR CONTROL”, como lo muestra la ilustración 22.

**Ilustración 22.** Ubicación del instalador del programa y drivers

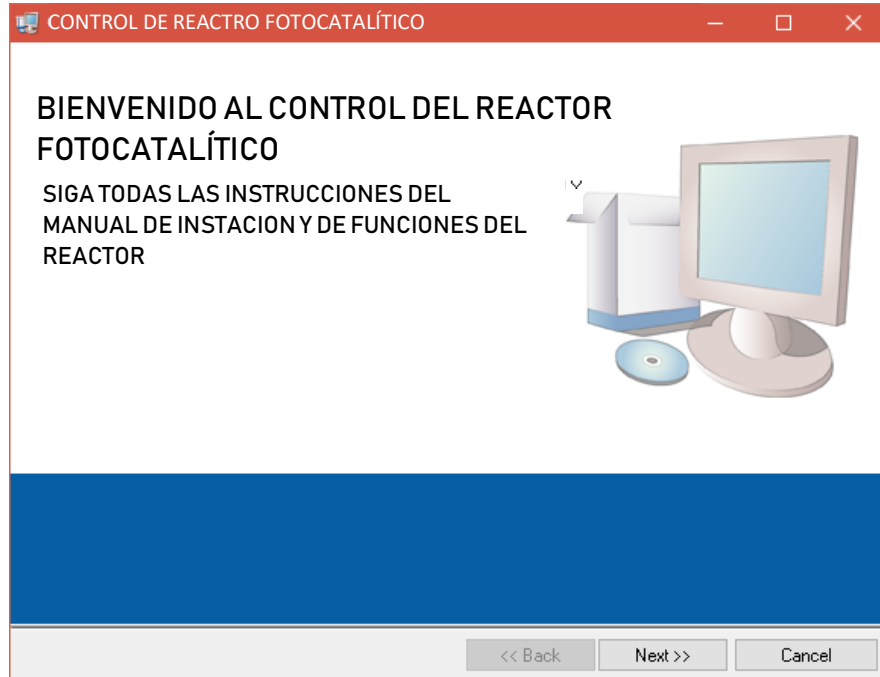


Fuente: Elaboración propia.

Después de ejecutar el **setup**, aceptar los permisos de administrador del equipo, para que así se dé inicio a la instalación del programa.

El programa iniciará con el mensaje de bienvenida como se muestra en la ilustración 23 después de este, darle le clic en el botón “Next”.

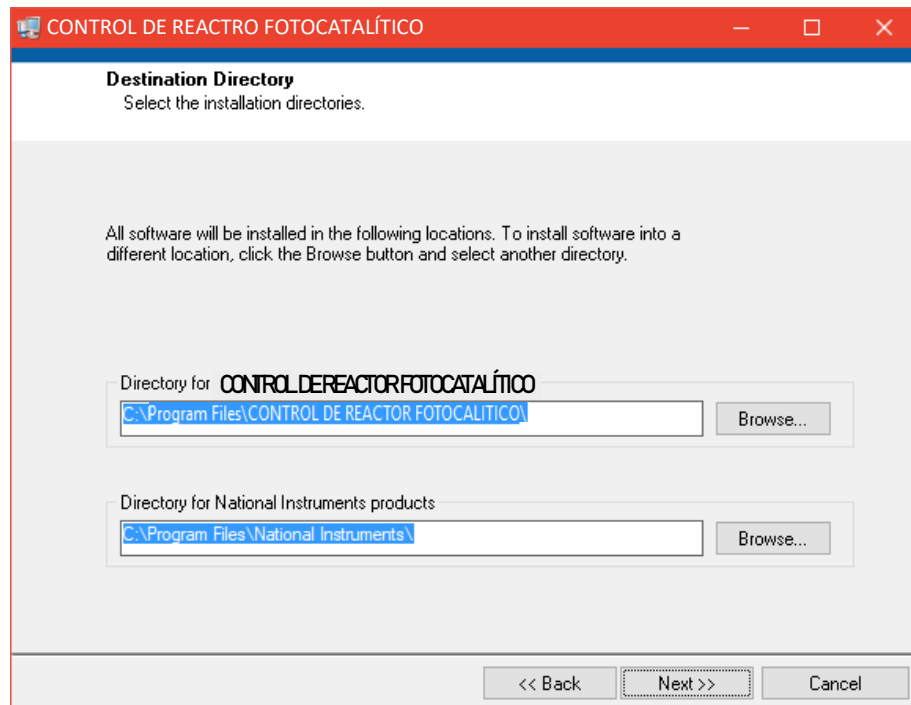
**Ilustración 23.** Pantalla de inicio del instalador



Fuente: Elaboración propia.

Luego de esa ventana, el instalador mostrará direcciones predeterminadas para la instalación del programa, dichas direcciones pueden cambiarse, si lo considera el usuario, como se muestra en la ilustración 24.

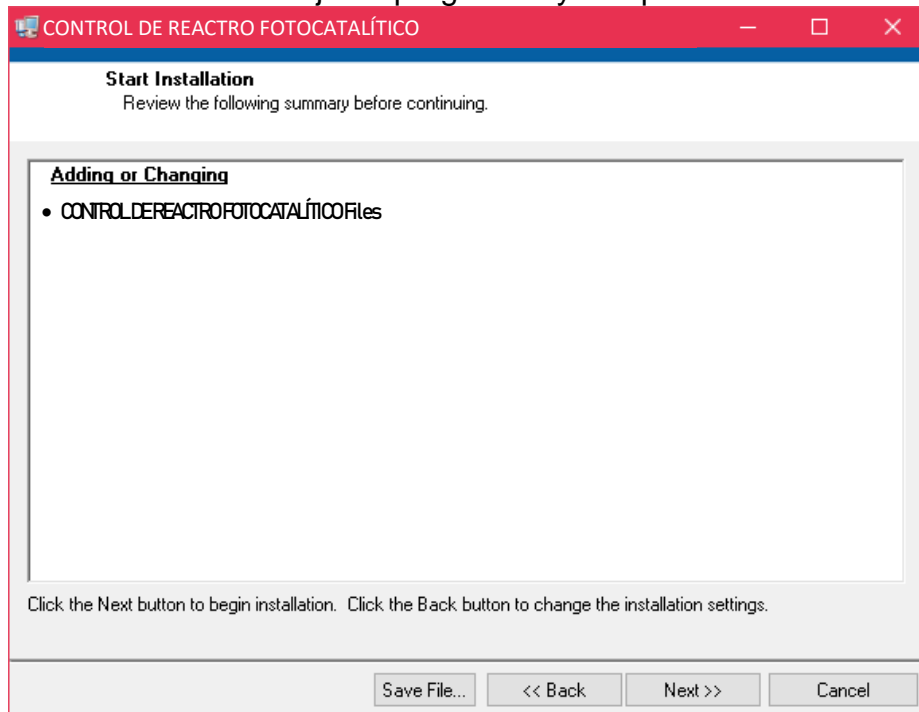
**Ilustración 24.** Selección de lugar de instalación del programa y drivers



Fuente: Elaboración propia.

Luego de hacer clic en el botón “Next” aparecerán los controladores a instalar, tal como muestra en la ilustración 25.

**Ilustración 25.** Ventaja de programas y complementos a instalar

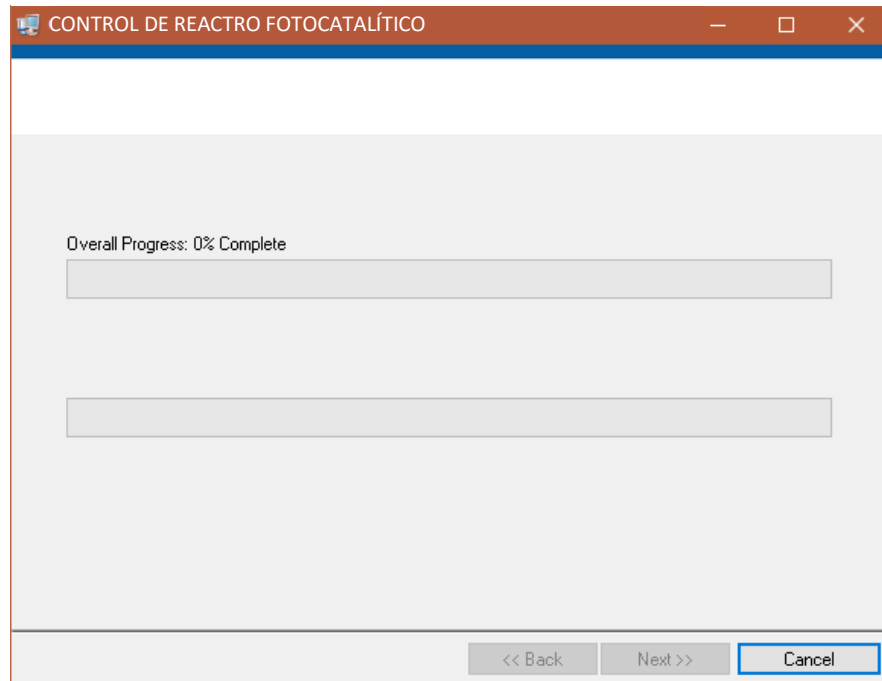


Fuente: Elaboración propia.



Dando clic de nuevo al botón “Next”, se inicia la instalación de controladores del programa de esta forma aparecerá la ventana mostrada en la ilustración 26. Esto puede tomar varios minutos.

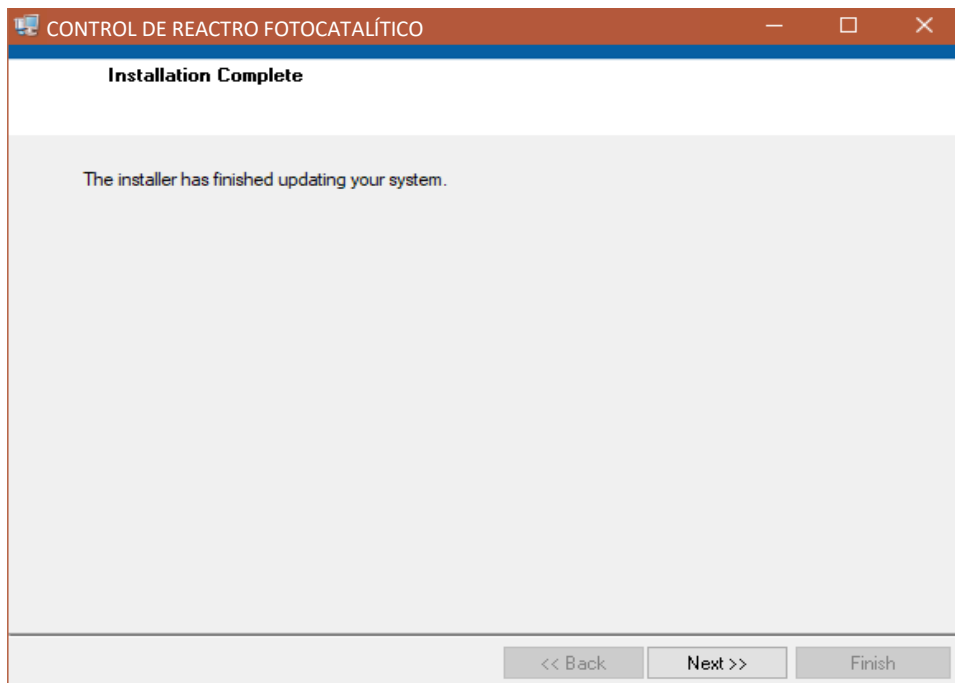
**Ilustración 26.** Ventana del proceso de instalación



Fuente: Elaboración propia.

Luego de este proceso se muestra que ha finalizado la instalación; para dar fin al proceso de instalación se pulsa el botón “Next” de nuevo, tal como se muestra en la ilustración 27.

**Ilustración 27.** Ventana de finde instalación del programa



Fuente: Elaboración propia.

Es probable que el equipo requiera reiniciarse, una vez culminado el proceso de instalación continúe con el manual de funcionamiento. **NO improvise si no tiene conocimiento de los sistemas.**

Cualquier pregunta de soporte y conexión comuníquese por medio de la línea +57-300-232-1052 o al correo soporte.grmaterialesfotoactivo@gmail.com

## 5.CONCLUSIONES

- Se construyo un reactor a escala laboratorio con una capacidad volumétrica de 1,2 litros que cumple con los parámetros de diseño que fueron: robustez, con materiales de fácil acceso, económicos, con capacidad de ser modular con facilidad al ensamblar, realizará su control y monitoreo por medio de lenguaje G.
- Se realizo un software intuitivo, amigable con el usuario, sencillo para lo cual se crea un ejecutable para que funcione para cualquier computadora con Windows, el cual permitió la realización de pruebas con el reactor probando así la relación software-hardware, se cumplen y se prueba el modularidad del programa.
- Se realizan de pruebas con el reactor, se cumplen y se prueba el modularidad del programa y la posibilidad de escalar el programa a un reactor de proporciones diferentes o agregando accesorios.
- El ciclo de vida para los discos a escala laboratorio varía de acuerdo a la cantidad de ilmenita, siendo 4 veces para discos de 2,5g; y 5 veces para discos de 3 g en un tiempo de una hora, bajo las condiciones establecidas.
- El ciclo de vida para los discos de ilmenita del prototipo del reactor es de 7 usos para 200g de ilmenita contenida en 4 discos, de 50g cada uno, durante un tiempo de dos horas y diez minutos bajo las condiciones establecidas.
- En el reactor prototipo se determina que la cantidad de ilmenita a emplearse en el proceso una de las variables hallar, pues en las pruebas realizadas se encontró que la remoción de azul de metileno no es proporcional a la cantidad de ilmenita. Debido que la experimentación de 200g de ilmenita mostro una degradación del 91.2% en un tiempo de 2 horas y 10 minutos.
- Se establece para el proceso fotocatalítico los mejores resultados de remoción de 96,5% correspondientes a la ilmenita contenida en discos lo obtuvieron la ilmenita sin tamizar y sin moler. En el caso de la ilmenita en suspensión los mejores resultados de remoción de 94,8% fueron con el tamaño de partícula del fondo del tamiz.
- Se desarrolla un manual de operación para la instalación del programa de monitoreo, explicado paso a paso para que cualquier usuario con un computador de sistema operativo Windows pueda usarlo, se destaca que es un programa de control intuitivo y sencillo para el usuario.

## 6.RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar el proceso a diferentes pH, pues según literatura el proceso de degradación de azul de metileno se da mejor a un pH de 9.
- Se recomienda emplear mezclas de las mallas obtenidas con el fin de encontrar si es mejor la ilmenita en mezcla de mallas o sin tamizar.
- Se recomienda medir el flujo de aire y hacer nuevos experimentos con diferentes flujos de aire con el fin de saber cuál sería el flujo adecuado de aire.
- Por facilidad de uso y cambio de la ilmenita, se recomienda usar la ilmenita contenida en discos con ilmenita sin tamizar y sin moler.
- Dar el uso del programa en un reactor a mayor escala, y cambiar los instrumentos de control por unos más grandes.
- Se recomienda realizar el monitoreo del reactor con un programa diferente a LabVIEW, con el fin de hacer una comparación y seleccionar el mejor.
- Se sugiere realizar una evaluación de costos para los próximos proyectos, estableciendo la viabilidad o rentabilidad del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

AMETHYST GALLERIES: MINERAL GALLERY. The Mineral Ilmenite [En línea]. Citado marzo 2018. Florida: Estados

APPEL, Kenneth; GASTINNEAU, John E; BAKKEN, Clarence; VERNIER, David. Physics with Computers, Vernier software. USA. 1998. 10-13p.

ARROYAVE Roja, J A; Garcés Giraldo, L F; Arango Ruiz, Á d J; Agudelo López, C M; (2008). La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. Revista lasallista de Investigación, 5() 20-27

BELEÑO A, Jeison. Adecuación de un reactor fotocatalítico para la Degradación de H<sub>2</sub>S en fase gaseosa con seguimiento en Labview. Bogota D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías,2017. 27p

C. Párraga, R. Espinel. Análisis de la actividad agrícola como contaminante del agua, alternativas tecnológicas para la desinfección del agua para consumo humano en comunidades rurales y recursos legislativos para la prevención y su conservación. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, 2009.

CASAS, J.A., GARCÍA P., BAHAMON A., ZAZO J., RODRIGUEZ J; Procedimiento de eliminación de nitratos de aguas por reducción fotocatalítica. Octubre, 2017. Universidad Autonoma de Madrid.

CHEN, YH. Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. En: Journal of non-crystalline solids. Enero, 2011, vol. 357, p. 136-139

CREUS, Antonio, Instrumentación industrial, 8ed, Barcelona- España, Alfaomega Grupo Editor 1p. ISBN 978-84-267-1668-2

DENG, H.; *et al.* Adsorption of methylene blue on adsorbent materials produced from cotton stalk. En: Chemical Engineering Journal. August 2011. Vol. 172, N°. 1. p. 326-334.

Diseño e implementación de un oxímetro de pulso con LabVIEW y la NI MyDAQ. México D.F., Abril de 2015, No 55, Especial No2. ISSN: 2007-0411

DOMÈNECH, Xavier; JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: Eliminación De Contaminantes Por Fotocatálisis Heterogénea. Cap. vol. 1,

El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo; La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales, pg 32

Garcés Giraldo, L F; Mejía Franco, E A; Santamaría Arango, J; (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, 1() 83-92.

Gil, E., Cabrera M., y Jaramillo S. Fotooxidación del sistema cromo hexavalente -4-clorofenol Universidad Eafit, vol.39, julio-septiembre pag.60-75

HARRIS, Daniel. Fundamentos de espectrofotometría. Sexta Edición. Ed. Reverté. 2007. P 410

HERRAMANN, J.M. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatalisis heterogénea. UnisersitéCALude Bernard Lyon. p 156-157.

INSTITUTO COLOMBIANO EN TÉCNICAS Y CERTIFICACION, Referencias bibliográficas, Contenido, forma y estructura, NTC 5613. Bogotá D.C.

\_\_\_\_\_. Documentación. Presentación de tesis de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instinto, 2008 36p, 2008.

\_\_\_\_\_.Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 23p

J. Blanco, S. Malato, D. Bahnemann, D. Bockelman, D. Weichgrebe, F. Carmona y F. Martínez, Proceedings of 7th Inter. Symp. on Solar Thermal Conc. Tech., IVTAN Ed. ISBN 5-201-09540- 2,.540-550, Moscow,Russia, (1994).

LLANES, Carolay Yaneth Guarín y BENAVIDES, Adriana Consuelo Mera. Fotocatalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub> para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. En: REVISTA INGENIERÍAS UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN. 2011.vol. 10, no. 19, p. 80-87

MEHDILO, Akbar; IRANNAJAD, Mehdi y REZAI, Bahram. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. En: MINERALS ENGINEERING. 2015.vol. 70, p. 64-76

MEHDILO, Akbar; IRANNAJAD, Mehdi y REZAI, Bahram. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. En: MINERALS ENGINEERING. 2015.vol. 70, p. 64-76

Moctezuma, E., Zamarripa, H. y Leyva, E. Degradación fotocatalítica de soluciones de alta concentración de paraquat. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2003.19 (3): 117-125,

Mora C., y Murcia M. Evaluación De La Actividad fotocatalítica De La Ilmenita Modificada Con Ácido Sulfúrico Para La Degradación De Azul De Metileno. Bogotá, D. C.: Fundación Universidad de América, 2012.

Mora C., y Murcia M. Evaluación De La Actividad fotocatalítica De La Ilmenita Modificada Con Ácido Sulfúrico Para La Degradación De Azul De Metileno. Bogotá, D. C.: Fundación Universidad de América, 2012.

N.S. Lewis, M.L. Rosenbluth (et al). Photocatalysis, Fundamentals and Applications. New York: 1989. p. Cap 3.

NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW™ Core 2 Participant Guide, Austin, USA. Course Software Version 2014, 55p

NATIONAL INSTRUMENTS. Learn Labview. [en línea] Disponible en [http://www.ni.com/academic/learn\\_labview/esa/](http://www.ni.com/academic/learn_labview/esa/)>

NATIONAL INSTRUMENTS. Manuals. Specifications NI MyDAQ [en línea]. Disponible en <http://www.ni.com/pdf/manuals/373061f.pdf>. 4p

OMEGA, Sensor de nivel, ¿Qué es un sensor de nivel? [en línea] Disponible en <https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>

PONCE CRUZ, Pedro; DELA CUEVA, Victor H. and PONSE ESPINOSA, Hiram. Robótica aplicada con LabVIEW y LEGO. 1st ed. Alfaomega Grupo Editor SA de C.V., México, 2016. 63p

PONCE CRUZ, Pedro; DELA CUEVA, Victor H. and PONSE ESPINOSA, Hiram. Robótica aplicada con LabVIEW y LEGO. 1st ed. Alfaomega Grupo Editor SA de C.V., México, 2016. 7-11p

RAFATULLAH, M., SULAIMAN, O., HASHIM, R. & AHMAD, A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. En: Journal of hazardous materials. May 2010. Vol. 177, N°. 1-3. p. 70-80.

ROSALES GARCÍA, José Alain. Materiales Para Fotocatálisis Y Electro fotocatalisis. Universidad Veracruzana, Región Coatzacoalcos-Minatitlán.: 2010. p. 3

ROSAS, José. Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes. Trabajo de maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo Leon. 2012, p.4

RUBIANO H., Claudia, LAGUNA C William., Zapata S. Carmen., Marin S Juan. "Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso". Gestión y Ambiente, vol. 8, no. 1, 2005, pp. 105-121. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

SÁENZ, Hermann. Ilmenita, mineral prometedor para purificar el agua. En: UN Periódico. No 151.

TEXAS INSTRUMENT. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Diciembre de 2017, 1-25p

TORRES LUNA, Juan Alberto; CARRIAZO, José Gregorio. Degradación Fotocatalítica del Colorante Amarillo Reactivo 145 Empleando Estructuras de

Fe(III)-TiO<sub>2</sub> Sintetizadas del Mineral Ilmenita. Revista Facultad de Ciencias Básicas, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 42-49, feb. 2017. ISSN 2500-5316.

UNICEF [online][citado el 13 de marzo 2018] Disponible en: <https://www.unicef.es/noticia/dia-mundial-del-agua-1000-ninos-mueren-cada-dia-por-falta-de-agua-potable>

Unidos de América. Disponible en: <http://www.galleries.com/Ilmenite>



## **ANEXOS**

## ANEXO A

### CERTIFICADO DE ORIGEN

Bogotá DC, Febrero 13 de 2018

Por medio del presente documento certifico que el material “Arena de ilmenita (TiO<sub>2</sub>) proviene del municipio de Barbacoas, Departamento de Nariño, extraída de minas de aluvión de este municipio, circundantes a los ríos Telembi y Telpi y que contiene un 47% aproximado de FeO y un 53% de TiO<sub>2</sub>.

#### Usos recomendados:

Materia prima para la producción de pigmentos de dióxido de titanio.  
Materia prima para la fabricación del rutilo sintético.  
Se emplea también como fundente de soldadura, en siderurgia con hornos BOF, y para lodos de perforación.  
Purificación de agua potable

No se identifica ningún peligro de acuerdo a la clasificación de Worksafe1 Australia  
PELIGROS:

Clase y Riesgo Secundario: Ninguna  
mención Código Hazchem: Ninguna  
mención  
Listado de sustancias tóxicas: Ninguna mención

#### POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD

**INGESTIÓN:** Sin toxicidad. No se conoce ningún riesgo derivado de la ingestión fortuita de pequeñas cantidades, como pudiera ocurrir durante las tareas normales de manipulación. Sin embargo, debido a la agresividad de este material, su ingestión en cantidades más grandes podría ocasionar irritación al sistema digestivo.

**OJOS:** Los sólidos y polvos podrán causar irritación moderada debido a su aspereza.

PIEL: Riesgo bajo

INHALACIÓN: Si bien se suele considerar como polvo ambiental inerte, su inhalación en concentraciones altas podrá provocar irritación. Se han de emplear controles contra el polvo en todas aquellas situaciones en que la manipulación o procesamiento del material pudieran crear cantidades apreciables de polvo.

#### INFORMACIÓN ECOLÓGICA

La posibilidad de que este material ocasione daños medioambientales es escasa; no se disuelve en el agua y es poco probable que contamine el medio hidráulico y las cadenas alimenticias.

Atentamente,



**DIóGENES MATIAS ORTIZ CORTES**

Manager

Tel. (051) - 2563808

Cel. (057) -3209140485

Web: [www.mineralescolombianos.com](http://www.mineralescolombianos.com) Bogotá-Colombia

