

REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ANILINA POR MEDIO DEL MÉTODO ELECTRO- FENTON CONTROLADO POR LABVIEW

TRABAJO DE TESIS

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

MODALIDAD:

SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA DE INGENIERÍA

PRESENTA:

**YULIETH VERONICA LOZANO QUIROGA
PAOLA ANDREA SEPULVEDA GRISALES**

DIRECTOR:

DR. SC. CESAR AUGUSTO QUIÑONES

CO-DIRECTOR:

JHON ERIK NAVARRETE GÓMEZ

2015

**REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ANILINA POR MEDIO DEL
MÉTODO ELECTRO- FENTON CONTROLADO POR LABVIEW**

**YULIETH VERONICA LOZANO QUIROGA
PAOLA ANDREA SEPULVEDA GRISALES**

**Trabajo de tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental
Modalidad: Solución de un problema de Ingeniería**

**Director Dr. Sc. Cesar Augusto Quiñones
Codirector Ingeniero Electrónico: Jhon Erik Navarrete Gómez**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ELECTROQUÍMICA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2015**

JURADO:

Firma del presidente del jurado

Firma del primer jurado

Firma del segundo jurado

Nota de aceptación:

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios creador de todo lo que nos rodea, por permitir hacer un excelente equipo para presentar un proyecto satisfactorio que abrió puertas, dio el tiempo, la habilidad, inteligencia y sabiduría en nosotras; este trabajo de grado va dedicado a Dios.

A nuestras familias que estuvieron dando su apoyo moral y ético, que con amor nos llenaron de ganas para seguir adelante y nunca desertar, gracias a nuestras amadas madres quienes con sus consejos, oraciones y fraternidad estuvieron siempre.

A la facultad de Ingeniería electrónica, que nos abrió las puertas de sus laboratorios y apoyo de sus mejores docentes que colaboraron en el desarrollo de este trabajo de grado

Al Ingeniero Electrónico Jhon Erik Navarrete por transmitir sus conocimientos, brindarnos su asesoría en todo tiempo y ser una gran persona, que no solo ayudo a la construcción del hardware y software sino también nos enseñó a procurar ser cada vez mejores ingenieras y no solo ambientales, sino también electrónicas.

A la facultad de Ingeniería Ambiental por darnos la posibilidad de saber que es necesario ser autónomas para tomar decisiones, para buscar soluciones y que hay que esforzarse en ser mejor profesional, que no basta con los conocimientos adquiridos, sino que la experiencia de desarrollar un proyecto de tal magnitud es la que permite sellar en tu mente y vida cada clase vista, cada ejercicio, cada parcial hecho durante los 10 semestres de carrera como ingenieras ambientales.

A cada uno de nuestros compañeros Karen Beltrán, Carlos Cuervo y otros ingenieros quienes aportaron su amistad y conocimientos cada día en el desarrollo y progreso de esta tesis, que sin su apoyo no habiéramos logrado llegar hasta aquí, que sin ellos no hubiera sido posible continuar.

A la Fundación Global Arte Ciencia y tecnología que nos brindó la beca en manejo de Drones y Robótica, gracias a la postulación del prototipo desarrollado en esta tesis como posible solución a problemáticas ambientales en Colombia.

Gracias a nuestro director de tesis Dr. Sc. Cesar Augusto Quiñones quien brindo todo de sí para que cada etapa de este proyecto prosiguiera con excelencia, cumpliendo siempre los objetivos planteados, además nos ayudó a comprender la importancia de la electroquímica y el desarrollo de software como pieza clave para ser ingenieras con capacidad de innovar en ciencia y tecnología.

Solo nos queda dar las infinitas gracias, mil GRACIAS !

NOMENCLATURA

PAO's Procesos de Oxidación Avanzada

DQO Demanda Química de oxígeno mg O² /L

E Potencial eléctrico Volts (V)

EF Electro Fenton

I Intensidad de corriente Ampere (A)

J Densidad de Corriente ($\frac{A}{m^2}$)

R Resistencia eléctrica Ohm (Ω)

F Capacidad Eléctrica faradios (F)

OH • Radical Hidroxilo

H Inductancia Eléctrica Henry (H)

C Cantidad de Electricidad Coulomb (C)

A Absorbancia

λ Longitud de Onda (nm)

DAQ Data Acquisition, tarjeta Adquisición de Datos

U Circuito Integrado

L Bobina

D Diodo

Hz Frecuencia Hertz (Hz)

Q Transistor

VI Instrumento Virtual

U/D: Up Down tiene la función de aumentar o disminuir la resistencia del potenciómetro digital.

INC: Enviar una señal cuadrada que puede efectuar el cambio de la resistencia.

ON: Permite Entregarle a las electroválvulas el voltaje deseado.

Vout: Permite a la tarjeta de Adquisición de Datos conocer el voltaje de salida.

GND: Es la referencia del sistema electrónico que da al punto a tierra o al punto cero.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	13
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
1. MARCO CONCEPTUAL	17
1.1 REACTIVO FENTON	17
1.2 REACCIÓN ELECTRO-FENTON	18
1.3 DEGRADACIÓN ANILINA	19
1.4 ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS	21
1.5 LEY DE BEER	21
2. REACTOR ELECTRO FENTON	22
2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	24
2.3 CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR EF	24
2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL	25
2.5 TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ANILINA	25
2.5.1 Sustancia Modelo	25
2.5.2 Espectrofotometría UV-Vis	26
2.6 PRUEBAS DE LA REACCIÓN EF PARA DIFERENTES VOLÚMENES	26
2.7 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	28
2.7.1 Efecto de la Intensidad de Corriente y resistencia eléctrica	28
2.7.2 Efecto del pH	29
2.7.3 Efecto del Peróxido de Hidrogeno y Sulfato de Sodio	29
2.8 CONSTRUCCIÓN EQUIPO EF	29
2.9 COMPROBACIÓN EQUIPO EF	32

2.9.1 Pruebas de variación de voltaje	32
3. HARDWARE	35
3.1 FUNCIONES.....	37
3.2 CIRCUITO	37
3.2.1 Habilitación electroválvulas	37
3.2.2 Proveer voltaje a electrodos	38
3.3 FUNCIONAMIENTO CIRCUITO	40
3.3.1 Habilitación de electroválvulas	40
3.3.2 Proveer Voltaje a los electrodos	40
3.3.3 Control de la Reacción EF	41
3.4 DISEÑO DEL PCB	42
3.5 CIRCUITO IMPRESO	44
4. SOFTWARE Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	45
4.1 FUNCIÓN DEL SOFTWARE	45
4.1.1 Registro de usuarios	45
4.1.2 Entrenamiento	45
4.1.3 Dosificación de los reactivos por medio de las electroválvulas	45
4.1.4 Variación del voltaje de los electrodos.....	45
4.1.5 Control del tiempo	45
4.1.6. Almacenamiento de datos, representación gráfica y generación de informe	46
4.2. DISEÑO DEL SOFTWARE	46
4.2.1. Panel Frontal	46
4.2.2 Diagrama de Bloques	47
4.2.3 Objetos y Estructuras	47
4.2.4 Patrones de diseño de los modelos de programación	48

4.2.4.1 Controlador de eventos de interfaz de usuario	48
4.2.4.2 Máquina de Estados	49
4.2.4.3 Variables Globales Funcionales	50
4.3. DESARROLLO PROGRAMACIÓN EN LabVIEW.....	52
4.3.1. Inicializar	54
4.3.2. Calcular Pulsaciones	54
4.3.3. Probar Señal Cuadrada	55
4.3.4. Rectificar Voltaje Salida	55
4.3.5. Continuar	55
4.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	56
5. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO	58
6. CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS.....	66

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Influencia de las variables de la reacción Electro-Fenton	1
Tabla 2. Resultados pruebas en tanques de diferentes volúmenes con concentración inicial 100mg/L	26
Tabla 3. Resultados pruebas a diferentes voltajes del método EF con concentración inicial 100mg/L de anilina	32
Tabla 4. Nomenclatura de los símbolos de los componentes electrónicos.....	36
Tabla 5. Componentes electrónicos con sus funciones	37
Tabla 6. Componentes electrónicos del circuito con sus funciones	38
Tabla 7. Variables del software LabVIEW	46
Tabla 8. Objetos y estructuras del software LabVIEW	47
Tabla 9. Estructura Eventos del Software LabVIEW	49
Tabla 10. Iconos del VI y los Sub-VIS usados en el software	51
Tabla 11. Ubicación de entradas y salidas análogas y digitales en la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).	57
Tabla 12. Preparación disoluciones de la curva de calibración	67
Tabla 13. Curva de Calibración de Anilina.	68
Tabla 14. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 9 voltios	70
Tabla 15. Datos de degradación de anilina tanque 2 con 9 voltios	70
Tabla 16. Datos de degradación de anilina tanque 3 con 9 voltios	71
Tabla 17. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 3 voltios	72
Tabla 18. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 6 voltios	72
Tabla 19. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 9 voltios	73

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Reacciones de la degradación de anilina	21
Figura 2. Metodología Experimental Equipo EF.....	22
Figura 3. Diseño equipo para la reacción Electro-Fenton	30
Figura 4. Equipo para la reacción EF.....	31
Figura 5. Esquema Circuito Electro-Fenton	35
Figura 6. Fuente de Voltaje Ajustable	40
Figura 7. Plano del circuito	42
Figura 8. Circuito diseñado en Proteus parte delantera.....	43
Figura 9. Circuito diseñado en Proteus parte trasera.....	43
Figura 10. Circuito Impreso Ensamblado	44
Figura 11. Máquina de Estados del Software LabVIEW	49
Figura 12. Diagrama de flujo del programa	52
Figura 13. Sub-VI de la programación de las Electroválvulas.....	53
Figura 14. VI principal de la Programación en LabVIEW	54
Figura 15. Sub-VI para la Programación del Voltaje	55
Figura 16. Funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).	56
Figura 17. Diagrama de entrada al programa principal.....	74
Figura 18. Diagrama En Anexo Up/Down	74
Figura 19. Panel frontal ventana de entrada	75
Figura 20. Pantalla de Mando	75
Figura 21. Pantalla de verificar Check-List	76
Figura 22. Lista de comprobación y cantidad de compuestos	76
Figura 23. Degradación de la anilina en LabVIEW	77
Figura 24. Ventana de autores.....	77
Figura 25. Measurement and Automation Explorer (MAX).	78

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Concentración de anilina vs tiempo a 9V	27
Gráfica 2. Eficiencia degradación anilina vs tiempo a 9V.	28
Gráfica 3. Gráfica concentración en el tiempo de la degradación de anilina.	33
Gráfica 4. Eficiencia vs Tiempo de la degradación de anilina.	33
Gráfica 5. Curva patrón de anilina.	69

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. PREPARACIÓN DE LOS REACTIVOS	66
A.1. Preparación del electrolito.	66
A.2. Preparación de disolución de ácido sulfúrico para ajustar el pH	66
A.3. Preparación de peróxido de Hidrógeno	67
ANEXO B. ELABORACIÓN DE LAS DISOLUCIONES DE ANILINA.....	67
B.1. Curva de calibración de anilina.....	68
ANEXO C. TABLAS DE DATOS	70
ANEXO D. DIAGRAMAS DE FLUJO PARA PROGRAMAR EN LABVIEW	74
ANEXO E.IMÁGENES DE LA VENTANA PANEL FRONTAL DEL PROGRAMA	75

GLOSARIO

Voltaje: Es la magnitud física que cuantifica el diferencial potencial eléctrico entre dos electrones

Corriente: Es el flujo de electrones por unidad de tiempo que recorre un material.

Resistencia: es un componente eléctrico que genera una oposición a la corriente eléctrica en magnitud.

Condensador: También llamado capacitor es un dispositivo que almacena energía en dos placas o superficies conductoras en forma de láminas separadas por un material aislante.

Diodo: Dispositivo semiconductor que permite la circulación del flujo de electrones entre sus terminales en un sentido determinado pero en sentido opuesto es obstruido.

Transistor: Componente eléctrico formado por materiales semiconductores que permiten el paso de señales eléctricas a partir de una pequeña señal de mando, funciona también como un elemento amplificador de señales.

Impedancia: Es una resistencia que se opone a la corriente continua pero no solo en magnitud, sino también en fase.

Inductancia: Es el campo magnético en presencia de una bobina campo magnético que se define como la relación entre la intensidad de corriente eléctrica y el flujo magnético.

Carga: Cantidad de energía que pasa de una partícula a otra.
Disipador: es un elemento que permite transferir temperatura.

Frecuencia: La cantidad de ocurrencias de un evento que se repite en el tiempo.

Opto transistores: Permite en un circuito eléctrico paso de energía cuando capta una luz por el no hay daños eléctricos

Instrumento virtual (VI): son archivos creados en LabVIEW con simulaciones gráficas que parecen y se comportan como instrumentos físicos reales.

Sub-VIs: es un VI pequeño que realiza tareas sencillas dentro de un VI más grande, este VI contiene un icono y una rejilla de conexión.

RESUMEN

En este trabajo se realizó el diseño conceptual y la construcción de un equipo Electro-Fenton escala laboratorio, el cual sirve para la degradación de compuestos orgánicos tales como la anilina, mediante este equipo los estudiantes aprenderán con mayor facilidad electroquímica ambiental, ya que con este podrán realizar prácticas experimentales, por lo anterior se suministrara a la Universidad Santo Tomás un equipo a escala laboratorio.

El equipo EF está conformado por un reactor electroquímico, hardware y software. El reactor electroquímico tiene una capacidad de 300 mL y dos electrodos de hierro con un área de 45 cm² cada uno. El hardware es capaz de suministrar la energía necesaria para los electrodos y la activación y desactivación de las electroválvulas que dosifican los reactivos usados en la reacción. El software permite que el usuario controle la variación de voltaje de los electrodos, como también que maneje la cantidad de reactivos dosificados, el tiempo de la reacción, el registro de los usuarios, el almacenamiento y representación gráfica de los valores de absorbancia obtenidos del espectrofotómetro UV-Vis, este programa se comunica con el hardware mediante la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), el hardware está compuesto por una serie de circuitos, componentes electrónicos y conexiones eléctricas.

Los reactivos que se agregaron a la reacción electroquímica fueron sulfato de sodio 0,05 M como electrolito, peróxido de hidrógeno como agente oxidante y finalmente ácido sulfúrico 0,01 M para mantener y ajustar el pH en 3. En la comprobación del sistema, la reducción de la concentración de anilina alcanzada fue de 99,4 % para una concentración inicial de 100 mg/L en un tiempo de 150 minutos, con un voltaje de 9V y se mantuvo a una corriente de 0,03 amperios.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería consiste en solucionar problemáticas utilizando la investigación y los conocimientos científicos para desarrollar tecnologías e innovación usando teorías científicas y herramientas tecnológicas actuales. Las teorías en las que se basa este proyecto de grado son la electroquímica, la reacción Fenton, ley de Beer y espectrofotometría UV-Vis además se usan herramientas tecnológicas como el software LabVIEW y los circuitos integrados del hardware. El desarrollo de prototipo a nivel laboratorio es un ejercicio intelectualmente avanzado que permite poner en práctica las competencias del ingeniero ambiental con el fin de generar productos y beneficios que cubren demandas y necesidades que la sociedad y su entorno presentan en la actualidad.

El principal objetivo de este proyecto de grado es construir un equipo Electro-Fenton conformado por un reactor, hardware y software. Se busca suministrar a la Universidad Santo Tomás un equipo a escala laboratorio, para que los estudiantes puedan facilitar su aprendizaje realizando prácticas de electroquímica ambiental, ya que esta electiva actualmente no cuenta con equipos para realizar experimentación.

Los resultados obtenidos en el trabajo de grado son el diseño conceptual y la construcción de un equipo EF conformado por un reactor electroquímico, un hardware y un software, para cada uno de estos se desarrolló un capítulo.

El capítulo del reactor EF contiene la metodología experimental del reactor encargado de la degradación de compuestos orgánicos considerados de difícil degradación por tratamientos convencionales [1], cabe resaltar que el compuesto orgánico con el que se prueba el funcionamiento de este equipo es la anilina mediante el análisis espectrofotométrico UV-Vis; en este capítulo también se muestra la descripción del sistema, el diseño experimental, las pruebas de la reacción EF y la construcción y la comprobación del equipo EF.

En el capítulo hardware se muestran las funciones, el diseño, los componentes y el funcionamiento del circuito. En la sección En el capítulo de software y adquisición de datos se presentan las funciones requeridas, el diseño, el desarrollo de la programación en LabVIEW y el sistema de adquisición de datos (DAQ).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Reducir la concentración de anilina por medio del método Electro- Fenton controlado por LabVIEW.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño conceptual para el Reactor Electro-Fenton.
- Construir el Reactor Electro-Fenton a partir del diseño conceptual.
- Desarrollar software para controlar el Reactor Electro- Fenton
- Verificar el funcionamiento del Reactor Electro- Fenton a partir de la degradación de anilina.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 REACTIVO FENTON

En 1890 Henry John Horstman Fenton descubrió que podía oxidar con facilidad las moléculas orgánicas al combinar el H_2O_2 y un catalizador de hierro [2] y hasta el año 1940 se estableció que este fenómeno ocurría por la generación de radicales hidroxilo [3].

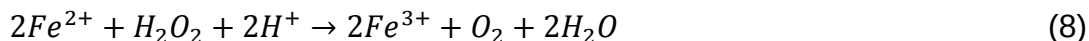
El reactivo Fenton se forma cuando el peróxido de hidrógeno reacciona con el ion hierro Fe^{2+} , lo que conforma el proceso de oxidación generando radicales hidroxilos [4]; el peróxido de hidrógeno se gasta produciendo radicales hidroxilo ($OH\bullet$) que permiten la degradación de la materia orgánica [5].



La reacción (1) tiene como subproducto, los iones de Fe^{3+} , que reaccionan con el peróxido en la ecuación (2) o radicales superóxido $\bullet O_2^-$ en la ecuación (3), para regenerar el Fe^{2+} , estas reacciones forman el ciclo del hierro por el proceso redox del mismo. Los iones Fe^{3+} catalizan la reacción del peróxido de hidrógeno produciendo agua y oxígeno, formando iones Fe^{+2} y radical $HO_2\bullet$ en la ecuación (2)



La siguiente ecuación (8) muestra la importancia de los iones H^+ para descomponer el peróxido de hidrógeno y a su vez la producción de grupos hidroxilo, aclarando la necesidad de ajustar el medio a un pH ácido.



Las reacciones anteriormente descritas son las que propician la oxidación de materia orgánica; los radicales hidroxilos absorben los protones de los compuestos orgánicos (RH) formando radicales orgánicos ($R\bullet$) los cuales son muy reactivos favoreciendo su oxidación (ver ecuación (9))



Cabe resaltar que si hay una concentración adecuada de los reactivos, los compuestos orgánicos se oxidaran a CO_2 y H_2O [6].

1.2 REACCIÓN ELECTRO-FENTON

Es una reacción electroquímica que consiste en aplicar una corriente eléctrica al reactivo Fenton por medio de dos electrodos adecuados, generando una reacción auto catalítica aumentando la velocidad y fuerza de la reacción Fenton.

La reacción en una celda electroquímica está formada por una reacción anódica y una reacción catódica, cada una tiene un potencial de fuerza electromotriz (FEM) que genera un cambio químico que no sucede espontáneamente [7].

Reacción catódica:



Reacción anódica:



Los electrodos poseen dos funciones: una es proporcionar la superficie donde se disocian las moléculas de hidrógeno y la segunda es que sirve como conductor eléctrico para el circuito externo [8]. La corriente eléctrica fluye de ánodo a cátodo porque existe una diferencia de energía potencial eléctrica entre los electrodos [8]. El peróxido de hidrógeno es producido por la reacción de electro-reducción del oxígeno sobre el cátodo [4]; [9]; [10], ecuación (10).

Tabla 1. Influencia de las variables de la reacción Electro-Fenton

Variable	Influencia
pH	El medio de la reacción es determinante para la remoción de los compuestos orgánicos, ya que la generación de radicales hidroxilos depende de este factor. El pH debe ajustarse durante la reacción en 3, si sobrepasa un pH de 4 se forman hidróxidos de Hierro $Fe(OH)_3$ que reducen la capacidad del Fe^{2+} como catalizador [11] y si se disminuyen demasiado los valores de pH la formación de radicales intermedios $HO_2 \bullet$ y $\bullet O_2^-$ también se reduce, impidiendo la degradación de los compuestos orgánicos [12].
Temperatura	Para conseguir una degradación buena de los compuestos orgánicos, es suficiente una temperatura ambiente [13], [14], [15] sin embargo, hay que considerar que cuanto más temperatura mayor la velocidad de la reacción Fenton pero sin

	sobrepasar una temperatura de 70°C, ya que en este caso el peróxido de hidrógeno formaría O_2 y no $OH \bullet$ [16].
Concentración de Fe^{2+} y H_2O_2	Esta variable es una de las más importantes porque maximiza la degradación de los compuestos orgánicos, el Fe^{2+} y H_2O_2 influyen individualmente a la reacción Fenton, como también a la par. Aunque no existe una exactitud del valor a agregar de Fe^{2+} y H_2O_2 y valores elevados producirían mayor cantidad de $OH \bullet$, no se debe exceder ni disminuir demasiado sus cantidades, o sino la reacción empieza a inhibir la producción de radicales hidroxilo [17].

Fuente: [11]- [17]

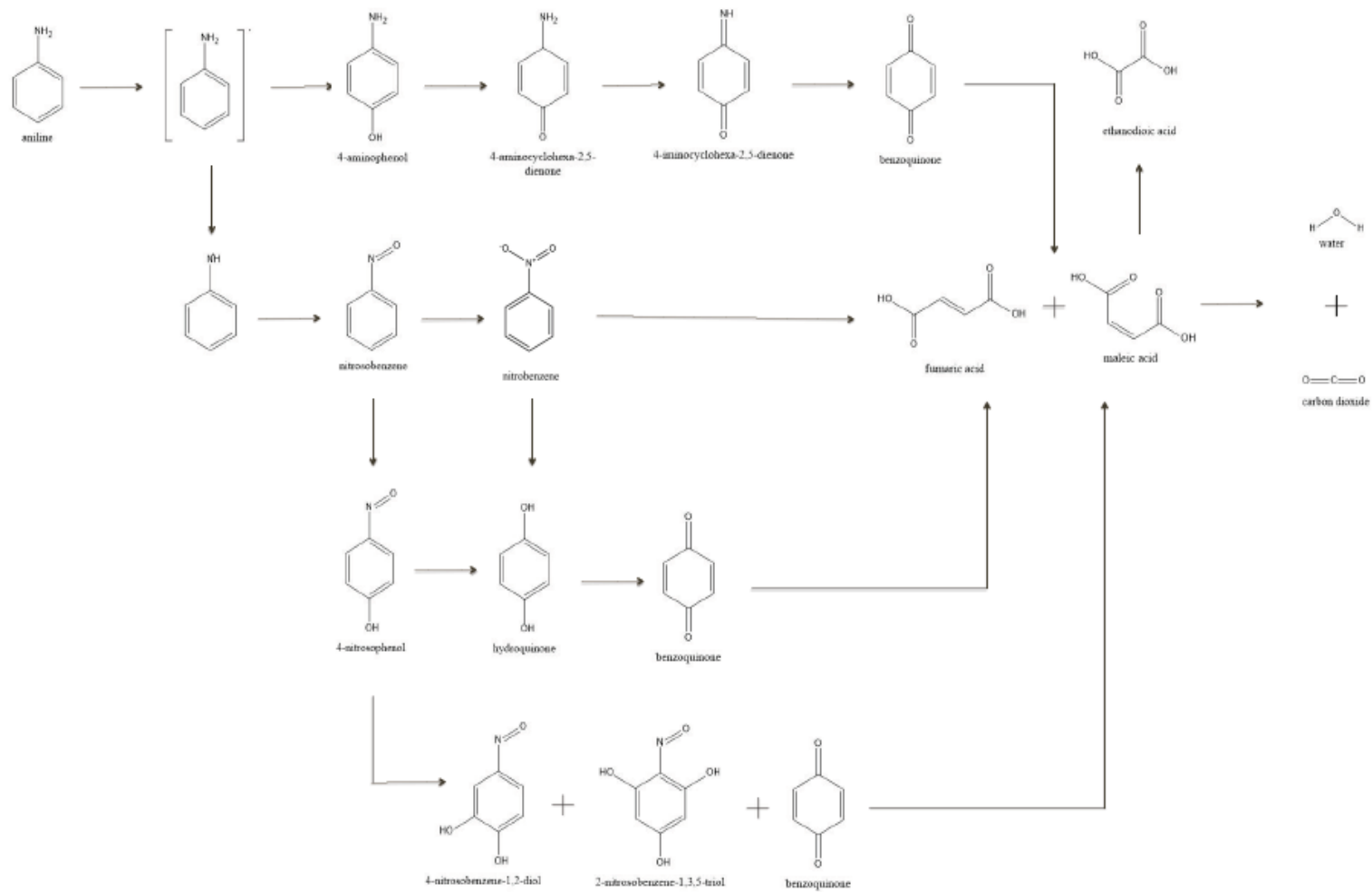
El Hierro y el peróxido de hidrógeno que son los principales actores de la reacción Fenton porque son efectivos en la generación de radicales hidroxilo, estos facilitan la degradación de cualquier compuesto orgánico, son compuestos abundantes en la naturaleza y su impacto negativo sobre el ambiente es mínimo. Para producir una molécula de $OH \bullet$ debe estar presente en el medio una molécula de Fe^{2+} ; por tanto, las condiciones operacionales del reactor EF deben definirse para permitir una degradación del compuesto orgánico de forma eficiente, teniendo en cuenta los costos que hacen factible el proceso [18].

1.3 DEGRADACIÓN ANILINA

La anilina es un compuesto aromático también denominado fenilamina o amino benceno, la estructura de la anilina está conformada por un grupo amino, su principal uso está en la producción de plásticos que son denominados poliuretanos, así mismo es usada en la elaboración de tintes, medicinas como la sulfanilamida, en explosivos y otros productos sintéticos; se considera una base muy débil, su punto de fusión es de -6,2 °C y su punto de ebullición de 184,3 °C [19]. Es un compuesto orgánico de difícil degradación en tratamientos biológicos de aguas ya que tiene un anillo de benceno, es un agente reductor muy fuerte [20], por lo cual reacciona con los oxidantes como el peróxido de hidrógeno y los radicales libres por tanto es de fácil degradación mediante la reacción Electro-Fenton [20]. La anilina es usada como colorante por lo cual es fácil de detectar por medio de la técnica analítica espectrofotometría UV-Vis [21].

Para la degradación de la anilina por medio de la Reacción EF que se detalla en la Figura 1. Se muestra que la anilina al entrar en contacto con los radicales hidroxilo forman la especie $R \bullet$ cada compuesto pasa por una oxidación, donde los radicales hidroxilo son los encargados del rompimiento de los anillos aromáticos; diferentes especies químicas en equilibrio se desplazan hacia la producción de benzoderivados y posteriormente en ácidos carboxílicos como el ácido fumarico, ácido maleico y ácido etanodioico que se degradan a agua y dióxido de carbono.

Figura 1. Reacciones de la degradación de anilina



Fuente: Autoría propia

1.4 ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS

Es un método analítico para la cuantificación de distintos tipos de analitos, tales como los iones de metales de transición, las macromoléculas biológicas y los compuestos orgánicos; se utiliza generalmente en química analítica, análisis farmacéutico, toxicología forense, aminoácidos y proteínas, química clínica, medio ambiente y análisis inorgánico [21].

El método de análisis óptico actualmente es usado para investigaciones en ingeniería, es un instrumento que gracias a su diseño simple tiene un rápido y fácil manejo, comparado con otros métodos de detección; además la técnica UV-Vis no destruye la muestra y posee una alta sensibilidad para la detección de compuestos orgánicos [22].

La validación de un método analítico provoca una mayor fiabilidad y aceptación de los datos generados [23] por tal razón se usó el método espectrofotometría UV-visible (La Matle, Smart spectro) para cuantificar las muestras en la parte experimental del presente trabajo (ver capítulo 2)

1.5 LEY DE BEER

Es una relación empírica que relaciona la absorción de la luz con las propiedades del material atravesado y a su vez con la concentración del analito o sustancia [24].

$$A = \epsilon bc \quad (17)$$

A = Absorbancia (cantidad de luz que absorbe la muestra).

c = Concentración de la solución en moles l^{-1}

b = Longitud de la trayectoria de la muestra en cm

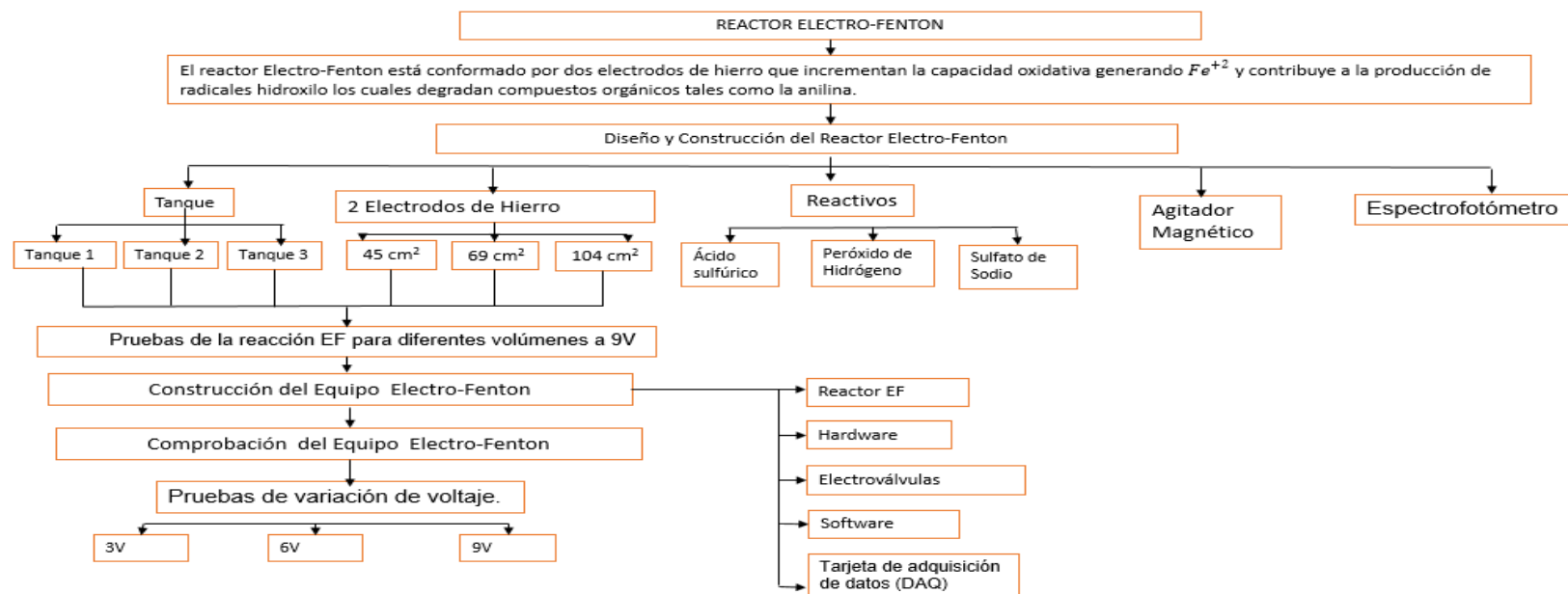
ϵ = Coeficiente de extinción molar o absortividad molar o de la sustancia sus unidades son (liters/moles. cm).

Según la ecuación anterior la absorbancia de una solución es directamente proporcional a la concentración de un analito. Lo cual indica que a mayor cantidad de moléculas, mayor es la interacción de ellas con la luz.

2. REACTOR ELECTRO FENTON

A continuación se muestran las etapas del desarrollo del diseño y construcción del reactor EF, se presenta el método de análisis espectrofotometría UV-Vis. Los procedimientos experimentales fueron realizados en los laboratorios de Ingeniería Ambiental y Electrónica de la Universidad Santo Tomas sede central, Bogotá; finalmente para la comprobación del sistema del equipo EF se integra el software en LabVIEW y el hardware que controlan su funcionamiento.

Figura 2. Metodología Experimental Equipo EF



Fuente: autoría propia

2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental del reactor EF se realizó mediante etapas que son descritas a continuación:

Etapas:

Montaje de técnicas: La reacción Fenton fue la base teórica para el desarrollo experimental. La cuantificación del porcentaje de remoción de la anilina se determinó mediante la técnica espectrofotometría UV-Vis.

Parámetros para la generación de la reacción EF: Según la reacción Fenton los reactivos requeridos y generalmente usados son peróxido de hidrógeno como agente oxidante, sulfato de sodio como electrolito a 0.05M y ácido sulfúrico a 0.01M para ajustar y mantener el pH menor a 3 (Ver Anexo A.1 y A.2).

Diseño y Construcción reactor EF y caracterización de electrodos: De acuerdo con los parámetros identificados y seleccionados para la reacción EF, se dosifica su volumen por medio de electroválvulas controladas por el usuario desde el software (ver capítulo 3); en el reactor también se usa un agitador magnético para la aireación del sistema y unos electrodos de hierro.

Existen diferentes materiales usados para los electrodos como lo son el aluminio, el zinc, el cobre, hierro y acero; estos dos últimos no son corrosivos en presencia de la anilina [25] y según la revisión bibliográfica el hierro es el más usado en la reacción Fenton porque es un metal conductor que se oxida fácilmente ya que tiene una baja resistencia eléctrica y por ende un mayor paso de corriente, es económico y asequible.

Pruebas escala laboratorio para la caracterización del reactor EF: Una vez establecidos los reactivos a usar y el material de los electrodos se realizaron pruebas para determinar el funcionamiento de la reacción electro-Fenton fijando el voltaje y midiendo la corriente en una solución modelo de anilina.

Pruebas de degradación de anilina en el reactor EF con variación en el área de los electrodos: Se realizaron pruebas en tres tanques de diferentes tamaños, cada tanque varía el área de los electrodos y la cantidad de agua sintética con anilina (Ver numeral 2.4); estas pruebas se realizan con el fin de saber cuál de los tanques alcanzó el mayor porcentaje de remoción de anilina.

Construcción del equipo EF y comprobación de su funcionamiento mediante la variación de voltaje: El tanque con mayor remoción de anilina fue elegido para la verificación del funcionamiento del equipo, en este se realizaron 3 pruebas con variación de voltaje, entre 3, 6 y 9V con el fin de

suministrar la cantidad de los reactivos necesarios para la reacción electroquímica insertados por el usuario desde el software (Ver capítulo 4) como también para comprobar que el voltaje fijado por el usuario desde el software se suministre a los electrodos durante el tiempo de la reacción EF y a partir de esto, se comprobó la degradación de la anilina y se identificó el voltaje que generó un mayor porcentaje de remoción durante 150 minutos.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El reactor Electro-Fenton está conformado por dos electrodos de hierro que incrementan la capacidad oxidativa generando Fe^{+2} y contribuye a la producción de radicales hidroxilo. Se diseñó el reactor con un ánodo y un cátodo que permiten la oxido-reducción del reactor, se dosificaron los reactivos que son introducidos en el reactor mediante electroválvulas (ver capítulo 3). La circulación de la corriente en el electrolito es de ánodo a cátodo y regresa desde el cátodo al ánodo a través del hardware (ver capítulo 2.4).

2.3 CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR EF

Fueron probados tres tanques con diferentes volúmenes permitiendo la configuración del área de los electrodos; cabe resaltar que existen varios estudios previos sobre la construcción de un reactor electroquímico, el propuesto en este trabajo consiste en configurar el área de los electrodos para determinar el correspondiente tanque con mayor porcentaje de remoción del compuesto orgánico, anilina y posteriormente su comprobación en el equipo EF con variación de voltaje.

Nota: Se diseñó y construyó un hardware para brindarle al sistema la energía necesaria para que ocurran las reacciones electroquímicas, ya que no era posible controlarlo por medio de LabVIEW con una fuente simple de poder.

2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación se muestran los dimensionamientos de los tanques y electrodos basados en revisiones bibliográficas, la cantidad de reactivos agregados son proporcionales a cada tanque, cabe resaltar que la cantidad de peróxido de hidrógeno y sulfato de sodio agregado a la reacción EF para cada tanque se estableció de acuerdo a la relación concentración y volumen.

Tanque 1: El reactor está compuesto por dos electrodos de un área de 45 cm^2 cuyo tanque tiene una capacidad de 300 mL de volumen, la cantidad de peróxido de hidrógeno usado es 5 mL [7], el ácido sulfúrico se agregó para controlar el pH durante todo el tiempo de la reacción, de electrolito 5 mL [7].

Tanque 2: Este reactor tiene dos electrodos con un área de 69 cm^2 , su tanque tiene una capacidad de 600 mL, la cantidad de peróxido de hidrógeno agregado es de 10 mL [7], el ácido sulfúrico se agregó para controlar el pH durante todo el tiempo de la reacción, de electrolito 10 mL [7].

Tanque 3: Este reactor tiene dos electrodos con un área de 104 cm^2 , su tanque tiene una capacidad de 900 mL, la cantidad de peróxido de hidrógeno agregado es de 15 mL [7], el ácido sulfúrico se agregó para controlar el pH durante todo el tiempo de la reacción, de electrolito 15 mL [7].

Las siguientes fueron las variables operadas por medio de un diseño conceptual en el reactor electroquímico:

1. Volumen a tratar
2. Área electrodos
3. Voltaje

2.5 TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ANILINA

El procedimiento y la técnica analítica empleadas durante las pruebas de laboratorio realizadas se muestran a continuación:

2.5.1 Sustancia Modelo. La sustancia modelo está formada por una amina cíclica llamada anilina, que es un compuesto orgánico usado comercialmente en la producción de plásticos, tintes, medicinas, explosivos y otros productos sintéticos, fue encontrada en otras bibliografías donde se estudia su degradación; es un compuesto de fácil detección debido a su coloración y es medida mediante la técnica espectrofotometría UV-Vis.

Las muestras de la sustancia modelo se realizaron pesando y disolviendo en agua destilada 100 mg/L para las pruebas experimentales (ver anexo A.1) fue necesaria la determinación de longitud de onda de la anilina que es 546 nm.

2.5.2 Espectrofotometría UV-Vis. Para la determinación del porcentaje de remoción de anilina se empleó un método de análisis espectrofotométrico UV-

Vis, el seguimiento de la concentración de anilina se realizó en el equipo espectrofotómetro UV-visible (La Matle, Smart spectro), fue necesaria la construcción de una curva de calibración previa para el seguimiento de la concentración de anilina (Ver Anexo B.1).

Durante las pruebas realizadas en cada reactor se tomaron medidas cada dos minutos durante la primera fase de la reacción, posteriormente cada 5 minutos hasta llegar a 30 minutos, luego cada 10 minutos hasta completar la hora y después cada 30 minutos hasta completar los 150 minutos.

2.6 PRUEBAS DE LA REACCIÓN EF PARA DIFERENTES VOLÚMENES

Como se especificó anteriormente se usaron tres tanques de diferentes volúmenes y sus correspondientes electrodos, con el fin de seleccionar el tanque de mayor porcentaje de remoción de anilina a una concentración inicial de 100 mg/L, los 3 reactores funcionaron por un tiempo de 150 minutos sometidos a un voltaje de 9V, para cada prueba se midieron los valores de corriente.

Tabla 2. Resultados pruebas en tanques de diferentes volúmenes con concentración inicial 100mg/L.

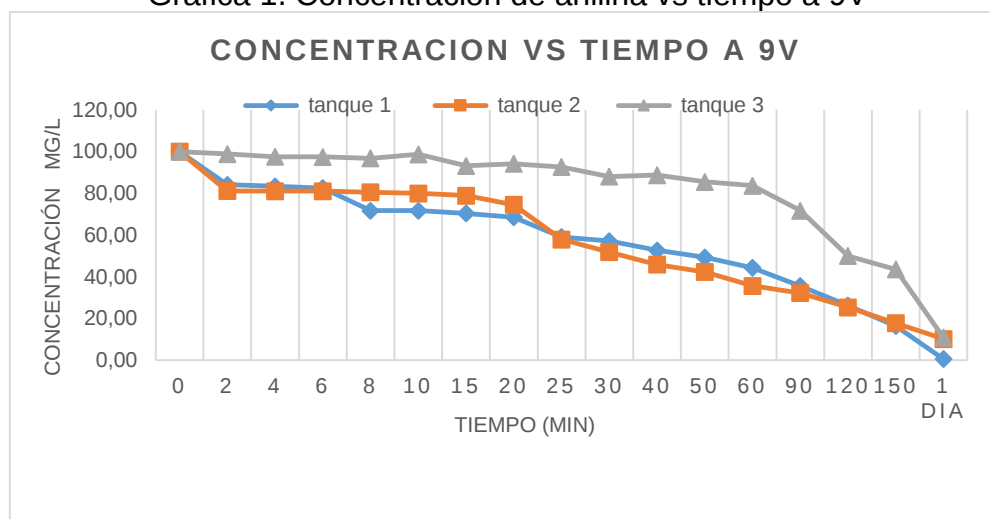
Tanque 1		Tanque 2		Tanque 3	
Volumen	300mL	Volumen	600mL	Volumen	900mL
Electrolito	0,05M	Electrolito	0,05M	Electrolito	0,05M
Peróxido de Hidrógeno	5mL	Peróxido de Hidrógeno	10mL	Peróxido de Hidrógeno	15mL
Voltaje	9V	Voltaje	9V	Voltaje	9V
Intensidad de Corriente	0- 0,03A	Intensidad de Corriente	0- 0,12A	Intensidad de Corriente	0- 0,14A
Ácido Sulfúrico	0,01M	Ácido Sulfúrico	0,01M	Ácido Sulfúrico	0,01M
pH	3- 3,5	pH	3- 3,5	pH	3- 3,5
Concentración Final	0,6 mg/L	Concentración Final	10,19 mg/L	Concentración Final	10,8 mg/L
Eficiencia máx.	99,40%	Eficiencia máx.	89,80%	Eficiencia máx.	89,14%

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente gráfica se compara la degradación de la anilina en los 3 tanques usados y se muestra la degradación en el tiempo de la anilina usando el

método EF; el tanque 1 es el que logra alcanzar la menor concentración final con 0.6 mg/L.

Gráfica 1. Concentración de anilina vs tiempo a 9V

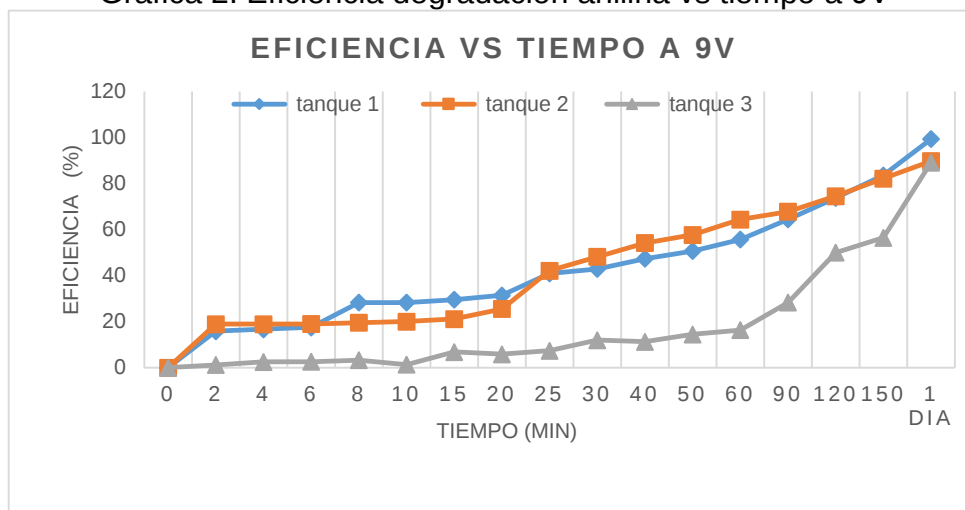


Fuente: Elaboración propia

Según la gráfica de Eficiencia vs Tiempo se puede observar que los porcentajes de remoción logrados para los tres diferentes volúmenes son satisfactorios, el tanque que alcanzó una mayor degradación de anilina fue el de 300 mL con 99,4%, mientras que los tanques 2 y 3 lograron una remoción del 89,8% y 89,14% respectivamente.

En la curva se visualiza que los tanques 1 y 2 tienen un comportamiento similar los primeros 6 minutos, alcanzando una eficiencia del 18%, mientras que el tanque 3 los primeros 15 minutos tiene una menor eficiencia lo cual indica que a mayor volumen a tratar en el reactor EF, se requiere un mayor voltaje para iniciar la oxidación de la materia orgánica. Los tres tanques alcanzan una eficiencia igual o superior a 89% debido a la generación de radicales, sin embargo el tanque 1 mostro un mayor porcentaje de remoción.

Gráfica 2. Eficiencia degradación anilina vs tiempo a 9V



Fuente: Elaboración propia

El reactor de menor tamaño se escogió porque fue el que alcanzó la mayor degradación de anilina, aunque tenía el mismo voltaje que los demás tanques su volumen de agua con anilina era menor, lo cual indica que entre mayor volumen se necesite degradar mayor es el voltaje que se necesita para la degradación del compuesto orgánico.

2.7 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación se muestran los efectos de las variables y los reactivos en el reactor EF:

2.7.1 Efecto de la Intensidad de Corriente y resistencia eléctrica. El flujo de corriente circulado por el área de los electrodos es la variable que controla la velocidad del proceso de la reacción EF, al aumentar el voltaje la reacción electroquímica es más óptima y beneficiada, ya que el voltaje es directamente proporcional a la densidad de corriente, esto permite que la carga transportada por los iones que facilita el agregado de electrolito, incrementa, y de esta forma la anilina que es el compuesto orgánico a tratar es oxidado más eficientemente [26].

Entre menor concentración de compuesto menor conducción eléctrica, debido a que al aplicar el mismo voltaje la corriente circulante es menor. A mayor carga orgánica existente en el agua modelo se produce una resistencia con el flujo de corriente entre los electrodos lo cual dificulta la carga eléctrica entre el ánodo y el cátodo [27].

2.7.2 Efecto del pH. Mediante el agregado de la disolución de ácido sulfúrico a 0,01M al agua modelo de anilina se mantiene y se ajusta un pH entre 3. El pH es de gran importancia para la oxidación y reducción del hierro ya que un pH menor a 3 permite que el hierro se encuentre en solución mientras que si es mayor a 3 el hierro se encuentra en forma coloidal o se precipita; El pH menor a 3 permite que la reacción sea auto catalítica ya que el Fe^{+3} a través del mecanismo en cadena altera el peróxido de hidrógeno formando moléculas de oxígeno y agua [28].

2.7.3 Efecto del Peróxido de Hidrógeno y Sulfato de Sodio. El peróxido es el agente oxidante, el cual junto con el hierro genera los radicales hidroxilo los cuales son los que degradaran la anilina separando sus componentes químicos [29].

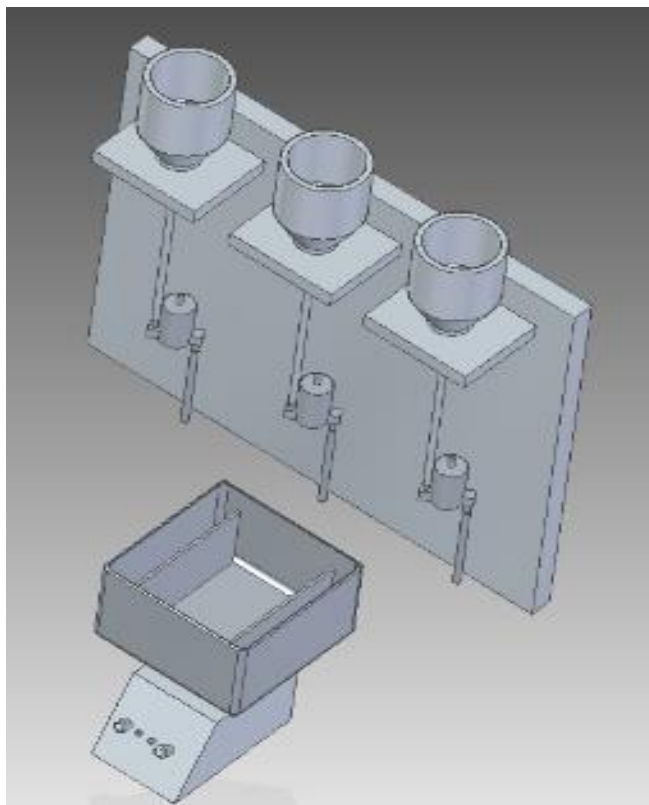
El sulfato de sodio es un electrolito fuerte ya que al disolverse en agua se rompe y produce iones positivos de Sodio (Na) y negativos sulfato (SO_4) los cuales poseen un potencial de oxidación y reducción que causan que el agua se descomponga permitiendo el transporte de carga en la reacción electroquímica es decir la corriente [29].

En el reactor EF se visualizaron burbujas de gas las cuales corresponden a partículas de hidrógeno y oxígeno, esto se crea ya que el peróxido de hidrógeno se descompone para generar la oxidación y reducción del hierro en hidrógeno y en oxígeno, los iones de hidrógeno por ser positivos se dirigen al electrodo negativo (ánodo) y los de oxígeno al ser negativos se transportaran al electrodo positivo (cátodo), cuando se mezcla el hierro con el peróxido de hidrógeno, el hierro se oxida y se generan iones hidroxilo y radicales hidroxilo. El sulfato de sodio es el electrolito que se encarga de cerrar el circuito o celda electrolítica, es decir, transporta los electrones en el reactor, y el ajuste de pH en 3, se encarga de que la reacción sea auto catalítica, es decir que siempre haya reducción y oxidación en el hierro. El radical hidroxilo en la reacción es el que tiene el mayor potencial, es decir, es el protagonista en la reacción según la tabla de potenciales de reducción Fuerza electromotriz (FEM), eficiente para degradar materia orgánica [27].

2.8 CONSTRUCCIÓN EQUIPO EF

De acuerdo con las pruebas de diseño experimental se construyó el equipo EF conformado por:

Figura 3. Diseño equipo para la reacción electrofenton



Fuente: Autoría propia en software Solid Edge ST7

Agitador magnético: Encargado de la aireación en el reactor EF, suministrado por el laboratorio de la facultad de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás.

Reactor EF: Construido con medidas de 9.2 cm * 10 cm * 8 cm con volumen graduable hasta 600 mL, el reactor está conformado por dos electrodos de hierro de 1 mm de espesor y un área de 45 cm².

Electroválvulas: Son tres electroválvulas que permiten la dosificación de los reactivos, estas son manipuladas por el usuario y provistas de energía por el hardware (PCB) diseñado y construido.

Tanques contenedores de reactivos: Son tres tanques con capacidad de 500 mL los cuales almacenan cada uno de los reactivos como la disolución de ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno y sulfato de sodio.

Hardware: Componente encargado de energizar las electroválvulas y suministrar la energía para los electrodos (ver capítulo hardware).

Tarjeta de adquisición de datos (DAQ): Dispositivo que permite la comunicación entre hardware y software (ver capítulo software).

Software: Programa mediante el cual el usuario controla la cantidad de reactivos que se agregan al reactor mediante las electroválvulas y controla el voltaje suministrado a los electrodos.

Espectrofotómetro: Equipo encargado de la medición de absorbancia de las muestras de la anilina en la reacción EF.

Figura 4. Equipo para la reacción EF



Fuente: Autoría propia

2.9 COMPROBACIÓN EQUIPO EF

El reactor con volumen de 300 mL fue sometido a tres pruebas con diferente voltaje para verificar con que voltaje se conseguirá la mayor remoción de anilina. Para esta pruebas se Integraron hardware y software (ver capítulo 3 y 4).

2.9.1 Pruebas de variación de voltaje. El Radical hidroxilo encargado de la oxidación de la anilina tiene un potencial de oxidación de 2,8V, en el agua a 25°C [8] por esta razón no se realizan pruebas para la degradación de la anilina aplicándole un voltaje menor a este, y se decide aplicar 3V, 6V y 9V para cada prueba con un tiempo de 150 minutos, en estas pruebas el área de los electrodos es la misma 45 cm².

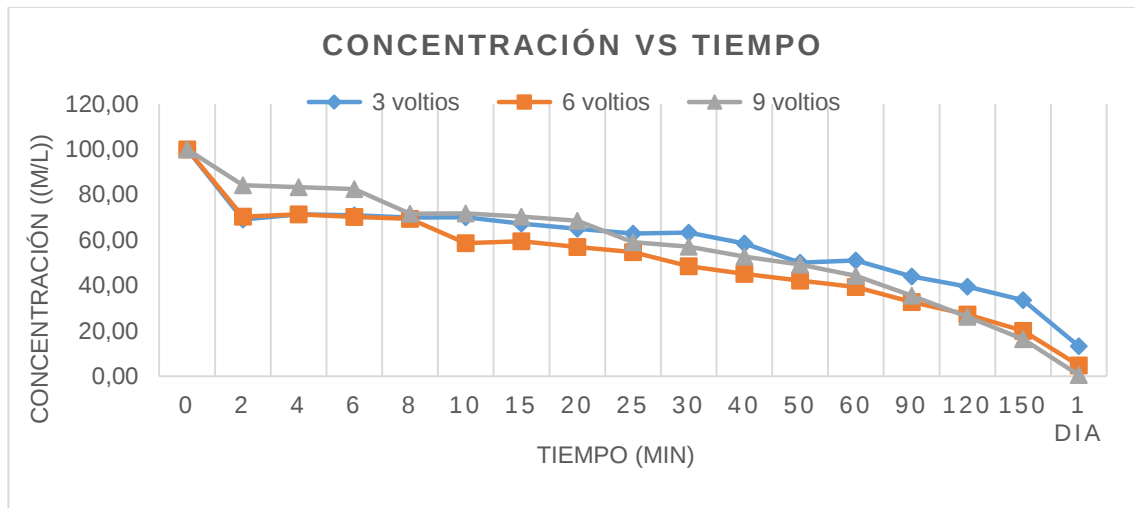
Tabla 3. Resultados pruebas a diferentes voltajes del método EF con concentración inicial 100mg/L de anilina.

Voltaje	3V	Voltaje	6V	Voltaje	9V
Volumen	300mL	Volumen	300mL	Volumen	300mL
Electrolito	0,05M	Electrolito	0,05M	Electrolito	0,05M
Peróxido de Hidrógeno	5mL	Peróxido de Hidrógeno	5mL	Peróxido de Hidrógeno	5mL
Intensidad de Corriente	0-0,05A	Intensidad de Corriente	0-0,04A	Intensidad de Corriente	0-0,03A
Ácido Sulfúrico	0,01M	Ácido Sulfúrico	0,01M	Ácido Sulfúrico	0,01M
pH	3- 3,5	pH	3- 3,5	pH	3- 3,5
Concentración Final	13,23 mg/L	Concentración Final	4,87 mg/L	Concentración Final	0,59 mg/L
Eficiencia máx.	86,70%	Eficiencia máx.	95,10%	Eficiencia máx.	99,40%

Fuente: Elaboración propia

El primer grupo de datos corresponde a un voltaje constante de 3V y se midió una corriente de 0-0,05A, el segundo grupo de resultados obtenidos a 6V generó una corriente de 0-0,04A y el tercer grupo de datos a 9V presenta corriente de 0-0,03A. Cabe resaltar que las variables constantes en las tres pruebas fueron el pH fijado en 3, la cantidad de sulfato de sodio y peróxido de hidrógeno.

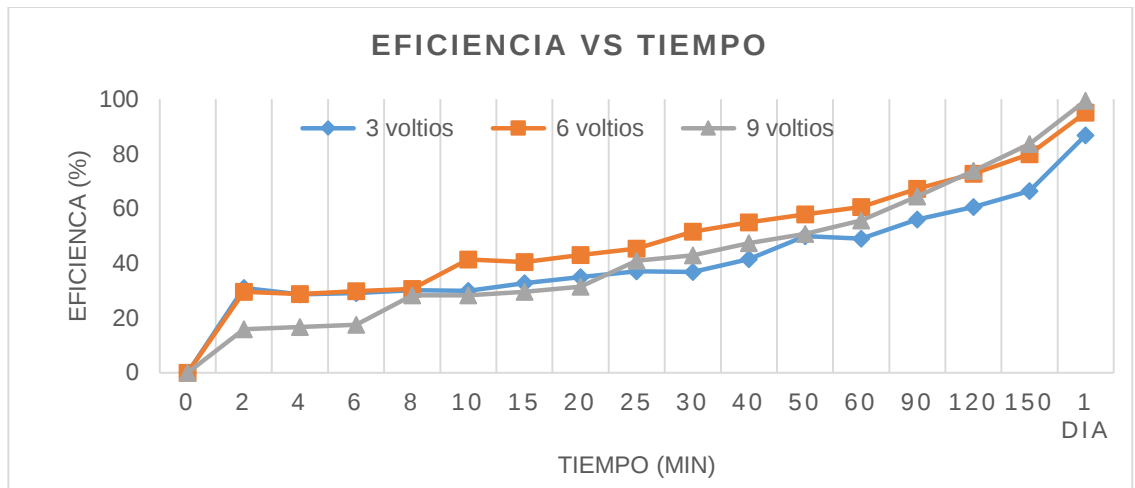
Gráfica 3. Gráfica concentración en el tiempo de la degradación de anilina.



Fuente: Elaboración propia

La concentración de anilina fue removida satisfactoriamente para el tanque 1 a diferentes Voltajes, se identificó una concentración final a 3V de 13,2 mg/L, a 6V una concentración final de anilina de 4,8 mg/L y una concentración final a 9V de 0,6 mg/L, esto ocurre porque al aumentar el voltaje aplicado a la celda electroquímica la velocidad de la reacción EF genera mayor producción de radicales encargados de la oxidación de la anilina

Gráfica 4. Eficiencia vs Tiempo de la degradación de anilina.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se evidencia que la remoción máxima se genera en los 2 primeros minutos para las tres pruebas al aplicar 3V, 6V y 9V, después de 60

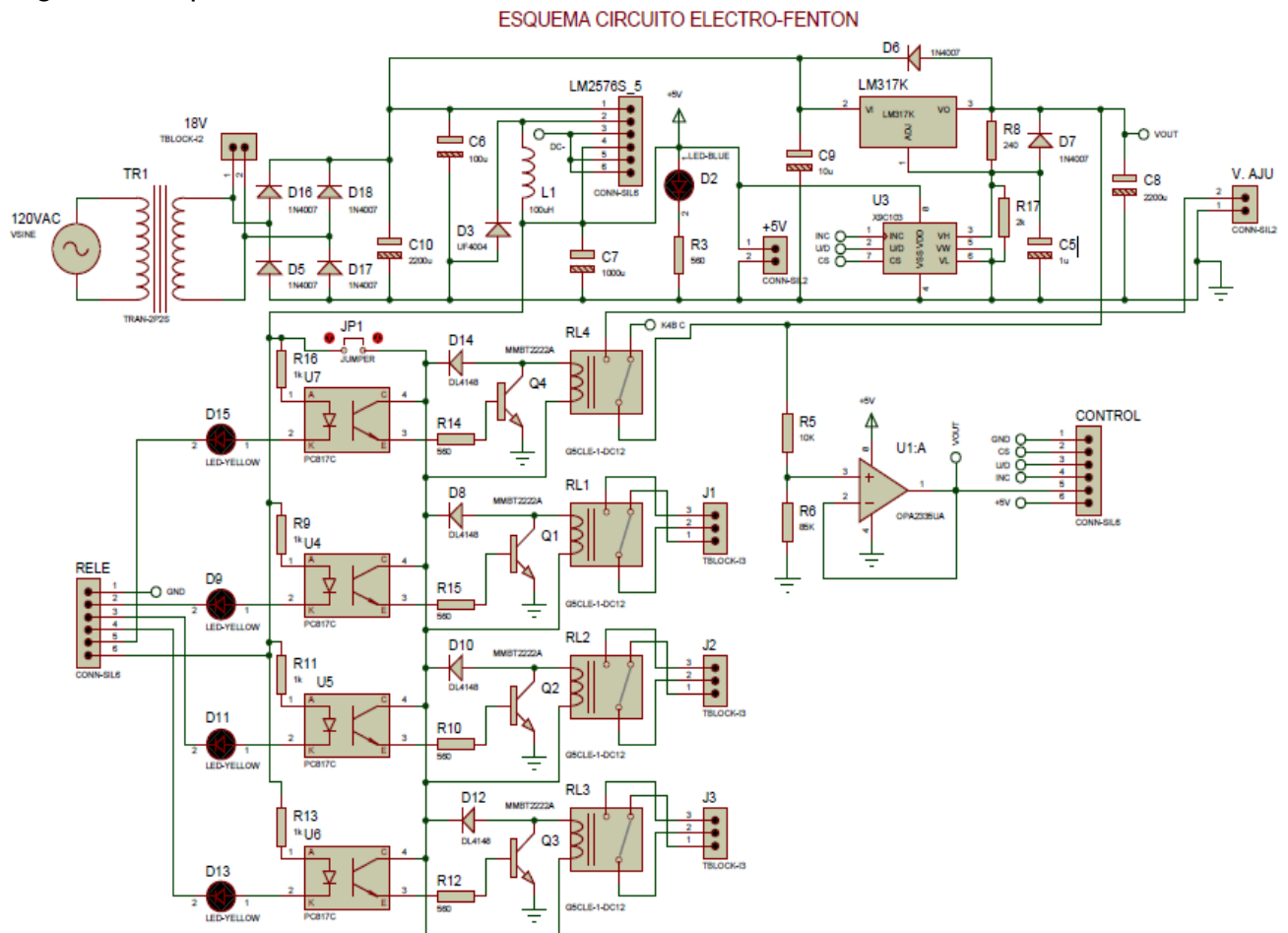
min a un voltaje de 3V se pierde fuerza en la reacción disminuyendo la eficiencia con respecto a los otros voltajes alcanzando 86,7% de remoción de anilina, mientras que a 6V y 9V se alcanzan eficiencias de 95,1% y 99,4%, demostrando la gran capacidad que tiene la reacción EF para degradar compuestos orgánicos como la anilina.

De acuerdo con la tabla de potenciales eléctricos fuerza electromotriz (FEM) potencial de celda, se necesitan mínimo 0.77 V para que el hierro se reduzca de hierro Fe^{3+} a hierro Fe^{2+} ; el hierro Fe^{+3} actúa con el peróxido de hidrógeno para que este se descomponga en iones hidroxilo e hidrógeno, por lo cual se requiere un voltaje de 1.31 V, debido a esto se generan radicales hidroxilo encargados de la oxidación del compuesto orgánico lo que exige un voltaje de 2.06 V en condiciones de temperatura ambiente [8].

3. HARDWARE

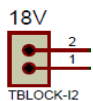
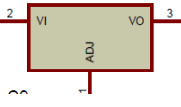
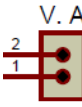
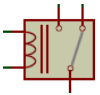
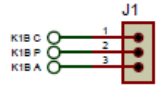
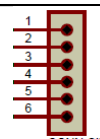
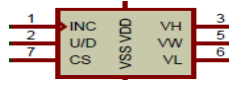
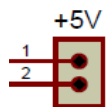
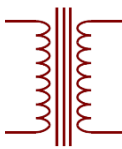
En el presente capítulo se discutirán las funciones y el diseño del circuito que se elaboró para la automatización del Reactor Electro Fenton (Ver Figura 4 y Tabla 4).

Figura 5. Esquema Circuito Electro-Fenton



Fuente: Proteus 8. Profesional

Tabla 4. Nomenclatura de los símbolos de los componentes electrónicos.

Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
	Conector Transformador		Tierra GND
	Diodo		LM317K
	Condensador		Conector de Ajuste
	LED		Relevo
	Resistencia		Transistores
	Bobina		J1, J2, J3 Conector Electroválvulas
	Integrado LM2576S_5		Opto Transistor
	Potenciómetro Digital		Conector 5V
	Transformador		Conector
	Fuente Monofásica		

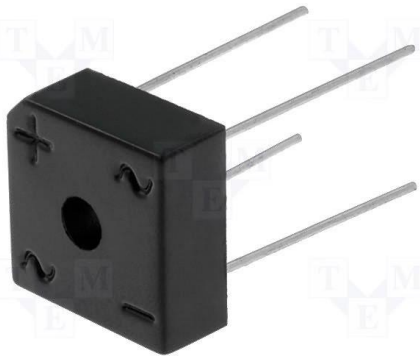
Fuente: Proteus 8. Profesional

las electroválvulas es necesaria una cantidad de corriente mayor a la que entrega la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), este consumo es facilitado por la fuente de alimentación primaria, para evitar la sobrecarga de la Tarjeta de Adquisición de Datos [30].	
---	--

3.2.2 Proveer voltaje a electrodos: Los componentes electrónicos del suministro de voltaje para los electrodos, se muestran a continuación con sus respectivas funciones en el hardware diseñado.

Tabla 6. Componentes electrónicos del circuito con sus funciones

Componentes electrónicos y función	Imagen
Fuente Conmutada Es la encargada de obtener un voltaje con la menor disipación de energía para poder manipular el potenciómetro digital y el circuito de relevos [30]. Integrado LM2576S_5 Cumple la función de ser una fuente fija de 5 voltios de tipo step-down [31], encargada de energizar el potenciómetro digital y las electroválvulas.	
Transformador EI509 Recibe la tensión de una fuente monofásica cuyas características son 120 módulo regulador de voltaje (VRMS) y se encarga de transformar dicha tensión a 18 módulo regulador de voltaje (VRMS), con el fin de energizar el circuito diseñado [30].	

Puente Rectificador Rectifica la señal de corriente alterna proveniente de la salida del transformador que junto con un condensador que actúa como filtro permiten obtener DC con la cual se energizara la totalidad del circuito [32].	
Potenciómetro Digital X9C103P Permite la variación de la resistencia mediante un tren de pulsos establecido en un rango de valores entre 100 ohm y 10k. En el circuito el potenciómetro digital permite la manipulación desde LabVIEW y él, se conecta a la fuente ajustable LM317K para variar los rangos de voltaje [33].	
Integrado LM317K Es un integrado comercializado por Texas Instruments [34] que actuara en el circuito como un regulador de voltaje el cual varía entre 1,4 y 10 voltios, es quien controla y regula la tensión eléctrica de los electrodos. Esta unidad es controlada por LabVIEW.	
Integrado OPA 2335 Es un integrado que funciona como un amplificador operacional [35] y se utiliza en el circuito, para que el valor de impedancia o resistencia no afecte la tarjeta de adquisición de datos. Se utiliza como un seguidor de voltaje de alta precisión.	

Fuente: [30]- [35]

3.3 FUNCIONAMIENTO CIRCUITO

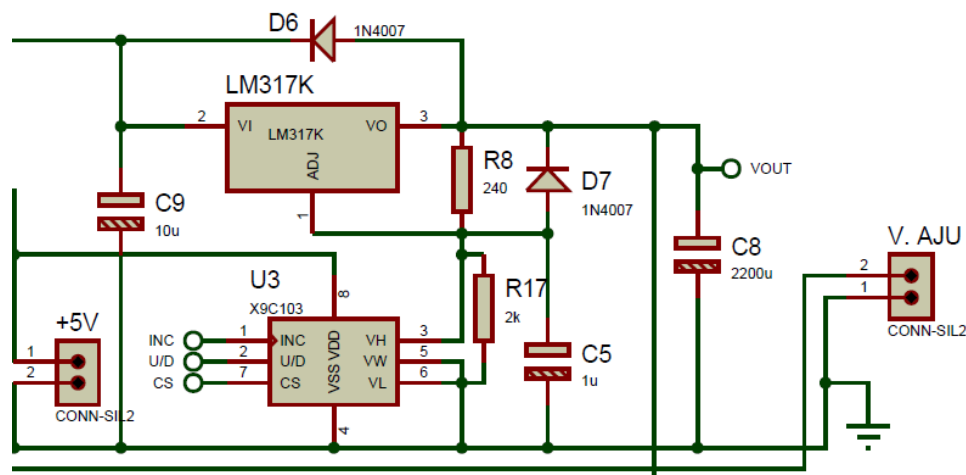
A continuación se explica de forma más específica el funcionamiento del circuito:

3.3.1 Habilitación de electroválvulas. Para su adecuado funcionamiento es necesario conocer las propiedades de las electroválvulas adquiridas y de la tarjeta de adquisición de datos a manipular; la DAQ supe entre 2.5V DC hasta 5V DC conectando entradas y salidas análogas y digitales, su fuente de alimentación es de 5V y su potencia es de hasta 200 mA, cabe resaltar que su límite de corriente por línea es de 8.5mA [36], mientras que las electroválvulas funcionan con mínimo con 1A, por tanto se requieren utilizar relevos que proporcionan hasta 10A, permitiendo su activación.

Los relevos seleccionados se energizan por la fuente conmutada, para la apertura y cierre de las electroválvulas y estas son comandadas por el software LabVIEW cuyo intermediario entre la comunicación del circuito y el software es la tarjeta de Adquisición de datos (DAQ).

3.3.2 Proveer Voltaje a los electrodos. En esta fase del circuito por medio de LabVIEW se manipulan los rangos del voltaje desde 1.4V hasta 10V dados por el usuario para manejar la reacción EF, y por esto se realizó una fuente de voltaje ajustable con los componentes LM317k [31] y potenciómetro digital [33].

Figura 6. Fuente de Voltaje Ajustable



Fuente: autoría propia, diseñado en software Proteus

Se requiere un integrado para variar el voltaje de los electrodos, el convertidor tipo Boost que es una fuente conmutada no se implementó ya que se requieren conocimientos previos en procesos de control electrónicos; el Integrado LM2576_adj requiere de bastantes componentes electrónicos de mayor costo

y difícil adquisición mientras que el LM317k es de fácil armado y manipulación, tiene menor complejidad de implementación y es un producto accesible.

El integrado LM317k es un regulador de voltaje que puede proveer 1.25V a 37V ajustables [34], para poder variar esos niveles de voltaje se requiere de dos resistencias en su configuración básica, estas resistencias hacen parte de un divisor de tensión, para poder manipular desde LabVIEW estos niveles de tensión es requerido un potenciómetro digital el cual se conecta al divisor de tensión ya mencionado, y así poder proveer a los electrodos la energía necesaria o deseada para el reactor EF.

En el mercado se encuentran diferentes potenciómetros digitales como son el X9C102 = 1K Ω , X9C103 = 10K Ω , X9C503 = 50K Ω y X9C104 = 100K Ω , de los cuales se eligió el potenciómetro digital X9C103 que al tener una resistencia máxima de 10K Ω es la adecuada para suplir la amplitud deseada.

Para tener el control de manejar los niveles de tensión desde el software, el circuito al iniciar cambia al mínimo voltaje (1.4V), esto se produce porque el potenciómetro digital cambia a la resistencia más baja que puede programar, luego se consulta al usuario el voltaje deseado para la reacción EF, se recalcula la resistencia que debería tener el potenciómetro para alcanzar el voltaje deseado, una vez calculado el número de pulsos necesarios, el potenciómetro alcanza la resistencia anteriormente calculada; se generan los pulsos, se mide el voltaje y se pregunta al usuario si dicho voltaje es de utilidad para continuar la reacción EF.

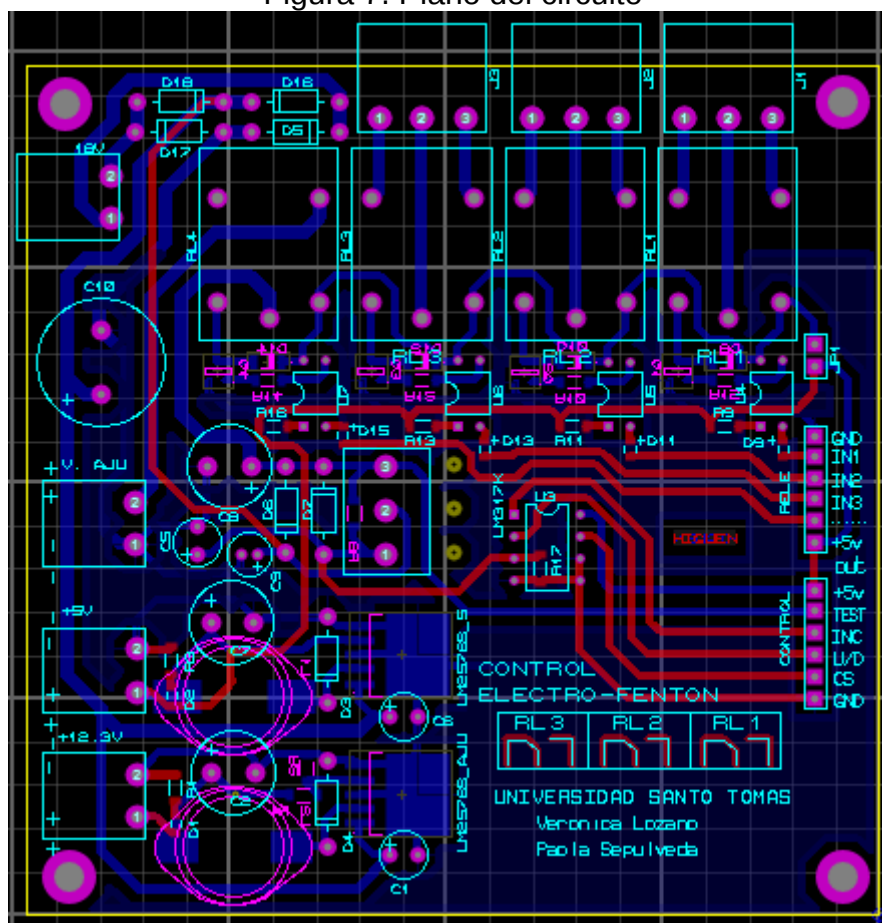
Desde LabVIEW se mandan tramas de pulsos de señales cuadradas, que son transferidas por la DAQ para variar su resistencia, esto permite incrementar o disminuir el voltaje, y por medio del software se envía la orden al circuito para energizar los electrodos del reactor EF.

3.3.3 Control de la Reacción EF. Permite la activación y desactivación de la fuente de voltaje ajustable, posee un disipador que dispersa altas temperaturas, una fuente conmutada que ayuda a que no hayan mayores pérdidas de energía, una vez establecido el voltaje por el usuario y suministrado a los electrodos este se mantendrá hasta que la reacción EF finalice.

3.4 DISEÑO DEL PCB

Se realizó el plano digital de los componentes electrónicos requeridos para el cumplimiento de las funciones del hardware como se profundizó previamente, se ensambló posteriormente en forma esquemática el plano del circuito en el software electrónico Proteus mediante la creación del Printed Circuit Board (PCB) que fue de utilidad no solo para el desarrollo del diseño sino también para la simulación de la tarjeta electrónica. Los cálculos de las resistencias y otros componentes utilizados en el PCB fueron calculados en MatLAB y verificados por este software; una vez se cumplieron las condiciones requeridas fue impreso de acuerdo al esquema que se muestra en la Figura 5.

Figura 7. Plano del circuito

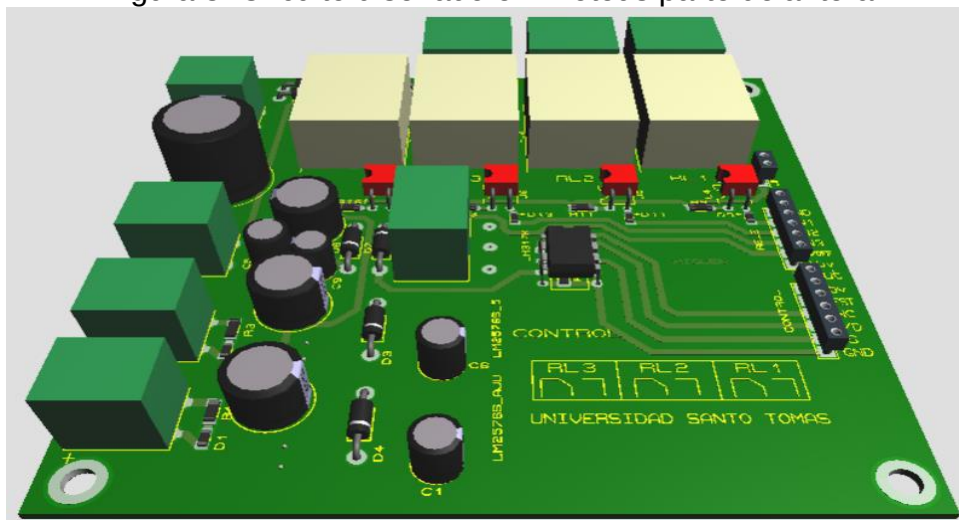


Fuente: autoría propia diseñado en software Proteus.

En el software Proteus en la sección de ARES se elaboró el diseño, el cual es el que se va a imprimir. En este programa se realiza un simulador del circuito, se dibujan los esquemáticos electrónicos y se editan los encapsulados de los componentes electrónicos. En ARES se editan las piezas de tal forma que cuando se organizan, queda un diseño que cumple los requerimientos para el circuito impreso.

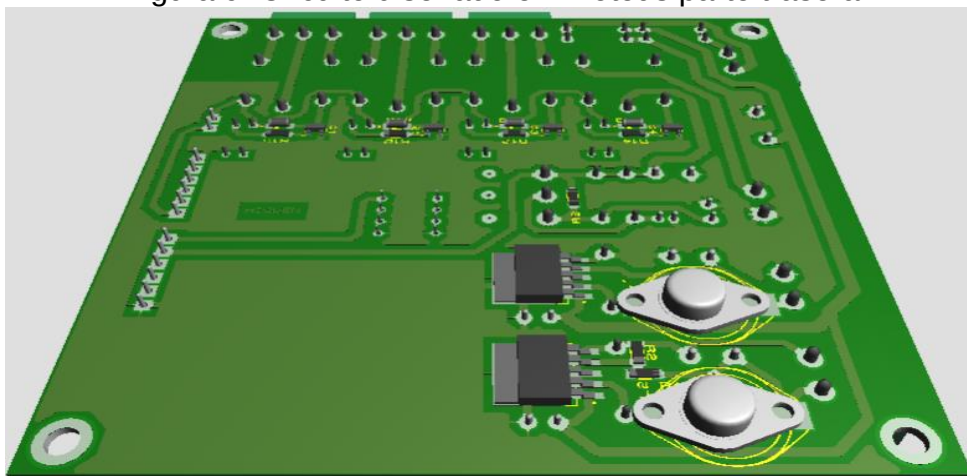
En las siguientes figuras 3D se muestra la tarjeta, la cual tiene los componentes electrónicos esquematizados, y los caminos de conexión; también posee las entradas y salidas del hardware.

Figura 8. Circuito diseñado en Proteus parte delantera



Fuente: autoría propia software Proteus

Figura 9. Circuito diseñado en Proteus parte trasera



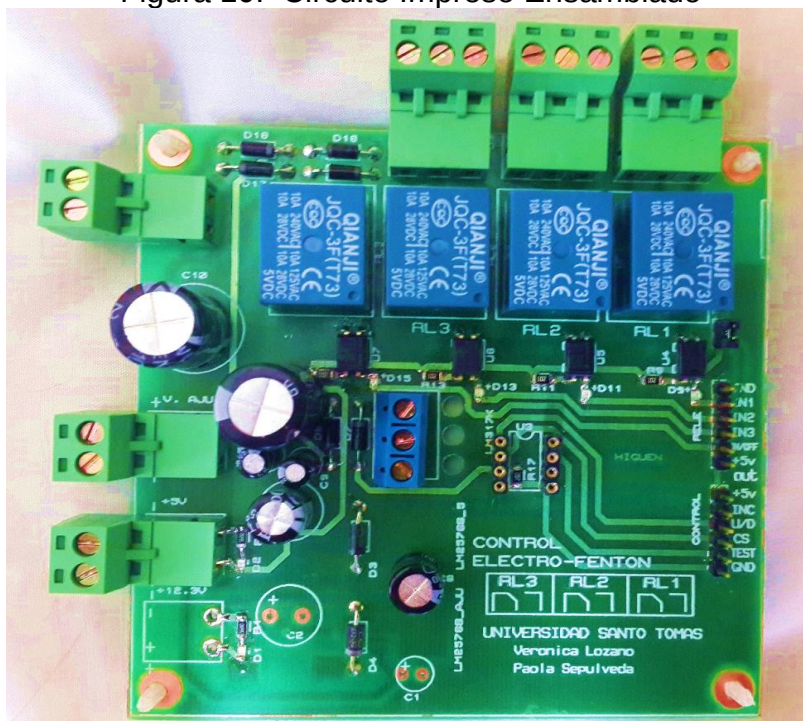
Fuente: autoría propia software Proteus

3.5 CIRCUITO IMPRESO

Una vez diseñado el PCB se elaboró una tarjeta impresa para el reactor EF y se procedió al ensamble de los componentes electrónicos, primero fueron soldados aquellos de menor tamaño como las resistencias, los diodos y transistores, luego los conectores, condensadores, el potenciómetro digital, los relevos y por último los cables de conexión hacia la DAQ.

Posterior a su ensamble se realizaron pruebas para la verificación del correcto funcionamiento del PCB donde se comprobó que este habilita las electroválvulas suministrándole el voltaje requerido para la dosificación de cada uno de los reactivos, así mismo alimenta a los electrodos del reactor EF con el voltaje establecido por el usuario desde software LabVIEW.

Figura 10. Circuito Impreso Ensamblado



Fuente: Elaboración propia en Proteus

La ventajas de tener un PCB para el reactor EF es que las pérdidas de energía son menores a las que se producen en una protoboard, además el funcionamiento del circuito en un PCB es mucho más estable y duradero, brinda menores errores al tener todos los componentes electrónicos de forma organizada.

Este circuito reemplaza una fuente de alimentación convencional e independiente para habilitar las electroválvulas y para generar el voltaje de los electrodos del reactor EF. Al realizarse el PCB se tuvo en cuenta que fuera capaz de automatizar el proceso para que ocurra la reacción EF en el reactor.

4. SOFTWARE Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

LabVIEW es un software que mediante la programación gráfica facilita y permite la construcción de un instrumento para desarrollar sistemas sofisticados de pruebas, medida y control de todo tipo de plantas, todo esto usando íconos gráficos e intuitivos que parecen un diagrama de flujo. LabVIEW tiene un conjunto de herramientas que son utilizados para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos y así ayudar a usuarios a la solución de problemas , ya que ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas [37].

4.1 FUNCIÓN DEL SOFTWARE

En el software LabVIEW se realizó la programación gráfica del reactor electro-Fenton. Que tiene como función que permitir el registro de los usuarios, la dosificación de los reactivos mediante la apertura y cierre de tres electroválvulas, la variación del voltaje de los electrodos, el tiempo de la reacción, el almacenamiento de datos y su representación gráfica de los valores de absorbancia obtenidos del espectrofotómetro UV visible y la generación de un informe con dichos resultados. A continuación se explica cómo se dará cumplimiento a las funciones del software:

- 4.1.1 **Registro de usuarios.** Se crea una interfaz entre el software y el usuario que permite acceder como estudiante, docente u otro, insertar sus datos e ingresar al entrenamiento del reactor EF.
- 4.1.2 **Entrenamiento.** En esta sección del software, el usuario debe identificar cada uno de los componentes del reactor EF, reconociéndolos por el movimiento del cursor en la imagen del reactor EF que indica sus partes con su respectivo nombre (ver Anexo E).
- 4.1.3 **Dosificación de los reactivos por medio de las electroválvulas.** El usuario una vez identifica el manejo del reactor EF, se dispone a insertar las cantidades de volumen de disolución del peróxido de hidrógeno, sulfato de sodio y ácido sulfúrico, una vez se da clic en continuar, las electroválvulas son activadas para dispensar la cantidades insertadas por el usuario (ver anexo E).
- 4.1.4 **Variación del voltaje de los electrodos.** Permite que el usuario inserte el voltaje deseado en los rangos de 1.4V a 10V para la reacción EF.

4.1.5 Control del tiempo. Una vez el usuario acepta el voltaje de salida para los electrodos, inicia el tiempo de la reacción EF, mediante pruebas de laboratorio se estableció un tiempo de 150 minutos (ver capítulo 2), cabe aclarar que el usuario puede disminuir, interrumpir y extender este tiempo.

4.1.6 Almacenamiento de datos, representación gráfica y generación de informe: Cuando se da inicio a la reacción EF, se generan cuadros de diálogo para insertar los valores de absorbancia cada determinado tiempo, estos se van almacenando para construir una representación gráfica en la misma interfaz con el usuario y al finalizar la reacción EF se puede generar un informe con dichos resultados.

4.2 DISEÑO DEL SOFTWARE

Para el diseño del software se usó la plataforma gráfica de LabVIEW que posee un panel frontal conformada por controles, indicadores y variables, este también contiene un diagrama de bloques compuesto por estructuras y modelos de programación. Se realizó la compilación y ejecución del programa diseñado, que se compone por estructuras de programación por eventos y programación tipo máquina de estados, lo anteriormente nombrado se explicara a profundidad en el presente capítulo, así mismo, el manejo y el sistema de adquisición de datos vía DAQ y las comunicaciones a través del puerto serial de esta.

4.2.1 Panel Frontal. Es la interfaz hombre-máquina en la que el usuario tiene acceso a datos del algoritmo diseñado

Paleta de controles e Indicadores. En el panel frontal se muestran los controles e indicadores que sirven para visualización, ingreso y muestra de datos al usuario; existen diferentes tipos de variables como las numéricas, las booleanas, las cadenas de caracteres y los contenedores [38], [39].

En el panel frontal se diseñó una interfaz de usuario que permitió transmitir entradas y salidas de datos, aprobando la modificación de los controles y la posibilidad de visualizar los resultados; estos controles son creados con boléanos que representan gráficamente en LabVIEW una perilla, un botón o un deslizador, mientras que los indicadores son las gráficas, tablas, Leds y secuencias de estado; mediante una herramienta es posible simular estos datos y representarlos [40].

Tabla 7. Variables del software LabVIEW

Variable	Indicador	Control
----------	-----------	---------

Numéricos		
	Representa números enteros o reales y en la sección de registro para insertar el número de documento	Son usados para representar números enteros o reales y en el software se usó para variar el voltaje de los electrodos
Booleano		
	Son Leds fueron para la identificación de los componentes del Reactor EF en la sección de entrenamiento.	Funcionan como botones de mando ej. Detener, empezar, continuar salir
Cadena de caracteres		
	Recibe texto ej. nombre de usuario	Muestra cuadros de texto y tablas al usuario ej. seleccione su cargo

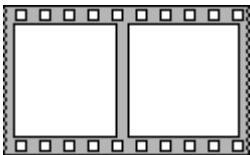
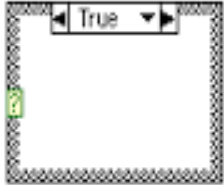
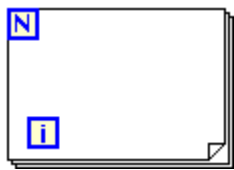
Fuente: [40]

4.2.2 Diagrama de bloques. Es el ambiente de desarrollo en donde se describe gráficamente el algoritmo que permite el funcionamiento del sistema [40], por lo cual el software contiene herramientas de alto y bajo nivel mediante las cuales se da el máximo uso al computador donde estará instalado; esta ventana permitió la programación del algoritmo desarrollado para el control del reactor EF, la cual no es visible al usuario.

4.2.3 Objetos y Estructuras. Las estructuras permiten la ejecución de instrucciones y aseguran un orden secuencial y Los objetos de los diagramas de bloques incluyen terminales, subVIs, funciones, estructuras y cables que conectan los elementos del diagrama [41].

Tabla 8. Objetos y estructuras del software LabVIEW

Nombre	Imagen	Función
--------	--------	---------

Flat Sequence		Es una estructura de organización de programa, donde se expuso el algoritmo de voltaje y electroválvulas de forma más sencilla.
Case Structure		Esta estructura define los casos y establece diferentes opciones permitiendo la ejecución del código de forma ordenada, siempre van conectadas a variables numéricas, booleanas o tipo cadena de caracteres, fue usada para la programación tipo máquina de estados que será explicado más adelante, y es usada en el VI principal.
While Loop		Es una estructura de repetición de ciclos que sirve para la verificación y control de la ejecución del algoritmo, es de gran importancia ya que es usada en la mayoría de subVI del software y en el VI principal permitiendo detenerse o salir del programa.
For Loop		La estructura For Loop tiene un funcionamiento similar al while loop, ya que repite los ciclos pero se diferencian en que esta estructura posee un control de repeticiones; en el software fue fundamental para el algoritmo de control de voltaje.

Fuente: [38], [39] y [40].

4.2.4. Patrones de diseño de los modelos de programación. Para desarrollar el programa en LabVIEW de una mejor forma se siguieron técnicas de programación sistemáticas, existen diferentes tipos de patrones de diseño entre los cuales existen bucles simples y múltiples bucles, los primeros están formados por VI simple, VI general y máquina de estados y los segundos por bucles paralelos, maestro/esclavo y productor/consumidor que consiste en procesar los datos en paralelo con otro procesamiento de análisis a partir de estructuras cíclicas [39], permite el intercambio entre múltiples bucles produciendo datos y consumiéndolos, sin embargo, presenta desventajas al no proporcionar sincronización entre bucles, si los datos no están en un cluster solo lee un tipo de dato, no integra eventos no relacionados con la interfaz de usuario [39]; por tanto, la estructura usada para el desarrollo y diseño del software es la creación

de bucles simples por medio de tres diferentes estructuras de programación como lo es el controlador de eventos de interfaz de usuario, máquina de estados y variables globales funcionales, a continuación serán profundizadas y explicadas para una mayor comprensión del diseño del software.

4.2.4.1 **Controlador de eventos de interfaz de usuario.** A continuación se explica brevemente la estructura de programación por eventos y su importancia para el diseño del software EF:

Tabla 9. Estructura Eventos del Software LabVIEW

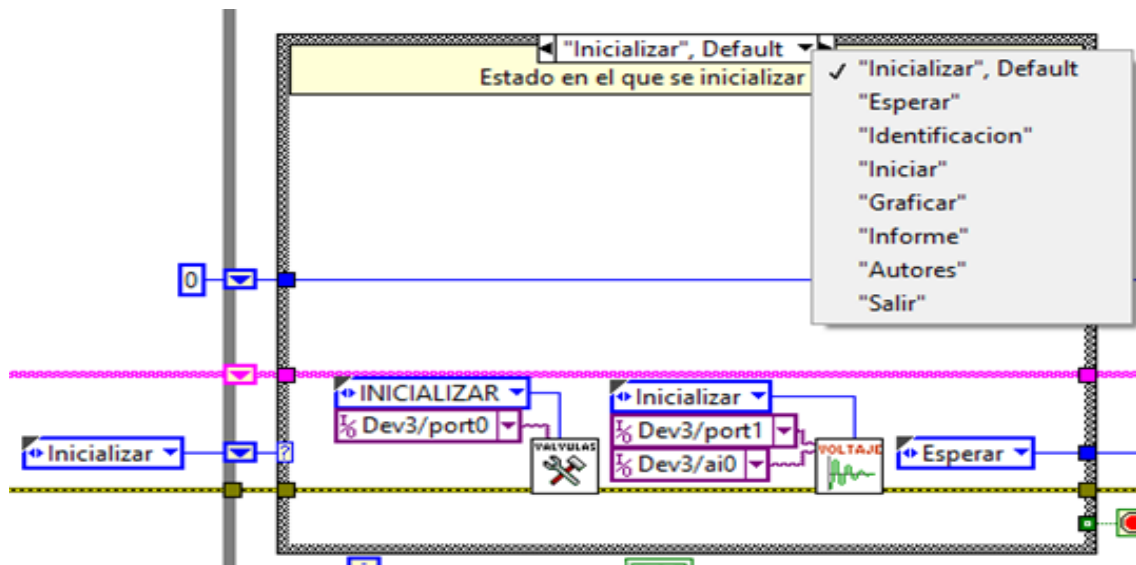
Nombre	Imagen	Función
Event Structure		Estructura que se encarga de esperar hasta que ocurra un evento de operaciones realizadas por el usuario o software, esta estructura es de gran importancia para el VI principal porque está asociada con el cumplimiento de las acciones que ocurren entre el usuario y el software; cabe resaltar que esta estructura incluye una arquitectura potente y eficaz a la hora de controlar la interacción del usuario con LabVIEW.

Fuente: [42].

4.2.4.2 Máquina de Estados. La máquina de estados es una estructura que se compone de diferentes etapas, cada una de ellos representa una actividad o función, y puede ser posible pasar de un estado a otro si se conmuta de esta forma, tiene un sistema de entradas y salidas que controla el funcionamiento de un VI por medio de una secuencia y normalmente tiene una fase de arranque y cierre.

Es un modelo de programación que posibilita simplificar procesos y hacer más pequeño el diagrama de bloques, pasar de un estado a otro y es una de las formas de programación óptima para facilitar la lectura y reducir la complejidad al momento de implementar un algoritmo ya que tiene conexión y ajuste, un diseño jerárquico y está bien estructurado a nivel de archivos [40].

Figura 11. Máquina de Estados del Software LabVIEW

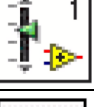


Fuente: autoría propia software LabVIEW

Para el diseño del software se hizo una máquina de estados en el VI principal que más adelante será explicado con mayor detenimiento, por ahora se pretende mostrar cómo se usó esta estructura de programación. La máquina de estados consta de una estructura while, una estructura case (ver Tabla 8.), y un registro de desplazamiento que almacena los datos, cada estado representa una acción a realizar como lo es: inicializar, esperar, identificación, iniciar, graficar, informe, autores y salir, esta máquina de estados contiene los VIs y códigos que permiten su ejecución, el registro de desplazamiento permite una comunicación entre los estados [37].

4.2.4.3 Variables Globales Funcionales. Las Variables globales funcionales son VI que permiten realizar acciones sobre los datos globales cuyas ventajas son almacenar datos mientras el VI este en la memoria, de acuerdo a la selección de entrada se realizan operaciones y su función principal es proteger el código de programación diseñado [39], [40]; en la siguiente tabla se visualizan los iconos de cada variable global funcional programada de los VIs y Sub-VIS que componen el software de control de la reacción EF.

Tabla 10. Iconos del VI y los SubVIs usados en el software

Icono	Nombre	Función
	Control válvulas	El VI se diseñó para controlar la apertura y cierre de las electroválvulas dosificadoras de los reactivos de la reacción EF
	Control Voltaje	El VI tiene como función controlar el voltaje de los electrodos de la reacción EF
	Estados	Permite la definición de las actividades a ejecutar
	CheckList	Este subVI se creó para facilitar el registro de la lista de comprobación de todos los componentes que debe tener el equipo reactor EF
	Autores	En este subVI se visualizan datos de autoría del software
	Detener	SubVI encargado de detener la reacción EF, en caso de que el usuario ordene hacerlo
	Válvulas	Mediante este SubVI se integran el SubVI de tiempo y VI de control de válvulas con el fin de suministrar el volumen insertado por el usuario de los reactivos.
	Establecer Voltaje	A partir de este subVI se ordena al circuito suministrar el voltaje de salida para los electrodos ordenado por el usuario
	Tiempo	Funciona como contador para otros Vis
	Generar Reporte	En este subVI se genera un informe de los datos recolectados de absorbancia
	Graficar	En este subVI se toma los datos de absorbancia en el tiempo de la reacción EF y genera una gráfica de la degradación de anilina
	Entrenamiento	Este subVI permite el reconocimiento y aprendizaje de los componentes que conforman el equipo EF
	Fijación del voltaje	El usuario fija el voltaje alcanzado por el hardware en este subVI
	Principal	El VI principal integra todas las variables globales a ejecutar, brindando una interfaz usuario software de la reacción EF

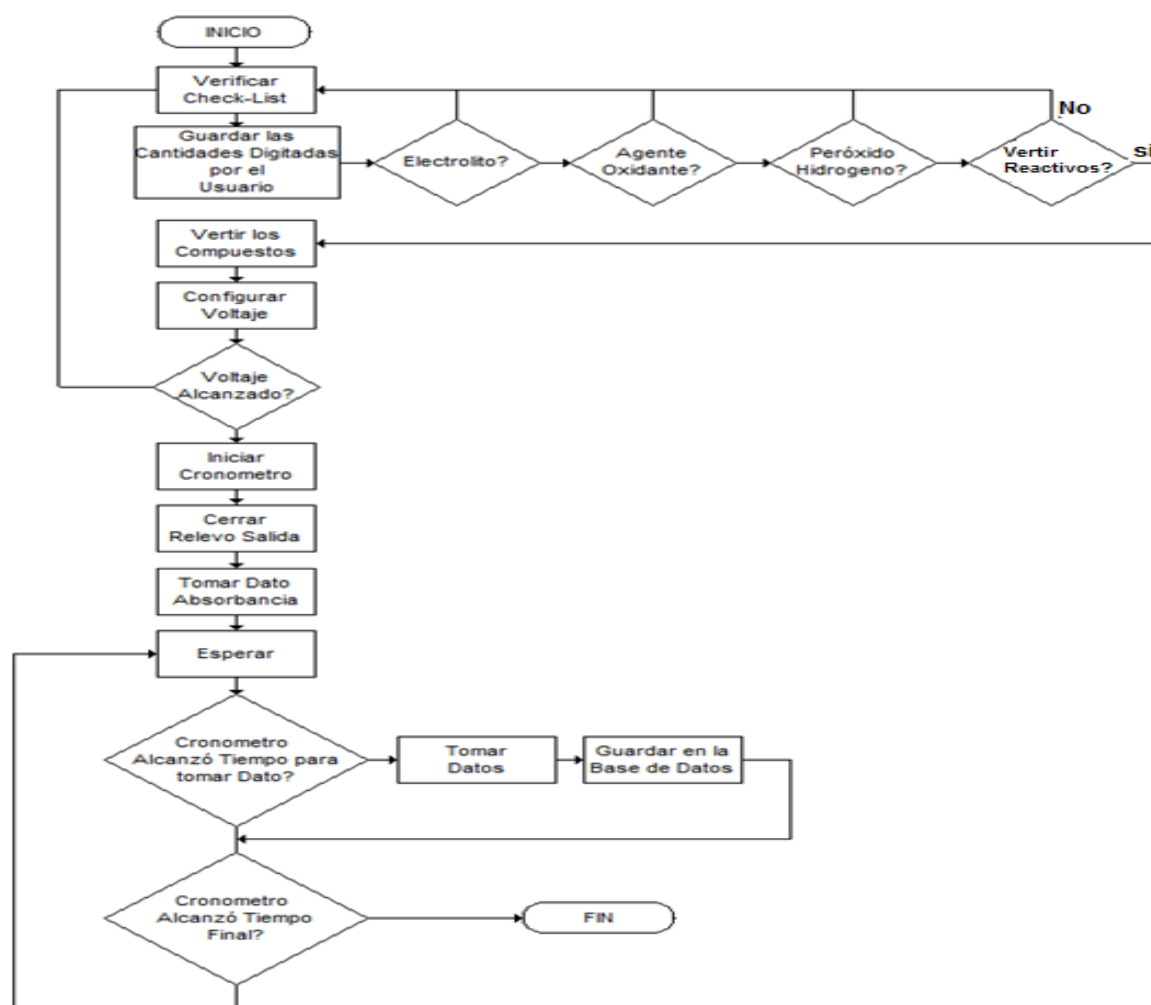
Fuente: autoría propia software LabVIEW

4.3 DESARROLLO PROGRAMACIÓN EN LabVIEW

Es importante que previamente a desarrollar la programación del reactor EF se cuente con un plan que permita identificar los componentes y estructuras necesarias para la implementación del algoritmo, por tal razón mediante diagramas de flujo se representaron cada uno de los procesos a realizar en LabVIEW como método de corrección, prevención y puesta en marcha de diferentes actividades que están implicadas en el cumplimiento del control de cada una de las funciones establecidas anteriormente.

El diagrama constituye una excelente referencia para establecer mecanismos de control y medición de los procesos, facilita la identificación de los errores para poder determinar y proponer una metodología y solución a estos, como también para la determinación rápida de las herramientas más convenientes a usar en el software LabVIEW.

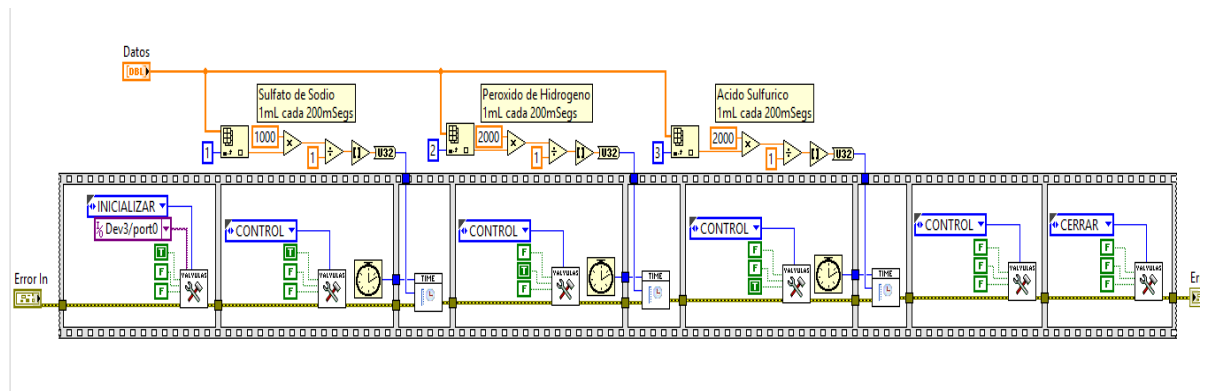
Figura 12. Diagrama de flujo del programa



Fuente: autoría propia

Inicialmente se creó en el software una interfaz de comunicación entre el usuario y software para el control del reactor EF, primero el usuario ejecuta el programa y este espera a que el usuario de una orden de ingreso o salida, si ordena ingresar hay una etapa de registro e identificación que permite entrar al Programa Principal para continuar con las otras etapas que se realizaron para el desarrollo del software, como se describe en la figura 9.

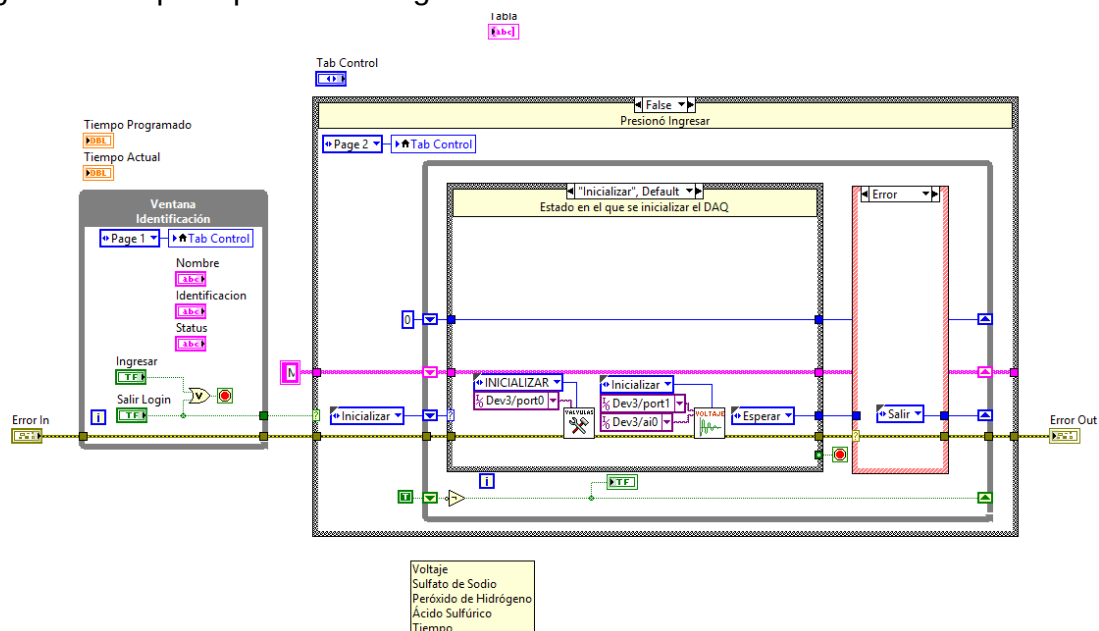
Figura 13. SubVI de la programación de las Electroválvulas



Fuente: autoría propia software LabVIEW

Una vez el usuario ingresa al programa principal debe verificar el Check-List de cada uno de los componentes que conforman el equipo EF ver figura 10 para ingresar al Sub-VI de válvulas, donde se insertan las cantidades de electrolito, agente oxidante y peróxido de hidrógeno ver figura 11, una vez el usuario da la orden, se dispensan dichas cantidades en el reactor EF; para dicho Sub-VI se usó la programación tipo máquina de estados ver figura 9; algoritmo diseñado para que el usuario inserte los valores de voltaje en el panel frontal, estos valores de voltaje tienen unos rangos establecidos con los que el usuario podrá contar el valor de voltaje de salida es el que suministra de energía a los electrodos, para mayor información sobre el proceso ver Capítulo Hardware.

Figura 14. VI principal de la Programación en LabVIEW.



Fuente: autoría propia software LabVIEW

Para Controlar el Voltaje de salida o referencia hacia los electrodos mediante la Tarjeta de Adquisición de Datos DAQ fue necesario realizar el siguiente algoritmo (ver Anexo D)

4.3.1 Inicializar: En este estado los puertos de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se activan; de esta forma, se da un valor inicial a los pines encargados de U/D, INC [33], el usuario registra los valores de voltaje establecidos en el rango para la reacción EF (ver figura 12).

4.3.2 Calcular Pulsaciones: En este estado se halla en el software los flancos de subida o número de pulsaciones, que el potenciómetro digital en el hardware pulsa para alcanzar el voltaje de referencia requerido por el usuario, código de programación (ver Anexo D) [33].

$$R_p = 2000 \frac{V_{ref} - 1,4}{11,66 - V_{ref}} \quad (25)$$

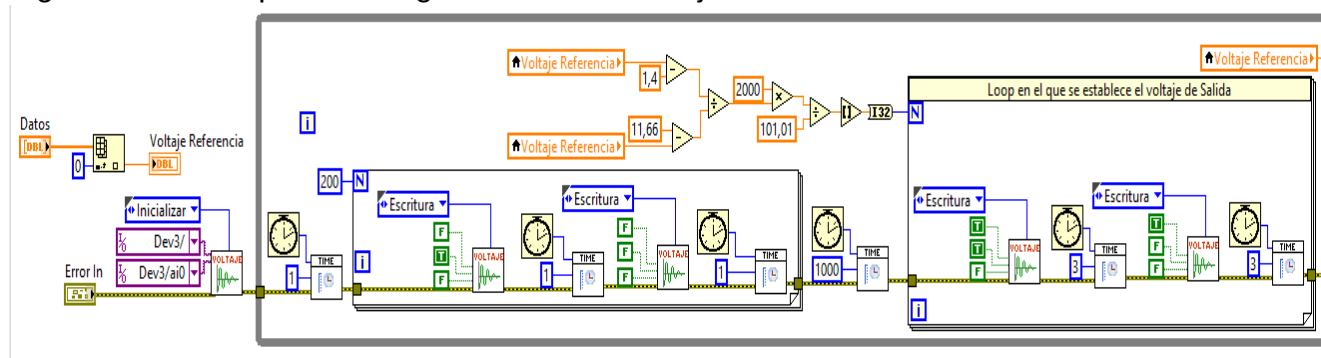
$$n = \frac{R_p}{101,01} \quad (26)$$

V_{ref}: Voltaje de Referencia

R_p: Resistencia del potenciómetro

n: Número de Pulsaciones

Figura 15. SubVI para la Programación del Voltaje



Fuente: autoría propia software LabVIEW.

4.3.3 Probar Señal Cuadrada: En este estado se tomará la medida de longitud de señal cuadrada para comprobar que el voltaje de referencia es igual al voltaje de salida [41].

4.3.4 Rectificar Voltaje Salida: Una vez tomados los cálculos y haber probado la señal cuadrada se verifica que el voltaje de salida es igual al deseado o insertado por el usuario [41].

4.3.5 Continuar: En este estado se pregunta si el voltaje de salida es el deseado por el usuario y en caso de ser verdadera la respuesta, se continúa aplicando el voltaje a los electrodos, quiere decir que se da inicio a la reacción EF.

4.3.6 Cerrar: Se cierran todos los puertos de medidas y se termina el programa una vez haya finalizado el tiempo de la reacción EF o una vez se haya interrumpido manualmente.

Cuando el voltaje es fijado, se considera un tiempo de duración de la reacción EF; según los cálculos de diseño en el capítulo Reactor EF se recomienda un tiempo de 150 min, pero el usuario puede modificar este tiempo por el que considere.

Los datos de absorbancia son tomados, de acuerdo a los tiempos establecidos en las pruebas del reactor EF, estos datos se almacenan en el software y se muestran gráficamente en el panel frontal; además al finalizar o interrumpir el proceso, puede generar un reporte de datos y gráfica.

4.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para el sistema de adquisición de datos usamos el equipo DAQ producto de National Instruments; esta tarjeta que permite la comunicación de datos entre el software y el hardware, también cuantifica en un computador variables como voltaje, corriente, temperatura y presión entre otras por medio de sensores o circuitos eléctricos [36]. Como se puede observar en la figura 14, el dispositivo de adquisición de datos se distribuye en dos partes: un acondicionamiento de señal y el convertidor analógico- digital, el primero tiene como función adquirir o generar señales ya sean digitales y análogas. El segundo se encarga de cambiar o convertir las señales análogas en digitales y viceversa [43]

Figura 16. Funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).



Fuente: [42]

Las líneas digitales de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), acepta las señales como entradas y genera señales como salidas, una tarjeta de adquisición de datos recibe señales digitales y análogas [42]. Las señales digitales hacen referencia a un código binario de dos estados posibles 1 y 0, lo cual también significa encendido- apagado, y la señal análoga es continua y toma valores aleatorios con respecto al tiempo [42].

En la siguiente tabla se muestra como conectar los pines o puertos de las entradas y salidas análogas y digitales de la DAQ con el hardware mediante el cable de jumper. Las salidas digitales se usan para las electroválvulas y el voltaje de salida se tomó como entrada análoga.

Tabla 11. Ubicación de entradas y salidas análogas y digitales en la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

Ubicación de Pines o Puertos en la DAQ	Función	Color de Cada Cable en el Circuito
25	U/D	naranja
26	INC	amarillo
27	ON/ OFF	azul
2	Vout	verde
1 y 3	GND análoga	negro
32	GND digital	café
17	Relevo 1	blanco
18	Relevo 2	gris
19	Relevo 3	morado

Fuente: Autoría propia.

U/D: Up Down tiene la función de aumenta o disminuir la resistencia del potenciómetro digital.

INC: Enviar una señal cuadrada que puede efectuar el cambio de la resistencia.

ON: Permite Entregarle a las electroválvulas el voltaje deseado.

Vout: Permite a la tarjeta de Adquisición de Datos conocer el voltaje de salida.

GND: Es la referencia del sistema electrónico que da al punto a tierra o al punto cero.

5. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO

El bien común es el fin de este proyecto de ingeniería ya que está dirigido a contribuir con la investigación para la creación de nuevos sistemas tecnológicos que ofrezcan soluciones a problemáticas ambientales, de manera que su implementación no solo genere un impacto positivo en el ambiente sino también en la calidad de vida y en el desarrollo sostenible.

Los ingenieros deben saber de ciencia y tecnología porque son la base del progreso de la sociedad, debido a que la ciencia es la fuente del conocimiento ya que es precisa, predictiva y confiable, como dice Brian Greene, catedrático de Física de la Columbia University; la tecnología es una herramienta que integra diferentes conocimientos para satisfacer necesidades básicas y esenciales [44]. En Colombia el desarrollo científico y tecnológico es pobre [45], debido a que el estado no ha invertido en educación que promulgue el desarrollo, esto ha traído consecuencias negativas en el país generando un progreso social y económico mínimo, ya que el avance de la ciencia y la tecnología es fundamental para garantizar una calidad de vida.

El desarrollo de software para tecnologías limpias pueden generarse mejorando tecnologías ya existentes, implementándolas en el software LabVIEW por medio de una programación gráfica, creado por la empresa National instrument, este software es utilizado por universidades, industrias y empresas a nivel mundial, como por ejemplo la agencia de estados unidos National Aeronautics and Space Administration (NASA). Este software puede ser aplicado en desarrollo y diseño de ingeniería y ciencia ya que ha impulsado el progreso en una amplia variedad de industrias, ayudando a ingenieros a convertir sus ideas en realidad, a reducir tiempos de pruebas y ofrecer análisis de negocio basado en datos recolectados, analizar los datos de forma rápida y fácil usando más de 850 funciones integradas de procesamiento de señales, análisis matemáticos, además es fácil de comprender porque es similar a modelos visuales, genera reportes y registra resultados a bases de datos [42].

En la Universidad Santo Tomas se promueve la formación integral mediante la construcción y aplicación adecuada de la tecnología para formar ingenieros competentes en la formulación de proyectos tecnológicos dirigidos a la resolución de alternativas compatibles con la conservación de los recursos naturales, dando al ingeniero una visión interdisciplinaria del futuro abarcando diferentes ciencias del conocimiento, que permitan contribuir al crecimiento local, nacional y mundial de la sociedad actual en beneficio del desarrollo humano sostenible, por esta razón el trabajo de grado desarrollado, consiste en promover la educación en electroquímica ambiental, donde estudiantes podrán formular y desarrollar proyectos enfocados en las tecnologías que dan

solución a problemáticas ambientales realizando prácticas experimentales con este equipo electroquímico.

6. CONCLUSIONES

En el reactor EF se obtuvieron altos porcentajes de remoción de anilina por un tiempo de 150 minutos, se identificó que si se prolonga el tiempo de la reacción EF se podría alcanzar la máxima degradación del compuesto orgánico en CO_2 y H_2O .

Se demostró que por medio del Reactor EF se logra una degradación eficiente de la anilina, alcanzando una remoción del 99,4% empleando un voltaje de 9V, una concentración inicial de 100mg/L a un volumen de 300 mL y un pH de 3, generando rangos de corriente de 0,01 a 0,03 A.

Es importante mantener y ajustar durante la reacción EF un pH de 3 para que la reacción sea auto catalítica, ya que el Fe^{+3} a través del mecanismo en cadena, altera el peróxido de hidrógeno formando moléculas de oxígeno y agua, que permiten la generación de radicales hidroxilo encargados de la degradación de la anilina.

A mayor cantidad de disolución de ácido sulfúrico mayor corriente eléctrica se requiere en el reactor EF, ya que a valores de pH menores a 3 se disminuye la formación de radicales intermediarios $\text{HO}_2^\bullet$ y $\bullet\text{O}_2^-$, lo que impide la degradación de la anilina u otro compuesto orgánico, estos radicales son formados por las reacciones de formación del peróxido de hidrógeno y las oxido-reducciones del hierro, por tal razón para compensar el equilibrio de la reacción EF en la producción de radicales se necesita un mayor potencial en el medio.

Los electrodos son reutilizables para numerosas pruebas experimentales de la reacción EF mientras los valores de pH estén ajustados en 3, ya que si sobrepasa un pH de 4 se forman en la solución hidróxidos de Hierro $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Las pruebas realizadas experimentalmente para la comprobación del funcionamiento del equipo EF se realizaron variando el voltaje de 3V a 9V, teniendo en cuenta que la corriente eléctrica aplicada en la celda electroquímica se transporta del ánodo al cátodo porque existe un diferencial de energía potencial eléctrico entre electrodos, este potencial eléctrico se denomina fuerza electromotriz (FEM) que permite la producción de los

radicales hidroxilo encargados de la oxidación de la anilina, tienen un potencial de oxidación mínimo de 2,8V, en el agua a 25°C.

El proceso Fenton posee una desventaja ya que al no haber una relación de equilibrio entre el peróxido de hidrógeno y el Fe^{2+} se puede detener la producción de radicales hidroxilo $\text{OH}\bullet$, lo cual interrumpe el ciclo catalítico en la reacción, ocasionando una degradación incompleta de la anilina.

Fue necesario el diseño y la construcción de un hardware para el reactor EF que permitiera controlar las variables establecidas por el usuario desde el software, ya que sin este no hubiera sido posible el control del reactor con el software.

A partir del análisis de resultados de las pruebas experimentales del reactor EF, fue posible diseñar y desarrollar una interfaz electrónica en el software LabVIEW, para la adquisición, procesamiento de datos y el suministro de voltaje a las electroválvulas dosificadoras y a los electrodos encargados de la reacción electroquímica.

El desarrollo de la programación gráfica en el software (LabVIEW) se realizó mediante algoritmos para controlar el reactor EF, ya que en este se programó la dosificación de los reactivos mediante las electroválvulas, la aplicación del voltaje para los electrodos, el registro de los usuarios, el almacenamiento de datos, la representación gráfica de estos y el procesamiento de los datos medidos en el espectrofotómetro de forma interactiva.

RECOMENDACIONES

- Es importante lijar y enjuagar adecuadamente los electrodos antes de la puesta en marcha de la Reacción EF.
- Se debe impedir unir los electrodos, ya que se pueden sufrir daños en la batería y demás componentes electrónicos.
- Para suministrar el voltaje necesario a los electrodos siempre se debe conectar al hardware y no directamente a la fuente monofásica.
- No utilizar el ácido sulfúrico o cualquier otro compuesto en estado puro, se deben hacer las disoluciones a 0,01M, ya que puede ocasionar una alteración significativa en la reacción EF.
- Para que haya una conexión correcta entre la tarjeta de Adquisición de datos DAQ y el hardware se deben conectar los cables en sus respectivos pines o puertos, para que el software compile de acuerdo con los algoritmos establecidos en este.
- El espectrofotómetro (La Matle, Smart spectro) suministrado por los laboratorios de la Universidad Santo Tomas, no se logró conectar al software diseñado para la compilación de datos de forma sistemática; se recomienda utilizar un espectrofotómetro compatible con una entrada directa cable PC-R232.
- Cada vez que se ponga en uso el equipo EF se debe utilizar el agitador magnético.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] APHA. American Public Health Association, Estándar Methods for the Examination of Waster and Wastewater, Washington DC: American Public Health Association, 1998.
- [2] Bigda. R., Consider Fenton's chemistry for waste-water treatment, Chem. Eng. Prog., 1995, pp. 62, 66.
- [3] Walling. C, Fenton's reagent revisited. Accounts of Chemical Research, Accounts of Chemical Research, 1975, pp. 125-131.
- [4] Wang, J.L. & Xu, L.E, Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application, Environmental Science and Technology, 2012, pp. 42, 251-325.
- [5] Kommineni, S. et al., Treatment technologies for removal of methyl tertiary butil ether from drinking water, 2nd ed., F. V. Edition. G. Melin, Ed., National Water Research Institute, 2000.
- [6] Martinez, A. Martinez Avila, Evaluación de un proceso integrado de adsorción y oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales industriales reales, "Tesis M.S", Ing. Química y Ambiental, Bogota: Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [7] Vargas Zabala, V., Electrogenación del reactivo de Fenton para el tratamiento de aguas residuales, "Tesis M.S.", Facultad de química, UNAM, Ciudad de Mexico, Mexico, Barcelona-Ciudad de Mexico, 2007.
- [8] Raymond Chang, Química, 7ma ed., Buenos Aires, Caracas, Guatemala, Madrid, Bogota, Santiago, Sao Paulo: McGraw-Hill, 2002.
- [9] Panizza, Marco; Cerisola Giacomo, Removal of Organic Pollutants from Industrial Wastewater by Electrogenerated Fenton's Reagent, Water Research, 2001, pp. 35, 3987-3992.
- [10] Pourbaix, Marcel, Atlas D'Équilibres Electrochimiques, Paris: ÉDITEUR-IMPRIMEUR-LIBRAIRE.
- [11] Neyens, E. & Baeyens, J., A review of classic Fenton ' s peroxidation as an, Journal of Hazardous Materials, 2003, pp. 33-50.
- [12] Martinez, A, Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent., Advances in Environmental Research, 2003, pp. 667-670.

- [13] Rodrigues, C.S., Madeira, L.M. & Boaventura, R.a., Optimization of the azo dye Procion Red H-EXL degradation by Fenton's reagent using experimental design, *Journal of hazardous materials*, 2009, pp. 987-94.
- [14] Benatti, C., Granhen, C.R. & Guedes, T.A., Optimization of Fenton's oxidation of chemical laboratory wastewaters using the response surface methodology, *Journal of environmental management*, 2006, pp. 66-74.
- [15] Badawy, M.I. & Ali, M.E, Fenton's peroxidation and coagulation processes for the treatment of combined industrial and domestic wastewater, *Journal of hazardous*, 2006, pp. 961-6.
- [16] Martínez, Degradation of organic matter in olive-oil mill wastewater through homogeneous Fenton-like reaction, *Chemical Engineering Journal*, 2011, pp. 173, 503- 510.
- [17] Ramirez, Costa, C.a. & Madeira, L.M., Experimental design to optimize the degradation of the synthetic dye Orange II using Fenton's reagent, *Catalysis Today*, pp. 107-108, 68-76.
- [18] Munter, Advance Oxidation Processes: Current Status and Prospects, *Chemistry Keemia*, 2001, pp. 50(2), 59-80.
- [19] Mondragon, Pedro; Ulloa, José, «Identificación de alimentos adulterados mediante espectroscopia de infrarrojo,» *Artículos de Divulgación Fuente Año 3 No. 6*, vol. ISSN, nº 0713 , 2011.
- [20] Anotai, Chi Su, Tsai, Chun Lu, «Effect of hydrogen peroxide on aniline oxidation by electro-Fenton and fluidized-bed Fenton processes,» *Elsevier B.V. ScienceDirect*, vol. *Journal of Hazardous Materials*, nº 183 (2010) 888–893, pp. 889-892, 2010.
- [21] Perez Bendito, Pino Perez, Análisis de elementos-traza por espectrofotometría de absorción molecular UV-visible, Sevilla, Córdoba: Monte de piedad y caja de ahorros de cordoba y Universidad de Sevilla, 1983.
- [22] Contento Salcedo, A. M., Nuevos métodos fotométricos y cromatográficos para la determinación de colorantes rojos en alimentos, Cuenca: Universidad de Castilla- La Mancha, 1997.
- [23] Gómara FL, Correr CJ, Sato Meo, Pontarolo R, «Desarrollo y validación de un método espectrofotométrico para cuantificación de ácido kójico,» *Ars Pharm*, nº 45 (2): 145-153, pp. 145-153, 2004.

- [24] Walton, Harold; Reyes, Jorge, Análisis Químico e instrumental moderno, Colorado, Trujillo: REVERTÉ, 1983.
- [25] A. Documentación, Ficha Toxicológica No. 17, España: No. CAS 62-53-3, 2001.
- [26] Apaydin, «Reduction of cod in wastewater from a textile industry by electro-Fenton process» *Global NEST Journal*, vol. 16, nº X, pp. 1-7, 2014.
- [27] Harris, Análisis Químico cuantitativo, 3ra ed., California: REVERTÉ, 2007.
- [28] Chaverri Benavidez, Fundamentos de Química, 3ra ed., San Jose: Universidad Estatal a distancia, 1984.
- [29] Moreno, Moral, Garcia, Pascual, Bernal, De residuo a recurso, El camino hacia la sostenibilidad, Madrid: Mundi-Prensa, 2014.
- [30] Pardo, Daniel; Bailon, Luis, Fundamentos de electrónica digital, Salamanca: Universidad de Salamanca, 2006.
- [31] Texas Instruments Incorporated, «Datasheet LM317k Series SIMPLE SWITCHER 3A Step-Down Voltage Regulator,» Junio 1999. [En línea]. Available: www.ti.com. [Último acceso: 2015].
- [32] Alcalde P, Electrónica General, 2da ed., Madrid: Paraninfo, 2010.
- [33] Intersil, «Datasheet X9C103 Digitally Controlled Potentiometer,» 20 Julio 2009. [En línea]. [Último acceso: 2015].
- [34] Texas Instruments, «datasheet LM317-N Wide Temperature Three-Pin Adjustable Regulator,» Mayo 2004. [En línea]. [Último acceso: 2015].
- [35] Texas Instruments, «Datasheet OPA2335 Single-Supply Cmos operational amplifiers,» Junio 2002. [En línea]. [Último acceso: 2015].
- [36] National Instruments, «User Guide, NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device,» Julio 2004. [En línea]. Available: ni.com/manuals. [Último acceso: 2015].
- [37] Lajara, Jose; Pelegri, Jose, LabVIEW, Entorno grafico de programación, 2da ed., Barcelona: MARCOMBO, 2011.
- [38] National Instruments Corporation, «LabVIEW Core 1 Manual de Curso,» Copyright, Texas, 2011.

- [39] National Instruments Corporation, «LabVIEW Core 2 Manual de Curso,» Copyright, Texas, 2011.
- [40] Montenegro D, Introducción a G con aplicaciones, Bogota: Ediciones USTA, 2013.
- [41] National Instruments, «NI LabVIEW - NI.com,» National Instruments Corporation, 2016. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/labview/whatsnew/esa/>. [Último acceso: Enero 2016].
- [42] Greene, El universo elegante, Nueva York: Drakontos Bolsillo, 2011.
- [43] Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, Entre la legitimidad, la normatividad y la practica, M. Salazar, Ed., Bogota, 2013.
- [44] Domenech, Jardim, Litter, «Capítulo 1,» de *Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes*, Argentina.
- [45] Zepeda, Garcia Lopez, Pavon Avila, Balderas Hernandez, Barrera Diaz, Roa Morales, Tratamiento de Electrofenton aplicado a las aguas residuales de una Industria alimenticia, México.
- [46] Blanco, Procesos Electroquímicos de Oxidación Avanzada aplicados a la recuperación de aguas contaminadas con el colorante azoico direct yellow-4, Barcelona, 2012.
- Centro de automatización Industrial, SENA Regional Caldas, «manual de uso del programa de diseño de circuitos y simulación Proteus,» Layout Editor, 2008.
- [47] Rodriguez, Utilización de un sistema híbrido basado en filtración con membranas y electro-oxidacion avanzada para depurar efluentes complejos, Chile, 2009.

ANEXOS

ANEXO A. PREPARACIÓN DE LOS REACTIVOS

A.1. Preparación del electrolito

La concentración de Sulfato de sodio (NaSO_4) que se preparó es de 0,050 Molar, es decir, se pesaron 7,102 gramos de sulfato de sodio en 1 litro de agua, el valor de 0,050 molar se calculó utilizando la fórmula de molaridad como se muestra a continuación [18]:

$$\text{Cantidad Sustancia} = \frac{\text{Solute (gr)}}{\text{masa molar NaSO}_4 \left(\frac{\text{gr}}{\text{mol}}\right)} \quad (18)$$

$$n = \frac{7,102 \text{ gr}}{142 \frac{\text{gr}}{\text{mol}}} \quad (19)$$

$$n = 0,050 \text{ mol}$$

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{cantidad de sustancia (mol)}}{\text{Volumen (L)}} \quad (20)$$

$$M = \frac{0,050 \text{ (mol)}}{1 \text{ (L)}} \quad (21)$$

$$M = 0,050 \text{ M}$$

A.2. Preparación de disolución de ácido sulfúrico para ajustar el pH

Se hizo una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0,01M, ya que es la cantidad requerida para que la anilina no se disuelva en el ácido sulfúrico y altere la reacción sino que permita controlar el pH; se almacena la disolución en uno de los tanques independientes con su respectiva electroválvula la cual controla el flujo necesario por medio de LabVIEW. El ácido sulfúrico se adiciona al reactor Electro Fenton para ajustar el pH a 3 y durante toda la reacción se debe controlar este parámetro, en caso de que aumente el pH a 4 o más, se agrega la cantidad de ácido necesaria para mantener el pH en 3 [1]. A continuación se muestran los cálculos para la preparación de la disolución:

$$V_1 C_1 = V_2 C_2 \quad (22)$$

$$V_1 = \frac{500\text{mL} \cdot 0,01\text{M}}{18\text{M}} \quad (23)$$

$$V_1 = 0,2777 \text{ mL}$$

$$m = d \cdot V_1$$

$$m = 1,84 \text{ g/mL} \cdot 0,277\text{mL}$$

$$m = 0,509\text{g}$$

A.3. Preparación de peróxido de hidrógeno

Se mide 500 mililitros de peróxido de hidrógeno y se agregan a un vaso de precipitado. El peróxido de hidrógeno luego se añade a una de las electroválvulas para luego ser adicionado en el reactor Electro Fenton, el peróxido es el agente oxidante el cual junto con el hierro genera los radicales hidroxilo los cuales son los que degradaran la anilina separando sus componentes químicos [20].

ANEXO B. ELABORACIÓN DE LAS DISOLUCIONES DE ANILINA.

El agua sintética de anilina se preparó agregando 10 diferentes disoluciones, en distintos balones aforados de 50 mL. La concentración inicial es 100 mg/L la cual es la concentración inicial, hasta una de 0 mg/L que es la concentración mínima. Primero se agrega una cantidad de la solución de la concentración inicial en un balón aforado, esta disolución se diluye hasta llegar a una mínima, como se muestra a continuación.

Tabla 12. Preparación disoluciones de la curva de calibración

Concentración (g/L)	Volumen disolución stock (mL)	Volumen de agua (mL)
0,01	5	45
0,02	10	40
0,03	15	35
0,04	20	30
0,05	25	25
0,06	30	20
0,07	35	15
0,08	40	10

0,09	45	5
0,1	50	0

Fuente: Autoría propia

La elaboración del cálculo de remoción de la concentración de anilina mediante absorbancias se realiza mediante la siguiente ecuación [10]:

$$\% \text{ REMOCIÓN} = \frac{A_0 - A}{A_0} * 100 \quad (24)$$

A_0 = Absorbancia inicial

A = Absorbancia a cada tiempo del proceso

B.1. Curva de calibración de anilina

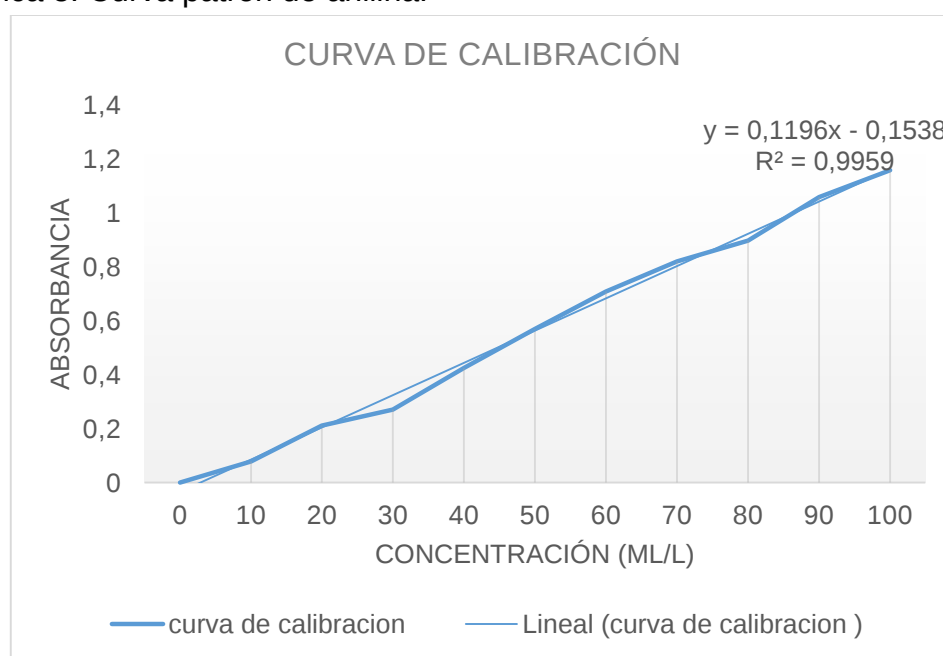
Para la determinación de las diferentes concentraciones de anilina que serán presenciadas en las pruebas del reactor EF se utilizó el dispositivo espectrofotómetro UV visible, el cual mide la absorbancia en diferentes longitudes de onda de un color; a continuación se muestran los resultados obtenidos en la preparación de la curva de calibración, en la cual se midió la absorbancia para diferentes concentraciones preparadas.

Tabla 13. Curva de Calibración de Anilina.

CURVA CALIBRACION DE ANILINA		
Concentración (mg/L)	Absorbancia	Transmitancia %
0	0	0
10	0,0788	98,5
20	0,2119	80,4
30	0,2703	53,8
40	0,4254	37,7
50	0,5702	27
60	0,7081	19,7
70	0,8205	15,2
80	0,8975	12,7
90	1,0587	8,8
100	1,1586	7

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. Curva patrón de anilina.



Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo una curva de calibración para un intervalo de 0 a 100 mg/L lineal. La curva de calibración es una recta con la siguiente ecuación.

$$y = 0,1196x - 0,1538 \quad (27)$$

y: Absorbancia

x: Concentración

0.1538: coordenada al origen.

El valor del coeficiente de correlación lineal (r^2) de esta curva es: 0.9956, este valor muestra que el nivel de confianza es alto, ya que la línea de tendencia es lineal, y como muestra la ley de Beer la concentración es directamente proporcional a la absorbancia lo cual significa que se puede cuantificar la degradación de anilina tanto en términos de absorbancia como en términos de concentración [39].

ANEXO C. TABLAS DE DATOS

Tabla 14. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 9 voltios

TANQUE 1 - 9 VOLTIOS							
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Absorbancia	Transmitancia (%)	Concentración (mg/L)	Corriente (Amperios)	Carga (coulomb)	Eficiencia (%)
0	0	1,1586	0,6	100	0,03	0	0
2	120	0,6631	21,8	84,14	0,01	1,2	15,8
4	240	0,6567	22,1	83,33	0,01	2,4	16,6
6	360	0,6503	22,5	82,52	0,01	3,6	17,4
8	480	0,565	27,3	71,70	0,01	4,8	28,2
10	600	0,5652	27,3	71,72	0,01	6	28,2
15	900	0,555	27,9	70,43	0,03	27	29,5
20	1200	0,5403	28,9	68,56	0,02	24	31,4
25	1500	0,4655	34,4	59,07	0,02	30	40,9
30	1800	0,4502	35,6	57,13	0,02	36	42,8
40	2400	0,4151	38,6	52,67	0,03	72	47,3
50	3000	0,3884	41	49,28	0,03	90	50,7
60	3600	0,3493	44,9	44,32	0,02	72	55,6
90	5400	0,2803	52,6	35,57	0,02	108	64,4
120	7200	0,2065	62,3	26,20	0,01	72	73,7
150	9000	0,1293	63,2	16,40	0,01	90	83,5
24 h	86400	0,0047	99,1	0,59	0		99,4

Fuente: autoría propia

Tabla 15. Datos de degradación de anilina tanque 2 con 9 voltios

TANQUE 2 - 9 VOLTIOS							
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Absorbancia	Transmitancia (%)	Concentración (mg/L)	Corriente (Amperios)	Carga (coulomb)	Eficiencia (%)
0	0	1,1582	0,6	100,00	0,12	0	0,00
2	120	0,6392	23,2	81,12	0,11	13,2	18,88
4	240	0,639	24,1	81,09	0,11	26,4	18,91

6	360	0,6386	23,1	81,04	0,11	39,6	18,96
8	480	0,6343	20,4	80,49	0,11	52,8	19,51
10	600	0,6303	20,3	79,99	0,11	66	20,01
15	900	0,6216	20,8	78,88	0,11	99	21,12
20	1200	0,5872	25,5	74,52	0,11	132	25,48
25	1500	0,4562	45,3	57,89	0,11	165	42,11
30	1800	0,4085	57,7	51,84	0,11	198	48,16
40	2400	0,3611	53,4	45,82	0,09	216	54,18
50	3000	0,3333	69,3	42,30	0,06	180	57,70
60	3600	0,2808	67,2	35,63	0,05	180	64,37
90	5400	0,2536	58,7	32,18	0,07	378	67,82
120	7200	0,2003	63,1	25,42	0,06	432	74,58
150	9000	0,1401	72,6	17,78	0,05	450	82,22
1 día	86400	0,0803	76,9	10,19	0		89,81

Fuente: autoría propia

Tabla 16. Datos de degradación de anilina tanque 3 con 9 voltios

TANQUE 3 - 9 VOLTIOS							
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Absorbancia	Transmitancia (%)	Concentración (mg/L)	Corriente (Amperios)	Carga (coulomb)	Eficiencia (%)
0	0	1,1584	0,6	100,00	0,13	0	0,0
2	120	0,779	16,7	98,86	0,13	15,6	1,1
4	240	0,7687	16	97,55	0,13	31,2	2,4
6	360	0,7679	16,4	97,45	0,13	46,8	2,6
8	480	0,7624	17,4	96,75	0,13	62,4	3,2
10	600	0,7778	16,8	98,71	0,13	78	1,3
15	900	0,7344	18,5	93,20	0,12	108	6,8
20	1200	0,7421	18,9	94,18	0,12	144	5,8
25	1500	0,7303	18,7	92,68	0,12	180	7,3
30	1800	0,694	20,3	88,07	0,12	216	11,9
40	2400	0,6992	20,1	88,73	0,12	288	11,3
50	3000	0,674	21,3	85,53	0,12	360	14,5
60	3600	0,6593	22	83,67	0,12	432	16,3
90	5400	0,5652	27,3	71,73	0,14	756	28,3
120	7200	0,3942	40,5	50,03	0,14	1008	50,0
150	9000	0,3431	45,5	43,54	0,14	1260	56,5

1 día	86400	0,0855	82,2	10,85			89,1
-------	-------	--------	------	-------	--	--	------

Fuente: autoría propia

PRUEBA 3 VOLTIOS

Tabla 17. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 3 voltios

TANQUE 1 - 3 VOLTIOS							
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Absorbancia	Transmitancia (%)	Concentración (mg/L)	Corriente (Amperios)	Carga (coulomb)	Eficiencia (%)
0	0	1,1583	0,6	100,00	0,05	0	0
2	120	0,5445	28,6	69,10	0,05	6	30,901015
4	240	0,5621	27,5	71,33	0,05	12	28,667513
6	360	0,5591	27,7	70,95	0,05	18	29,048223
8	480	0,5508	28,2	69,90	0,05	24	30,101523
10	600	0,5525	29,3	70,11	0,04	24	29,885787
15	900	0,5299	29,6	67,25	0,04	36	32,753807
20	1200	0,5126	30,8	65,05	0,04	48	34,949239
25	1500	0,4961	32	62,96	0,03	45	37,043147
30	1800	0,4984	31,8	63,25	0,03	54	36,751269
40	2400	0,461	34,7	58,50	0,03	72	41,497462
50	3000	0,3946	40,4	50,08	0,02	60	49,923858
60	3600	0,4019	39,7	51,00	0,01	36	48,997462
90	5400	0,3465	45,2	43,97	0,01	54	56,027919
120	7200	0,3111	49	39,48	0,01	72	60,520305
150	9000	0,2651	54	33,64	0,01	90	66,357868
1 día		0,1043	80	13,24	0	0	86,763959

Fuente: autoría propia

PRUEBA 6 VOLTIOS

Tabla 18. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 6 voltios

TANQUE 1 - 6 VOLTIOS							
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Absorbancia	Transmitancia (%)	Concentración (mg/L)	Corriente (Amperios)	Carga (coulomb)	Eficiencia (%)
0	0	1,1584	0,6	100	0,04	0	0,0
2	120	0,5548	28	70,41	0,04	4,8	29,6

4	240	0,5619	27,5	71,31	0,04	9,6	28,7
6	360	0,5534	28	70,23	0,04	14,4	29,8
8	480	0,5469	28,5	69,40	0,04	19,2	30,6
10	600	0,4621	34,6	58,64	0,03	18	41,4
15	900	0,4692	34	59,54	0,03	27	40,5
20	1200	0,4488	35,7	56,95	0,03	36	43,0
25	1500	0,4307	37,2	54,66	0,03	45	45,3
30	1800	0,3821	41,6	48,49	0,03	54	51,5
40	2400	0,3552	44,2	45,08	0,03	72	54,9
50	3000	0,3321	46,7	42,14	0,03	90	57,9
60	3600	0,3104	49	39,39	0,03	108	60,6
90	5400	0,2583	55,3	32,78	0,02	108	67,2
120	7200	0,2145	61,1	27,22	0,02	144	72,8
150	9000	0,1583	69,6	20,09	0,01	90	79,9
1 día		0,0384	91,5	4,87			95,1

Fuente: autoría propia

PRUEBA 9 VOLTIOS

Tabla 19. Datos de degradación de anilina tanque 1 con 9 voltios

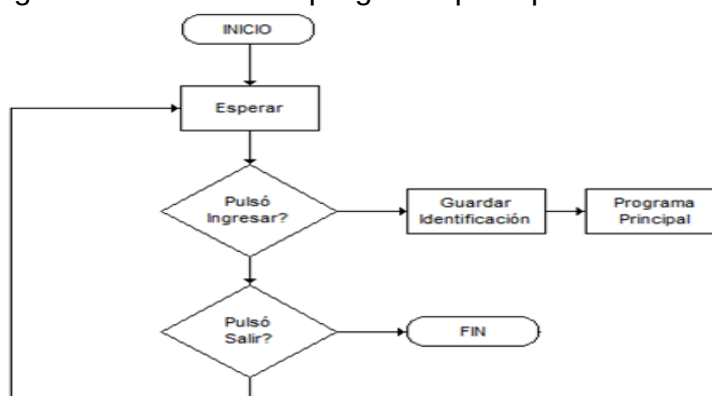
TANQUE 1 - 9 VOLTIOS							
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Absorbancia	Transmitancia (%)	Concentración (mg/L)	Corriente (Amperios)	Carga (coulomb)	Eficiencia (%)
0	0	1,1586	0,6	100,00	0,03	0	0,0
2	120	0,6631	21,8	84,15	0,03	3,6	15,9
4	240	0,6567	22,1	83,34	0,03	7,2	16,7
6	360	0,6503	22,5	82,53	0,03	10,8	17,5
8	480	0,565	27,3	71,70	0,03	14,4	28,3
10	600	0,5652	27,3	71,73	0,03	18	28,3
15	900	0,555	27,9	70,43	0,03	27	29,6
20	1200	0,5403	28,9	68,57	0,02	24	31,4
25	1500	0,4655	34,4	59,07	0,02	30	40,9
30	1800	0,4502	35,6	57,13	0,02	36	42,9
40	2400	0,4151	38,6	52,68	0,03	72	47,3
50	3000	0,3884	41	49,29	0,03	90	50,7
60	3600	0,3493	44,9	44,33	0,02	72	55,7
90	5400	0,2803	52,6	35,57	0,02	108	64,4

120	7200	0,2065	62,3	26,21	0,01	72	73,8
150	9000	0,1293	63,2	16,41	0,01	90	83,6
1 día		0,0047	99,1	0,60	0		99,4

Fuente: autoría propia

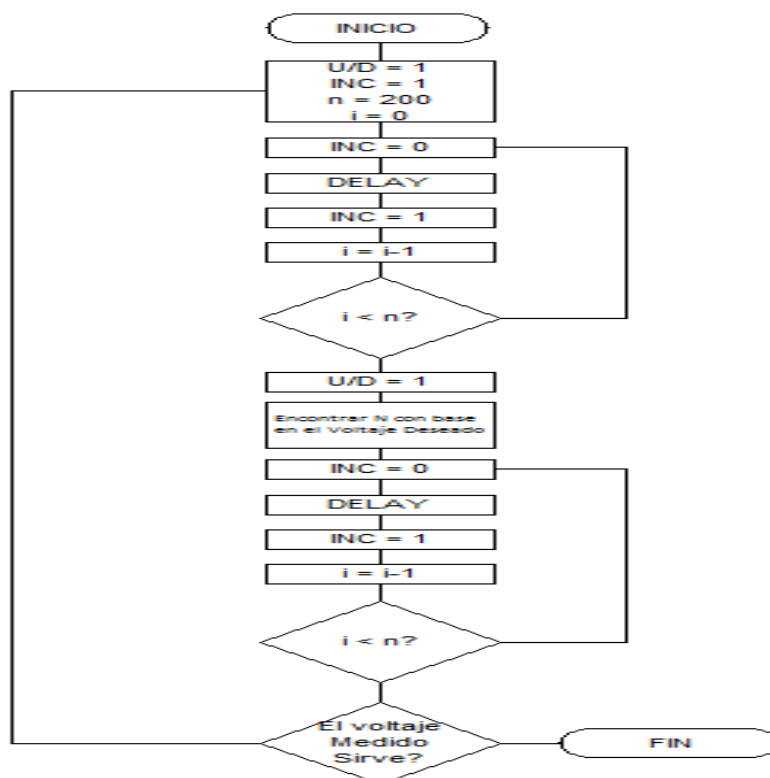
ANEXO D. DIAGRAMAS DE FLUJO PARA PROGRAMAR EN LABVIEW

Figura 17. Diagrama de entrada al programa principal.



Fuente: autoría propia

Figura 18. Diagrama en Anexo Up/Down



Fuente: autoría propia

ANEXO E. IMÁGENES DE LA VENTANA PANEL FRONTAL DEL PROGRAMA.

Figura 19. Panel frontal ventana de entrada

REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ANILINA POR MEDIO DEL MÉTODO ELECTRO- FENTON CONTROLADO POR LABVIEW

Ingrese su nombre:
Paola Sepúlveda

Ingrese su identificación:
1 123 456

Seleccione su cargo:
Estudiante

INGRESAR SALIR

Fuente: Elaboración propia, en software LabVIEW

Figura 20. Pantalla de Mando

REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ANILINA POR MEDIO DEL MÉTODO ELECTRO- FENTON CONTROLADO POR LABVIEW

MUESTRA	TIEMPO	ABSORBANCIA
1	0	2,40
2	2	2,39
3	4	2,35
4	6	2,3
5	8	2,1
6	10	1,9
7	15	1,7
8	20	1,5
9	25	1,3
10	30	1,14

TIEMPO PROGRAMADO 40 MINUTOS

TIEMPO TRANSCURRIDO 30 MINUTOS

EMPEZAR DETENER

IDENTIFICACION

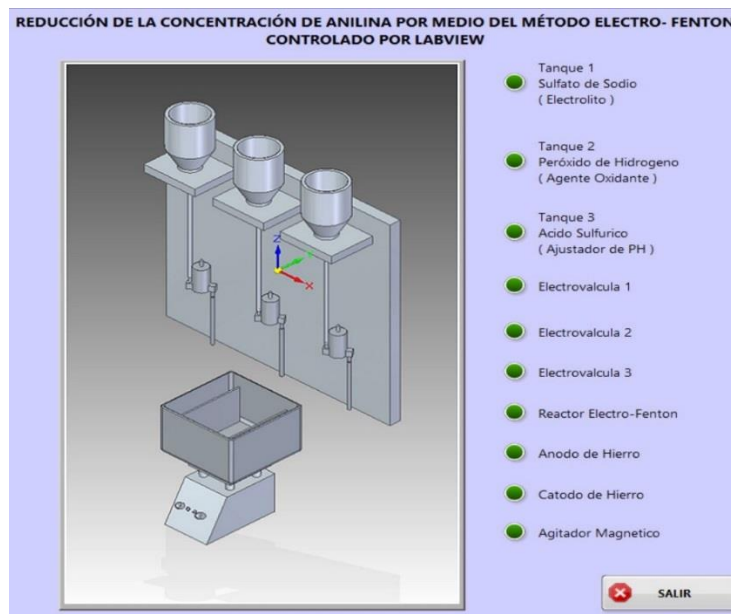
GRAFICAR

INFORME

AUTORES SALIR

Fuente: Elaboración propia, en software LabVIEW

Figura 21. Pantalla de Entrenamiento



Fuente: Elaboración propia, en software LabVIEW

Figura 22. Lista de comprobación y cantidad de compuestos

LISTA DE COMPROBACIÓN

☐ Electrolito

☐ Agente Oxidante

☐ Peróxido de Hidrógeno

☐ Reactor Electro-Fenton

☐ Anodo

☐ Catodo

☐ Agitador Magnetico

CANTIDAD DE COMPUESTOS

Cantidad Sulfato de Soldio
 mL

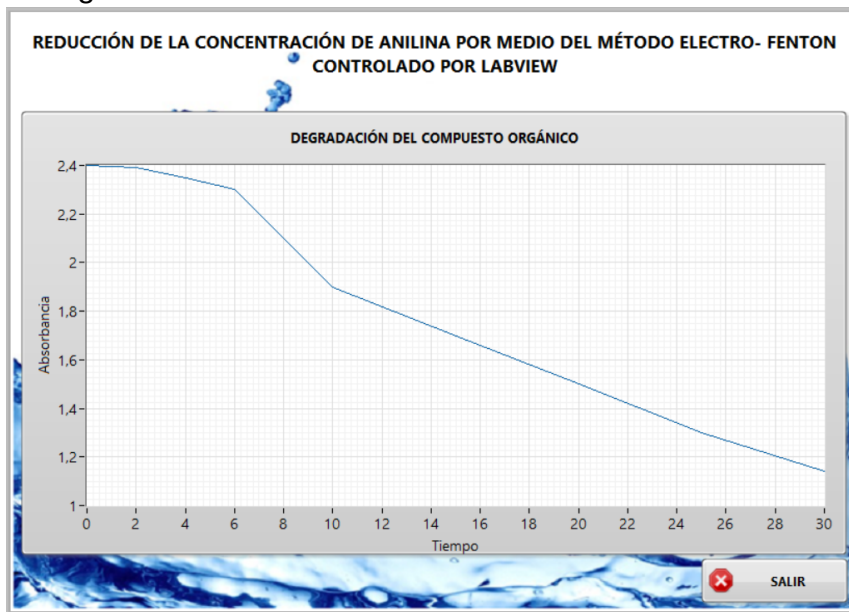
Cantidad Peróxido de Hidrógeno
 mL

Cantidad Acido Sulfurico
 mL

SALIR

Fuente: Elaboración propia, en software LabVIEW

Figura 23. Degradación de la anilina en LabVIEW



Fuente: Elaboración propia, en software LabVIEW

Figura 24. Ventana de autores

REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ANILINA POR MEDIO DEL MÉTODO ELECTRO- FENTON CONTROLADO POR LABVIEW

Desarrollado por:

Yulieth Veronica Lozano Quiroga
 Estudiante de Ingeniería Ambiental, nacida en Bogotá, Colombia, actualmente trabajo en la Fundación Global Arte Ciencia y Tecnología en la construcción y manejo de proyectos innovadores, coordinadora del semillero LabVIEW y Electroquímica.
 Contacto:
 Cel: 57 320 264 1647
 yuliethlozano@usantotomas.edu.co

Paola Andrea Sepulveda Grisales
 Estudiante de Ingeniería Ambiental, nacida en Bogotá, Colombia, actualmente trabajo en la Fundación Global Arte Ciencia y Tecnología en la construcción y manejo de proyectos innovadores, coordinadora del semillero LabVIEW y Electroquímica.
 Contacto:
 Cel: 57 317 683 0192
 paolasepulveda@usantotomas.edu.co

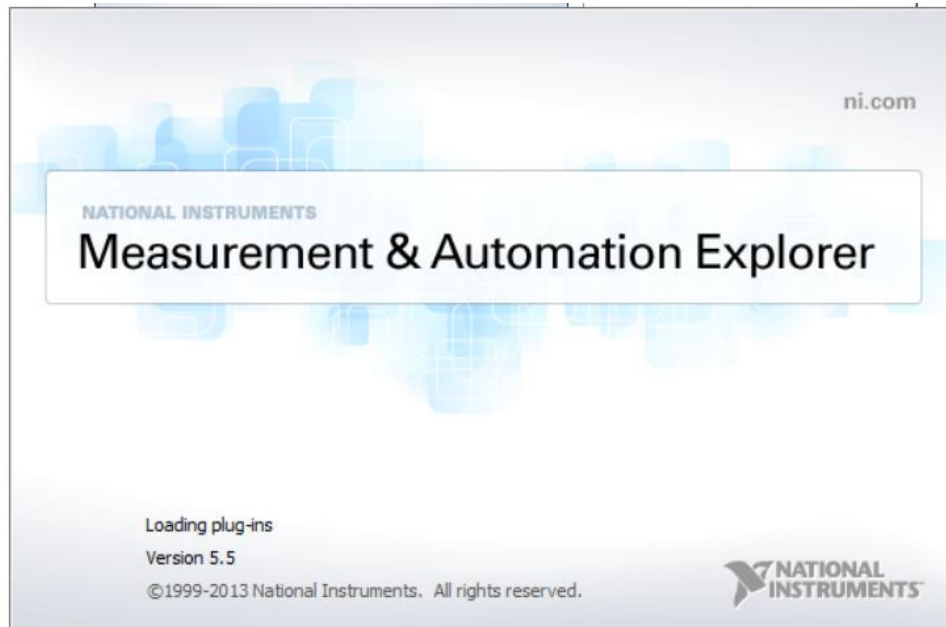
SALIR

Fuente: Elaboración propia, en software LabVIEW

ANEXO F. Measurement and Automation Explorer (MAX)

La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) acepta la gestión y acceso de recursos de hardware sea de National Instruments. Mediante el “Measurement and Automation Explorer” (MAX)”, en esta parte se realiza la rápida verificación y comunicación con dispositivos mediante el uso de ventanas de prueba [34].

Figura 25. Measurement and Automation Explorer (MAX)



Fuente: National instrument

Al ingresar al MAX, se pueden observar todos los dispositivos y recursos conectados al sistema en la rama “Devices and Interfaces” del árbol “My System”, al abrir la rama ya mencionada, se pueden localizar dispositivos National Instruments conectados al sistema a través de cualquiera de los puertos disponibles del PC para este propósito [34].

En los paneles de prueba, se pueden encontrar paneles para la prueba de entradas y salidas digitales y análogas en donde el usuario puede cambiar la funcionalidad de los puertos digitales (solo si el hardware lo permite), cambiar los valores de salida, verificar valores de entrada, leer señales análogas a diferentes tasas de muestreos y ventanas de tiempo especificadas por el usuario y generar cambios en las salidas análogas del dispositivo puesto a prueba. Todas estas opciones se pueden seleccionar dentro de cada una de las paletas del Control tipo "Tab" que compone el panel de prueba del dispositivo [36].

En este trabajo de grado mediante el “Measurement and Automation Explorer” (MAX)”, se realizó la activación y modificación correcta de entradas y salidas de las señales análogas y digitales de los puertos conectados en la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), es decir, se conectaron los puertos que se van a utilizar de acuerdo con su función en el programa y en el hardware y finalmente en Measurement and Automation Explorer (MAX) también se verificó la comunicación entre los puertos [36].

El software de NI-DAQmx va más allá de un controlador DAQ básico, brinda mayor productividad y rendimiento, este software permite la identificación de recursos físicos del PC como puertos de serie y paralelos, cámaras de video, hardware de NI y otros recursos para ser utilizados por el usuario en los programas desarrollados con LabVIEW [36].