

**DISEÑO CONCEPTUAL Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROCOAGULADOR
CONTROLADO POR LABVIEW**

KARENN ELIANA BELTRÁN GONZALEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ELECTROQUÍMICA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2015**

**DISEÑO CONCEPTUAL Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROCOAGULADOR
CONTROLADO POR LABVIEW**

KARENN ELIANA BELTRÁN GONZALEZ

**Tesis de Grado con modalidad de solución a un problema ingenieril para
optar al título de Ingeniero Ambiental**

**Director:
Cesar Augusto Quiñones**

**Codirector:
Jhon Erick Navarrete Gómez**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ELECTROQUÍMICA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Con la connotación de:

Sustentador

KARENN ELIANA BELTRÁN GONZÁLEZ

JUAN CARLOS TORRES FERNANDEZ
JURADO 1

CARLOS ANDRES PEÑA GUZMÁN
JURADO 2

Bogotá, 23 de Noviembre del 2015

*Este trabajo es dedicado a mi madre, abuela y familia,
A mis primos pequeños,
Porque fueron ellos quienes me impulsaron todos los días a continuar,
Les demostraré que estudiar no es difícil,
Si ponemos dedicación y disciplina.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a Dios por darme la fuerza constante, el impulso de continuar y la oportunidad de conocer nuevas personas y cosas cada día.

Agradezco a mi madre y abuela porque me han traído hasta este lugar, apoyándome en cada momento y brindándome todo lo que he necesitado durante este tiempo.

Agradezco a toda mi familia, mamá, abuela, tíos, primos, y ahijado por todo el apoyo y animo que he recibido constantemente durante todo este tiempo, sus bendiciones me mantuvieron fuerte.

Agradezco a mis amigos, por su frecuente solidaridad, compañerismo y apoyo.

Agradezco a los docentes y compañeros de la facultad de ingeniería electrónica que me aportaron muchos conocimientos sobre electrónica.

Agradezco al director y codirector de tesis por las ideas que aportaron al proyecto.

Y agradezco a cada persona que aportó una gota de conocimiento para dar por terminada este proyecto de grado.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE GRÁFICOS	10
LISTA DE ANEXOS	11
GLOSARIO	12
RESÚMEN	16
1. INTRODUCCIÓN	17
2. OBJETIVOS	18
2.1.OBJETIVO GENERAL	18
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. MARCO DE REFERENCIA	19
3.1.Tratamiento Electroquímico.....	19
3.2.Electrocoagulación	19
3.2.1. Mecanismo del proceso de electrocoagulación	20
3.2.2. Reacción de electrólisis	22
3.2.3. Reactor de electrocoagulación	23
3.2.4. Variables que afectan el proceso de electrocoagulación	23
3.2.5. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación	24
3.3.Uso de LabVIEW como software para el control del prototipo de electrocoagulación	25
3.3.1. LabVIEW.....	25
3.3.2. Ambiente de desarrollo de la plataforma LabVIEW	26
3.3.3. Estructuras y modelos de programación.....	27
3.3.4. Aplicaciones de LabVIEW en la industria	28
4. DESARROLLO CENTRAL.....	29

CAPÍTULO 1: Diseño conceptual y construcción del electrocoagulador.....	29
1.1. Diseño conceptual del electrocoagulador	29
1.2. Soluciones empleadas para ejercer el proceso de electrocoagulación.....	31
1.3. Diseño experimental para escoger el reactor más eficiente.....	31
1.3.1. Método de detección de cromo hexavalente por espectrofotometría con 1,5 difenilcarbazida	32
1.4. Resultados de las pruebas de voltaje en 5, 10 y 15 V para cada reactor .	34
1.5. Análisis del primer diseño experimental	36
CAPÍTULO 2: Desarrollo del Hardware y el componente electrónico del sistema.	38
2.1. Diseño experimental de hardware	38
2.2. Construcción y funcionamiento del Hardware	40
2.3. Impreso final del Hardware con sus componentes.....	41
CAPÍTULO 3: Diseño y Desarrollo del software.....	42
3.1. Adquisición de datos (USB – 6008).....	43
3.2. Diseño del VI “Bienvenida y reconocimiento de la práctica”	44
3.3. Diseño del sistema automatizado para la dosificación de las soluciones usando electroválvulas.....	46
3.3.1. Pruebas de dosificación para cada solución.....	47
3.3.2. Resultados de las pruebas de dosificación para cada electroválvula.	49
3.3.3. Diseño del software usado para la automatización de las electroválvulas.....	49
3.4. Diseño del VI “Inicio (Aplicación de voltaje)”	51
3.5. Diseño del VI “Toma de datos y gráfica”	53
CAPÍTULO 4: Ensamblaje del prototipo de Electrocoagulación automatizado	54
4.1. Plano del prototipo de electrocoagulación.....	54
4.2. Maqueta del prototipo de electrocoagulación	55
4.3. Pruebas de remoción de cromo hexavalente con el prototipo de electrocoagulación automatizado	56
5. IMPACTO SOCIAL, HUMANISTICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO.....	61
6. CONCLUSIONES.....	62
7. RECOMENDACIONES	65
8. BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	67

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de Electrocoagulación.
- Tabla 2. Estructuras y modelos de programación de LabVIEW.
- Tabla 3. Medidas de los tres reactores de electrocoagulación.
- Tabla 4. Medidas de los electrodos de cada reactor de electrocoagulación.
- Tabla 5. Curva de calibración de la concentración de Cr (VI).
- Tabla 6. Pruebas de electrocoagulación con 5 voltios.
- Tabla 7. Pruebas de electrocoagulación con 10 voltios.
- Tabla 8. Pruebas de electrocoagulación con 15 voltios.
- Tabla 9. Corriente máxima adquirida en cada prueba de electrocoagulación al variar el voltaje.
- Tabla 10. Eficiencia en cada reactor con respecto al voltaje aplicado.
- Tabla 11. Comparación de eficiencia vs corriente en cada reactor.
- Tabla 12. Valores de corriente arrojados dependientes de la variación de voltaje.
- Tabla 13. Conexión de las terminales del cable bus a los pines de la DAQ.
- Tabla 14. Tiempo que tarda la solución de Cromo VI en caer al reactor.
- Tabla 15. Prueba de pH para determinar la solución de NaOH.
- Tabla 16. Tiempo que tarda la solución de NaOH en caer al reactor.
- Tabla 17. Tiempo que tarda la solución de NaCl en caer al reactor.
- Tabla 18. Tiempo y volumen adecuados de cada solución.
- Tabla 19. Medidas del electrocoagulador y los electrodos.
- Tabla 20. Resultados de las pruebas con el electrocoagulador final.
- Tabla 21. Tabla de eficiencia para cada prueba de electrocoagulación.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo de aluminio.
- Figura 2. Diagrama frontal (Izq.) y Diagrama de bloques (Der.).
- Figura 3. Pasos que describen la metodología planteada en el proyecto.
- Figura 4. Ubicación de los electrodos en los reactores de electrocoagulación.
- Figura 5. Diseño Experimental 1.
- Figura 6. Montaje del primer diseño experimental.
- Figura 7. Plano electrónico del Hardware.
- Figura 8. Hardware con sus componentes.
- Figura 9. Pasos que describen las partes del software.
- Figura 10. Significado de cada terminal de cable bus.
- Figura 11. Diagrama de flujo VI “Bienvenida y reconocimiento de la práctica”.
- Figura 12. Inicio del SubVI de Bienvenida y Checklist.
- Figura 13. Verificar la lista de chequeo.
- Figura 14. Ventana que da paso para iniciar el proceso de electrocoagulación.
- Figura 15. Ventana de regresar para verificar que se cumpla con el checklist.
- Figura 16. Sistema de electroválvulas para automatizar el sistema.
- Figura 17. Diseño experimental del sistema de dosificación.
- Figura 18. Icono de la variable global funcional de las electroválvulas y sus funciones.
- Figura 19. Diagrama de flujo para las electroválvulas.
- Figura 20. Diagrama de flujo del VI de voltaje.
- Figura 21. Icono y explicación de la variable global funcional del VI de voltaje.
- Figura 22. Diagrama de bloques del voltaje aplicado por el Usuario.
- Figura 23. Diseño del diagrama de flujo del VI toma de datos y gráfica.
- Figura 24. Diagrama de bloques para graficar los resultados de absorbancia.
- Figura 25. Plano del prototipo de electrocoagulación.
- Figura 26. Prototipo de electrocoagulación ensamblado.
- Figura 27. Ensayos para verificar el prototipo de electrocoagulación automatizado.
- Figura 28. Gráfica arrojada por el programa, prueba usando 4 electrodos.
- Figura 29. Gráfica arrojada por el programa, prueba usando 6 electrodos.
- Figura 30. Gráfica arrojada por el programa, prueba usando 8 electrodos.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva de calibración de la concentración de Cr (VI) 1.

Gráfico 2. Prueba de 5 voltios, Tiempo Vs Absorbancia.

Gráfico 3. Prueba de 10 voltios, Tiempo Vs Absorbancia.

Gráfico 4. Prueba de 15 voltios, Tiempo Vs Absorbancia.

Gráfico 5. Voltaje Vs Corriente con diferente número de electrodos.

Gráfico 6. Curva de calibración de la concentración de Cr (VI) para verificar el electrocoagulador.

Gráfico 7. Relación de la Absorbancia Vs Tiempo en la prueba final.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Preparación de la solución de Cromo Hexavalente.

ANEXO 2: Preparación de la solución de NaCl.

ANEXO 3: Preparación de la curva de calibración con el método de colorimetría 1,5 difenilcarbazida.

ANEXO 4: Esquema del circuito para el proceso de Electrocoagulación.

ANEXO 5: Fuente de voltaje ajustable.

ANEXO 6: Fuente conmutada de 5 V.

ANEXO 7: Fuente conmutada de 12 V.

ANEXO 8: Puente rectificador, conversor A/C – D/C.

ANEXO 9: Circuito de Relevos.

GLOSARIO

Absorbancia: Medida de la atenuación de una radiación al atravesar una sustancia, que se expresa como el logaritmo de la relación entre la intensidad saliente y la entrante [29].

Adquisición de datos: Es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido [28].

Agua residual: Aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo [27].

Anión: Ion con carga eléctrica negativa, un anión tiene más electrones que protones y es atraído por una carga positiva [1].

Ánodo: Electrodo donde ocurre la oxidación es decir los electrones fluye de electrolito a electrodo [1,3].

Automatización: Aplicación de sistemas tanto mecánicos como electrónicos operados por la computadora para controlar un proceso industrial o de manufactura [17].

Catión: Ion con carga eléctrica positiva, un catión tiene menos electrones que protones y es atraído por una carga negativa [1, 20].

Cátodo: Electrodo donde ocurre la reducción, los electrones fluyen desde el electrodo al electrolito [1].

Celda Electrolítica: Dispositivo utilizado para la descomposición de sustancias ionizadas mediante corriente eléctrica, consiste en al menos dos electrodos conductores normalmente metales en contacto con conductores iónicos o también llamados electrolitos [1, 17].

Circuito: Interconexión de los elementos ya sean pasivos quienes no generan energía o activos que son capaces de generar energía [15].

Coagulación: desestabilización de las partículas para conseguir que las fuerzas de atracción tipo vander Walls que existen entre dos partículas predominen sobre las de repulsión electrostática, logrando que estas se unan y formen sólidos de mayor tamaño [20].

Coagulante: Sustancias químicas empleadas en la coagulación [19].

Códigos Binarios: Sistema digital de codificación fundamental en el que se basan los ordenadores, es el más simple, este consta de dos elementos 1 y 0 que combinado de distintas formas envían impulsos eléctricos [14].

Compuestos Inorgánicos: Son aquellos que no contienen carbono, Se forman por la acción de las fuerzas fisicoquímicas como fusión, sublimación, difusión, electrólisis y reacciones químicas a diversas temperaturas [13].

Compuestos orgánicos: Son aquellos que contienen átomos de carbono e hidrogeno y forman enlaces con otros elementos como oxígeno, nitrógeno, fosforo etc. Se forman naturalmente en los vegetales y animales mediante los rayos ultravioleta [13].

Conductividad: Medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica, esta depende de la presencia de iones [15].

Corriente alterna: (i) Corriente que varía sinusoidalmente con el tiempo [15].

Corriente directa: (I) Corriente que permanece constante en el tiempo [15].

Corriente eléctrica: Es la velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo su medida se da en Amperios [15].

Densidad de Corriente: Intensidad de corriente por unidad de área de los electrodos, expresada en miliamperios por metro cuadrado [17].

1,5 - Difenilcarbazida: Adecuado agente acomplejante para la determinación de Cr (VI) en solución [23].

Diseño Conceptual: Definición de parámetros importantes y requerimientos del sistema, extraídos de la bibliografía acorde al tema [12].

Eficiencia: Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico, normalmente se expresa en porcentaje [27].

Efluente: Resultado final del agua residual tras haber pasado por un proceso de tratamiento [17].

Electrocoagulación: Proceso que separa simultáneamente metales pesados, compuestos orgánicos emulsionados y otros contaminantes del agua aplicando una tensión de corriente directa a electrodos inmersos en el reactor [17].

Electrocoagulador: Reactor en donde se desarrolla el proceso de electrocoagulación [3].

Electrodos: Extremo de un cuerpo conductor en contacto con un medio del que recibe o al que transmite una corriente eléctrica [1, 17].

Electrodo de sacrificio: Electrodo positivo en el que tiene lugar la oxidación en un proceso electrolítico [1, 17].

Electrólisis: Proceso electroquímico en el que se separan los elementos de una sustancia al pasar una corriente eléctrica [1, 17].

Electroquímica: Rama de la química que estudia la influencia de la electricidad en determinados cuerpos y la obtención de la misma a partir de reacciones químicas [1, 17].

Espectrofotometría UV - Visible: Es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución [22].

Espectro de absorción: Grafico en el que se representa la cantidad de luz que es absorbida por una sustancia química en un disolvente en función de la longitud de onda [17].

Filtración: Eliminación física de material sólido del agua al pasar a través de un material poroso [11].

Floculación: Acumulación de partículas y micro partículas desestabilizadas [17].

Flóculos: Partículas que chocan entre si y se aglomeran formando partículas más grandes [19].

Hardware: Es la parte que se puede ver del computador, es decir todos los componentes de su estructura física [10].

Interface electrónica: Medio con el que un usuario puede comunicarse con una maquina [17].

Ion: Átomos o moléculas cargados eléctricamente [11].

LabVIEW: Herramienta de programación gráfica para pruebas, control y diseños de procesos [17].

Partículas Coloidales: Son partículas orgánicas o inorgánicas que tienen un diámetro pequeño que varía entre 1micrometro y 1 nanómetro, son las encargadas de la turbiedad en el agua [17].

pH: Es un indicador de acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrogeno (H^+) en una sustancia; cuando el pH es mayor de 7 la sustancia es básica [21].

Puerto Análogo: Entrada o salida de una señal análoga, lee variables múltiples [17].

Puerto Digital: Entrada o salida de una señal digital, lee variables dobles (uno o cero) [17].

Regulador de Voltaje: Dispositivo electrónico diseñado para mantener un nivel de voltaje constante [15].

Sedimentación: Proceso físico de clarificación de las aguas residuales por efecto de la gravedad. Junto con los sólidos sedimentables precipita materia orgánica del tipo putrescible [27].

Software: Programas informáticos que hacen posible la realización de tareas específicas dentro de un computador [10].

SubVI: Es un VI llamado por otro VI, esto es el equivalente a las subrutinas en la programación basada en texto [9].

Tecnologías limpias: Tecnologías que no contaminan y que utilizan los recursos naturales renovables y no renovables en forma racional, esta al ser aplicada no produce efectos secundarios o transformaciones al equilibrio ambiental [38].

VI's: Instrumento virtual, se llama así porque su apariencia y comportamiento simula instrumentos físicos como osciloscopios o multímetros [9].

Voltaje: Es la diferencia de potencial eléctrico, comparación de la energía que experimenta una carga entre dos ubicaciones [15].

RESÚMEN

En el siguiente proyecto de investigación se realizará el diseño conceptual y construcción de un equipo de electrocoagulación a escala laboratorio. Este prototipo será automatizado en las funciones de dosificación de químicos y aplicación de voltaje por medio del diseño de un algoritmo diseñado en el software LabVIEW, por medio de una interface electrónica que transmite los datos desde un computador personal.

El diseño del reactor de electrocoagulación fue definido a partir de una serie de ensayos teniendo en cuenta las siguientes variables: tiempo que tarda la reacción de electrocoagulación, tamaño del reactor y voltaje aplicado. El funcionamiento del electrocoagulador será verificado con la remoción de cromo hexavalente contenido en muestras artificiales.

De acuerdo al desarrollo de este proyecto se estudiará la electrocoagulación como una técnica para el tratamiento de agua residual aplicando electroquímica por medio de un prototipo de electrocoagulación automatizado, y de esta forma dar a conocer el funcionamiento de este sistema en la academia.

1. INTRODUCCIÓN

Es verídico que la ingeniería como aplicación de conocimiento científico, invención, diseño, perfeccionamiento y manejo de procedimientos lleva a solucionar problemáticas mundiales relacionadas a la temática ambiental. Se estima que se ha incrementado la contaminación del recurso agua a nivel mundial, y es por esto que diferentes países se han interesado en realizar tratamiento de aguas para lograr su reutilización y mitigar el impacto que se está generando en distintas poblaciones; normalmente uno de los diferentes métodos que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales se llama coagulación que ha ido avanzando desde el descubrimiento de la electroquímica. Se han venido realizando investigaciones sobre tecnologías emergentes que realizan procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de los contaminantes a partir de la inyección de corriente en las celdas electrolíticas, como es el caso de la electrocoagulación [2].

Con el desarrollo de esta tesis se pretende implementar los laboratorios en la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás para dar a conocer la electroquímica ambiental como una aplicación para el tratamiento de aguas residuales llevando a cabo el diseño conceptual y la construcción de un electrocoagulador a escala laboratorio, automatizando dos funciones, la dosificación de soluciones al reactor y la aplicación de voltaje. Para que estas dos funciones de automatización estén en marcha se diseña un hardware que transmita las señales generadas por el algoritmo diseñado en el lenguaje de programación visual gráfico llamado LabVIEW. El diseño del reactor y la verificación del prototipo de electrocoagulación diseñado en conjunto con el software y hardware se realizarán con cromo hexavalente como contaminante modelo.

Al implementar la interdisciplinariedad en este proyecto de investigación se logra poner en práctica las competencias del ingeniero ambiental enfocándolo en el desarrollo de nuevos métodos de innovación tecnológica, logrando así que estas nuevas herramientas de trabajo sean aplicadas en la industria ya que ofrecen mejor precisión y manejo.

La ejecución de este proyecto presenta una solución a un problema ingenieril, su finalidad es explicar una serie de laboratorios enfocados en electroquímica para futuros estudiantes de ingeniería ambiental y así mismo continuar una serie de proyectos enfocados en el control de las variables que afectan el método de electrocoagulación.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar conceptualmente y construir un electrocoagulador a nivel laboratorio que sea automatizado por LabVIEW.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño conceptual del electrocoagulador teniendo en cuenta las variables más importantes del proceso.
- Construir el electrocoagulador a partir del diseño conceptual.
- Desarrollar el software y el hardware necesario para automatización y monitoreo del electrocoagulador a nivel laboratorio.
- Verificar el funcionamiento del electrocoagulador por medio de la remoción de Cr^{6+} en soluciones de concentración conocida preparadas en laboratorio.

3. MARCO CONCEPTUAL

El uso constante de agua por parte del hombre para actividades industriales, domésticas y municipales, la necesidad de proveer agua a la población, la sobreexplotación y la inadecuada manipulación en los sistemas de distribución, deteriora la calidad del recurso y genera uno de los mayores problemas ambientales y sanitarios, limitando su disponibilidad. Antes de ser reusadas o vertidas a un cuerpo natural o para consumo dispuestas en fuentes abastecedoras de agua, es necesario realizar un procedimiento previo de descontaminación realizado en una planta de tratamiento de agua residual que involucra una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes [4, 5]. A continuación se dará una breve descripción sobre la técnica electroquímica para tratamiento de agua residual.

3.1. Tratamiento Electroquímico

La electricidad para el tratamiento de agua fue propuesta en 1889 en Reino Unido [25]. El auge de este tipo especial de tratamiento para aguas residuales se da por el desarrollo de tecnologías limpias y eficientes, ya que previenen la contaminación antropogénica difícilmente biodegradable, como también la eliminación de bacterias en el agua destinada para el consumo humano, logrando así un aumento en la calidad del agua [16, 40].

Hay mecanismos del tratamiento electroquímico, estos pueden ser con electrólisis directa o indirecta, la electrólisis directa está relacionada a procesos de oxidación y reducción, la electrólisis indirecta está enfocada en procesos de oxidación avanzada, promoviendo la formación de radicales hidroxilo de potencial de oxidación mayor que otros oxidantes tradicionales; algunas técnicas usadas son la electrocoagulación, electroflotación, electrofloculación [16, 25, 33].

Las características que posee el uso de tratamientos electroquímicos son: La versatilidad por realizar un sistema de tratamiento útil para eliminar diferentes compuestos tóxicos sin cambios en el diseño del reactor, la automatización por el uso de variables eléctricas como corriente y voltaje, fáciles de manejar por control y adquisición de datos, y por último la compatibilidad con el ambiente porque solamente usa energía eléctrica [16, 25]. El tratamiento electroquímico que se usará en este proyecto de investigación es la electrocoagulación.

3.2. Electrocoagulación

La electrocoagulación es una tecnología limpia emergente, fue patentada por Elmore en 1904, ha sido ejercida desde 1906 en Estados Unidos [33]. Las primeras pruebas fueron realizadas con ánodos de hierro soluble aplicando caídas de

potencial de 1,8 vatios entre electrodos, las distancias entre electrodos eran de 2,54 cm y corriente anódica de 0,6 A/pie². Posteriormente se dieron ensayos electrolizando una solución de cloruro de sodio para producir cloro y soda cáustica esto para esterilizar aguas negras, para coagular se utilizaron ánodos de hierro y aluminio, la reducción de materia orgánica en estas pruebas tenían un 40% de remoción [3, 38].

En los últimos 10 años diferentes estudios afirman que se han realizado mejoras que logran eficiencias progresivas, las aplicaciones de este sistema son industriales y poseen alta competitividad en distintos procesos de descontaminación de aguas con resultados exitosos, alcanzando a proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico [3, 18].

Desde entonces se conoce a la electrocoagulación como una tecnología alternativa de solución ambiental para el tratamiento de aguas, ha tenido resultados positivos los cuales se han analizado con mucho interés bajo condiciones físicas y químicas en la aplicación de técnicas para el tratamiento de descargas de agua residual en las industrias [17, 31, 33].

Se encuentran aplicaciones en la clarificación de aguas residuales y con fines de potabilización, remoción de contaminantes como cromato, cianuro, As (III), As (V) que provengan de efluentes industriales, aguas con fluoruro para consumo humano, o materia orgánica soluble. También aplicaciones en industrias que generen aceites en emulsión. Otras aplicaciones se basan en una amplia revisión bibliográfica para determinar la eficiencia de cada contaminante por métodos de electrocoagulación y electrocoagulación - flotación [37, 39, 42].

3.2.1. Mecanismo del proceso de electrocoagulación

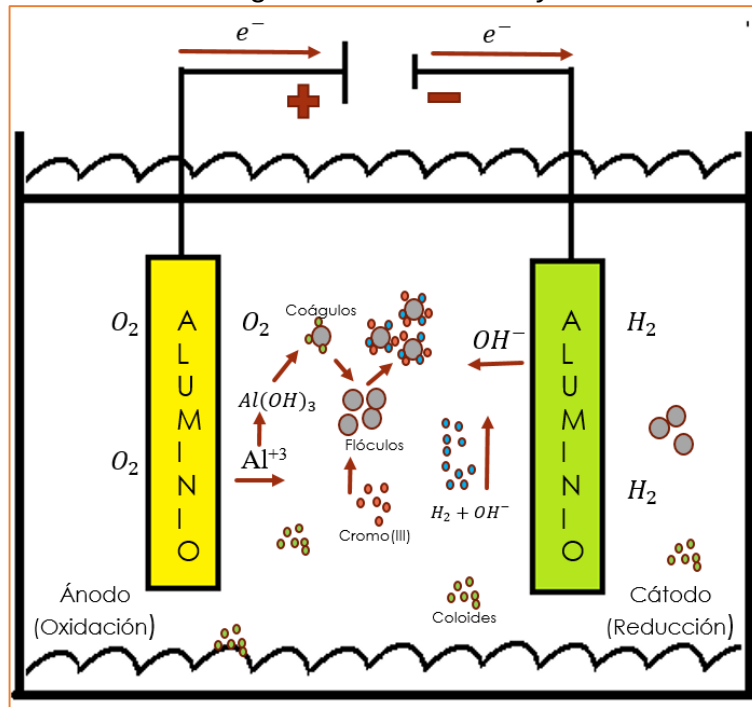
La electrocoagulación es un proceso electroquímico que separa metales pesados, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos emulsionados, y demás contaminantes presentes en el agua de forma simultánea, a través de la aplicación de voltaje en una serie de electrodos inmersos en un reactor, aplicando el principio de la coagulación [17, 3, 26].

El sistema de electrocoagulación está compuesto por un reactor electroquímico donde se lleva a cabo el proceso químico, contiene electrodos divididos en ánodos y cátodos por los cuales circula corriente eléctrica para llevar a cabo la reacción química, el arreglo de los electrodos es de forma monopolar es decir con la polaridad intercalada y por último una fuente de alimentación de corriente directa para suministrar la energía eléctrica que promueve la electrocoagulación [17, 37].

En la electrocoagulación ocurren procesos físicos y químicos de la siguiente forma:

En los electrodos se producen iones con cargas positivas o negativas, los que hacen parte del ánodo son llamados electrodos de sacrificio debido a que el metal se disuelve, a diferencia del cátodo. Los iones producidos desestabilizan las cargas de las partículas contaminantes presentes en el agua, cuando estas se desestabilicen se aglomeran logrando su precipitación si la densidad es mayor o flotación en el caso contrario [5, 34].

Figura 1. Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo de aluminio.



Fuente: Propia.

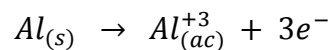
En el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: En primer lugar donde se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y por último la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de estas en el coagulante [3, 33, 34].

La electrocoagulación como alternativa de la coagulación química, tiene como función generar un proceso electrolítico aplicando el principio de coagulación. Cuando se forma un floc por las reacciones de óxido-reducción que ocurre entre los electrodos y el medio acuoso promovidos por la corriente eléctrica, se desestabilizan las moléculas contaminantes volviéndolas más sólidas, menos coloidales, emulsionadas o solubles, causando su flotación si la densidad es baja o precipitación si su densidad es alta. Se forman óxidos que atraen eléctricamente los contaminantes desestabilizados por los iones metálicos liberados en el medio acuoso [3, 31].

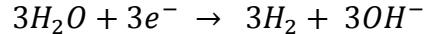
3.2.2. Reacción de electrólisis

La electrólisis es el proceso químico que descompone las sustancias presentes en una solución presente en una celda electrolítica al aplicar corriente eléctrica, en este caso el electrocoagulador [17, 33]. Durante la electrólisis producida en la electrocoagulación ocurren una serie de procesos químicos y físicos representados en la figura 1 y explicados a continuación:

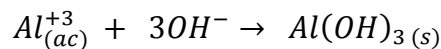
- En la celda electroquímica están dispuestos una serie de electrodos conectados con carga positiva y negativa [3].
- Los electrodos proporcionan iones positivos (Cation) o negativos (Anión), así que ocurre una serie de reacciones que dependen del material del electrodo [3].
- El ánodo o electrodo de sacrificio, provee iones metálicos positivos, la placa metálica se disuelve, estos son los iones que por oxidación electrolítica dan origen a él ión Al^{3+} que forma la sustancia química que hace las veces de coagulante [33].



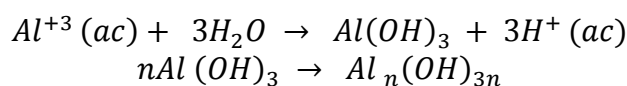
- El cátodo permanece sin disolverse, por la electrólisis este rompe la molécula de agua y forma radicales hidroxilos (OH^{-}) y átomos de hidrogeno (H^{+}) [3].



- El Al^{3+} junto con el radical hidroxilo (OH^{-}) se unen en soluciones alcalinas es decir un pH mayor a 7 para formar la especie coagulante llamada Hidróxido de Aluminio $Al(OH)_3$ [3].



- El hidróxido de aluminio actúa como coagulante y este desestabiliza las cargas de las partículas contaminantes presentes en el agua residual mediante la neutralización de las cargas superficiales logrando que se adhieran a él y se formen los coágulos [3, 33].
- En la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución del metal en sus iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio es decir el Al^{3+} [3].
- Cuando las cargas se neutralicen, comienza el proceso de coagulación, ya que los sistemas se neutralizan y mantiene las partículas en suspensión [3, 33].



- El proceso de electrocoagulación se rige de acuerdo a la ley de Faraday, cuando la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de la sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema, esto se expresa en la siguiente ecuación [3].

$$m = \frac{I * t}{96500} * \frac{M}{n}$$

m = masa de la sustancia producida en el electrodo (g)

I = Corriente eléctrica (A)

t = tiempo transcurrido (s)

M = Masa molar de la sustancia ($\frac{g}{mol}$)

n = número de valencia de la sustancia como ión en la solución ($\frac{e^-}{mol}$)

- Se desencadena un proceso de eliminación de contaminantes por reacciones químicas en donde se logró precipitar y suspender flocs [3, 33].

3.2.3. Reactor de electrocoagulación

El electrocoagulador es el reactor principal donde se realiza el proceso de electrocoagulación es decir la zona de reacción, su diseño se basa en reactor tipo batch usado a nivel laboratorio que depende de las características del contaminante y su concentración [6, 3]. El diseño también depende de la cantidad de área superficial de los electrodos presentes, porque a mayor número de placas hay buena disolución de iones metálicos es decir más sustancia coagulante; estas placas pueden ir conectadas en serie o paralelo formando el ánodo y cátodo según sea la polaridad [31, 32, 36].

3.2.4. Variables que afectan el proceso de electrocoagulación

El conocimiento adecuado de las variables permite identificar cuales afectan la electrocoagulación, decidiendo como ejercer el proceso para lograr una remoción alta de contaminantes [17, 35].

- **Variables del electrodo:** Estas variables están enfocadas a las características físicas y químicas de los electrodos, estos dependen del material, los más usados según pruebas previas, revisadas en la bibliografía son hierro y aluminio [41]. El área superficial que depende del tamaño del electrocoagulador y por último la condición superficial refiriéndose al desgaste de los electrodos generado por la electrólisis [17, 34].

- **Variables de la solución:** Estas variables se tienen en cuenta por las características físicas y químicas del agua dispuesta a tratar; en este caso la concentración del contaminante, el volumen de agua, el pH y la conductividad. El pH influye en la eficiencia de la corriente en el proceso de la solubilidad del metal para formar el hidróxido [17, 3]. El rango del pH donde la remoción tiene una mayor eficiencia es de 6 a 8. En el caso de la conductividad al aumentar la densidad de corriente este aumento se realiza con electrolitos como cloruro de sodio o cloruro de calcio [3, 25].
- **Variables externas:** Se tiene en cuenta el tiempo porque es la variable que afecta el proceso, este depende de la corriente. A partir de una selección adecuada del tiempo el tratamiento resultara ser eficiente [17, 35].
- **Variables eléctricas:** Las variables eléctricas a tener en cuenta es la aplicación de voltaje, la corriente arrojada, esto para determinar el tipo de fuente de alimentación para que funcione el proceso de electrocoagulación [17, 25]. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente, el aumento de la conductividad incrementa el aumento del consumo energético, produciendo una pérdida por la transformación de energía eléctrica en calórica aumentando la temperatura en el proceso de electrocoagulación [3, 32].

3.2.5. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de Electrocoagulación.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Los costos de operación son menores en comparación con los procesos convencionales usando polímeros.	Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
Requiere de equipos simples y de fácil operación.	
Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.	Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problema de disposición de estos lodos.	
Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.	
Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminante.	Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de energía eléctrica sea alto.
Purifica el agua y permite su reciclaje.	

El paso de corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.	
Reduce la contaminación en cuerpos de agua.	
El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.	El óxido formado en el ánodo puede formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.
Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.	
Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidas con mayor facilidad.	

Fuente: [17, 3, 18, 37].

3.3. Uso de LabVIEW como software para el control del prototipo de electrocoagulación

Para realizar la automatización del equipo de electrocoagulación se usara el software LabVIEW.

3.3.1. LabVIEW

El software LabVIEW (Laboratory Virtual Engineering Workbench), fue creado por National Instruments en 1976 [44]. Esta plataforma es un entorno de programación gráfica utilizada por ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de control, medida y prueba, usando íconos gráficos y cables similares a un diagrama de flujo [44].

Este programa ofrece una integración con dispositivos hardware de análisis avanzado y visualización de datos con la finalidad de crear instrumentación virtual por medio de representaciones gráficas, indicadores y botones de control virtual que generen señales las cuales se muestren en la pantalla del computador personal para que sean visualizadas por el usuario [44].

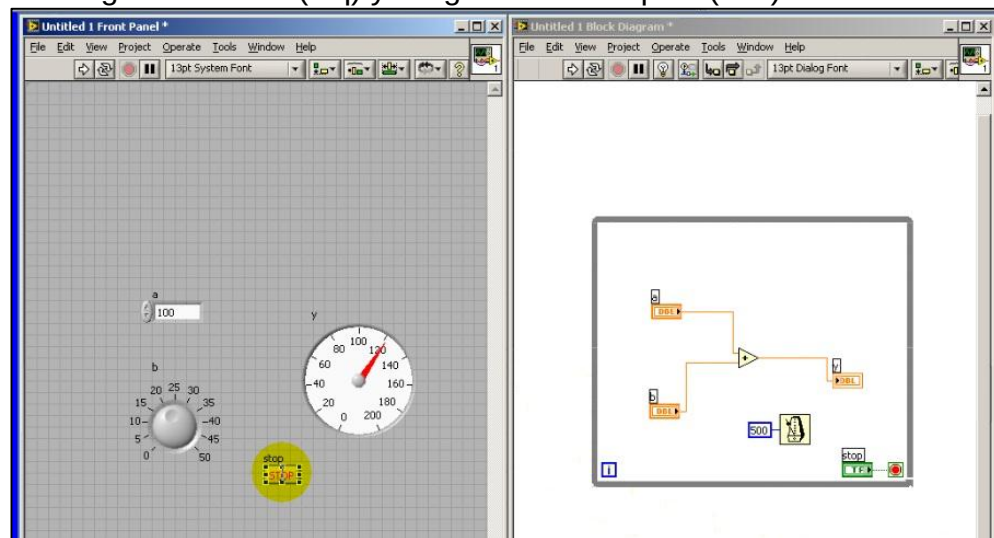
El objetivo de LabVIEW es usar un computador personal el cual procese o genere las señales adquiridas por sensores que están ubicados en prototipos o dispositivos donde se llevara a cabo la prueba, con la intención de realizar adquisición de señales, procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de datos relacionados con una medición de una o varias variables por medio de la instrumentación virtual [43].

3.3.2. Ambiente de desarrollo de la plataforma LabVIEW

LabVIEW es un ambiente de programación que busca desarrollar procesos de automatización, cada programa desarrollado en LabVIEW se denomina Instrumento virtual o también llamado VI's, estos tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, puntualizadas a continuación:

- **Paleta de herramientas:** También llamada Tools palette, es donde se encuentran todas las herramientas para programar necesarias para interactuar con los objetos disponibles en el panel frontal y diagrama de bloques [45].
- **Panel frontal:** Interfaz gráfica del VI con el usuario, este recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Está formado por botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos que son definidos como control o indicador; en un control se permiten introducir los parámetros al VI y en un indicador se muestran los resultados producidos por adquisición de datos o resultados de alguna operación [45, 46].
- **Diagrama de Bloques:** Constituye el código fuente del VI, se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar algún proceso de las entradas y salidas que han sido creadas en el panel frontal por medio controles e indicadores que son unidos por terminales. Para diseñar el programa se pueden usar funciones aritméticas, comparaciones, conversiones o también estructuras como bucles, for, while o case, que permiten ejecutar el código de forma condicional o repetitiva [46].

Figura 2. Diagrama frontal (Izq) y Diagrama de bloques (Der).



Fuente: [46].

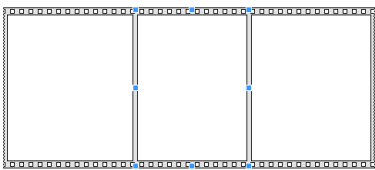
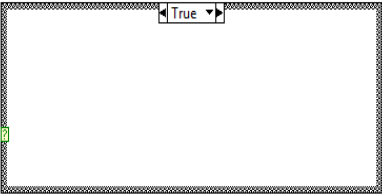
El programa en LabVIEW puede conformarse por VI's, SubVI's o variables globales funcionales.

- **VI:** Programa que manipula el usuario [46].
- **SubVI:** VI que se crea dentro de otro VI [46].
- **Variable Global Funcional:** Un sistema embebido que tiene una función específica y se abre dentro de un SubVI [46].

3.3.3. Estructuras y modelos de programación

Para el desarrollo de este proyecto se usaran distintas estructuras explicadas a continuación:

Tabla 2. Estructuras y modelos de programación de LabVIEW.

Imagen y nombre de la Estructura	Función
Estructuras Secuenciales 	Es una estructura de que contiene uno o más subdiagramas, utiliza una estructura de secuencia plana que se ejecuta de izquierda a derecha [67]. (Estructura usada para el diseño de software de las electroválvulas)
Estructura Case 	Esta estructura actúa como comparador Booleano, en la que se coincidirían dos casos correspondientes a verdadero y el falso. En esta estructura es posible conectar un conector de entrada y uno de salida [67]. (Estructura usada para el diseño de software de aplicación de voltaje).
Estructura While loop 	Esta estructura es repetitiva de control interno importante para la creación de un algoritmo, repite el código dentro de su subdiagrama hasta que ocurre una condición específica. Un bucle while siempre se ejecuta al menos una vez [67]. (Estructura usada para el diseño de software de bienvenida, reconocimiento de la práctica, y tiempos).
Estructura For loop 	Estructura repetitiva que cuenta con un control externo en donde se especifica n cantidad de veces que se desea ejecutar el ciclo, Repite el código dentro de su subdiagrama hasta que ocurre una condición específica [67]. (Estructura usada para el diseño del software de aplicación de voltaje).

3.3.4. Aplicaciones de LabVIEW en la industria

La aplicación de LabVIEW se enfoca en el desarrollo de medidas sencillas o generación de prototipos a la medida, con este software se pueden adquirir datos y procesar señales, automatizar sistemas de pruebas de validación, crear control de instrumentos o sistemas embebidos de monitoreo y control, generación de prototipos para enseñanza académica o para implementar en industrias para darle un enfoque de ingeniería verde es decir diseño de tecnologías de generación de potencia ecológicamente limpias para reducción de contaminantes en aire, suelo y aguas, con un costo de operación accesible causando efectos positivos en el medio ambiente y la economía a nivel global [45].

En Colombia LabVIEW se ha convertido en una herramienta base para el desarrollo de sistemas de control y supervisión industrial (SCADA), como también un lenguaje de programación con gran relevancia para la investigación y desarrollo de soluciones a nivel académico [45].

LabVIEW también se incorpora en la formación académica integrándose como uno de los ambientes de programación más importantes de instituciones reconocidas mundialmente como Harvard, Instituto tecnológico de Massachusetts, Nasa. En Colombia son pocas las universidades que cuentan con LabVIEW Academy entre estas se encuentra La universidad tecnológica de Bolívar, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Universidad Santo Tomás, Universidad EAFIT y la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano [45].

4. DESARROLLO CENTRAL

Para llevar a cabo este proyecto se debe tener en cuenta el diseño conceptual del reactor, el lugar donde se realizará la reacción de electrocoagulación, como este reactor será automatizado se escogió el software LabVIEW donde se podrá mecanizar la automatización para la aplicación de voltaje por parte del usuario y la dosificación de soluciones como el cromo hexavalente, hidróxido de sodio y cloruro de sodio por medio de electroválvulas; para que las tareas pedidas por el usuario en el software sean transmitidas al prototipo de electrocoagulación es necesario usar un hardware que lea las señales y estas sean aplicadas respectivamente.

A continuación se muestra un esquema que representa el desarrollo de la metodología planteada en este proyecto, el cual está escrito y explicado por capítulos.

Figura 3. Pasos que describen la metodología planteada en el proyecto.

CAPITULO 1	CAPITULO 2	CAPITULO 3	CAPITULO 4
Diseño conceptual del electrocoagulador	Desarrollo del Hardware y el componente electrónico del sistema	Diseño y desarrollo del Software	Ensamblaje y construcción del prototipo de Electrocoagulación automatizado.

Fuente: Propia.

CAPÍTULO 1: Diseño conceptual del electrocoagulador

1.1. Diseño conceptual del electrocoagulador

A partir de la revisión bibliográfica en diferentes bases de datos científicas en especial Science Direct, Scopus, Libros de ingeniería, etc. Se realizaron varias búsquedas sobre los parámetros de control más representativos en el proceso de electrocoagulación [6, 26].

El primer parámetro a tener en cuenta fue el área de la celda de electrocoagulación porque de este depende el volumen de solución a tratar. De acuerdo a varios proyectos de investigación se escogían diferentes tamaños de reactores en los que se realizaba el proceso de electrocoagulación, algunos pequeños y otras veces muy grandes, por lo tanto se decidió tomar 3 reactores de plástico de común venta en las misceláneas, con tres tamaños diferentes, para así probar cual era el más eficiente para luego construirlo y automatizarlo.

El primer diseño experimental se lleva a cabo en tres reactores tipo batch para probar en cuál de ellos era más eficiente el proceso de electrocoagulación con cromo hexavalente como contaminante modelo, el material de cada uno es de plástico por lo que se hacen fáciles de manejar, las medidas de cada reactor son:

Tabla 3. Medidas de los tres reactores de electrocoagulación.

	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Largo	12 cm	7,5 cm	18 cm
Ancho	8 cm	11 cm	13 cm
Alto	9 cm	11 cm	9 cm
Volumen	864 cm ³	907 cm ³	2357 cm ³

Fuente: Propia.

El segundo parámetro importante es el tipo de electrodo. Se realizaron pruebas con 4 electrodos en cada reactor, su material era de Aluminio tanto el ánodo como el cátodo debido a que algunas investigaciones realizadas en otros proyectos definen que este material es más efectivo que el hierro y por último la distancia entre electrodos que fue de 1 cm. Estos electrodos fueron hechos a la medida de cada reactor seleccionado anteriormente en una escombrera de aluminio sus medidas fueron las siguientes [36]:

Tabla 4. Medidas de los electrodos de cada reactor de electrocoagulación.

	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Largo	7,7 cm	10,4 cm	12,8 cm
Ancho	1 mm	1 mm	1 mm
Alto	10 cm	12 cm	10 cm
Área	70 cm ²	124,8 cm ²	128 cm ²

Fuente: Propia.

Antes de ubicar los electrodos en el electrocoagulador se debe realizar un proceso de limpieza lijando el área de cada electrodo de aluminio con una lija de 1200", luego lavar las láminas con agua destilada y enseguida secarlas con papel de filtro, cuando se acabe este proceso se ubican inmediatamente, esto se realiza para que los electrodos puedan recibir corriente eléctrica aplicada desde la fuente [47].

Figura 4. Ubicación de los electrodos en los Reactores de electrocoagulación.



Fuente: Propia.

1.2. Soluciones empleadas para ejercer el proceso de electrocoagulación

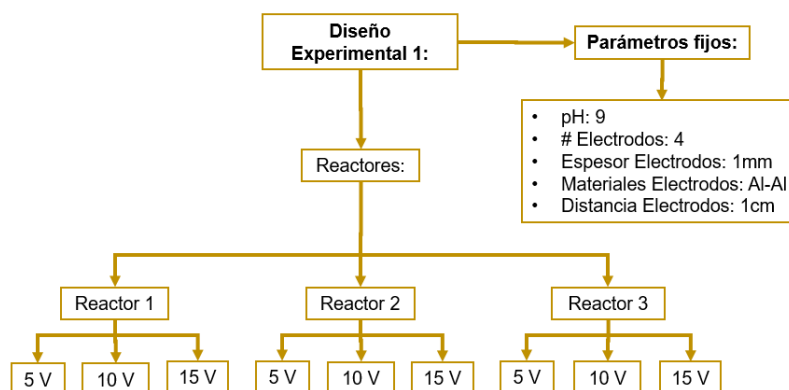
El tercer parámetro importante a tener en cuenta para el proceso de electrocoagulación es las variables de la solución de acuerdo al pH y la conductividad. Para comenzar el diseño experimental se tienen en cuenta las soluciones necesarias para efectuar el proceso de electrocoagulación, se debe tener en cuenta que en este momento la dosificación era manual.

- **Solución de Cromo Hexavalente:** El contaminante usado para determinar el diseño conceptual y verificar el funcionamiento de cada reactor fue el cromo hexavalente, porque es un contaminante ambiental muy común usado en las industrias de curtido, galvanoplastia, fabricación de pigmentos e industrias de fertilizantes [25, 24]. El procedimiento que se realizó para esta solución se encuentra en el ANEXO 1.
- **Solución de NaOH:** Esta solución es uno de los agentes más adecuados para precipitar el cromo, en este proyecto se usa para ajustar el pH variable que interviene en el proceso para formar hidróxidos, según la bibliografía el proceso de electrocoagulación es más eficiente si se maneja un pH de 7 a 9 [38], en el caso de estas pruebas el pH ajustado será 8. En el laboratorio se disponía NaOH a 2,5 M este se fue agregando poco a poco hasta ajustar el valor de pH a 8.
- **Solución de NaCl:** Esta solución se usa para aumentar la conductividad en la solución que se está tratando esta es una variable importante en la electrocoagulación, el efecto que la conductividad tiene es el incremento de la densidad de corriente, por ende esta solución de sal permite el transporte de la carga eléctrica entre los electrodos en forma de iones [38]. Se agregaron 10 ml de NaCl al 1,7 M preparado previamente ANEXO 2.

1.3. Desarrollo del diseño experimental para escoger el reactor más eficiente

La primera prueba realizada se apoya en 9 ensayos con 2 repeticiones, estableciendo una serie de variables fijas y variables eléctricas, dentro de las variables fijas esta: el pH, numero, espesor y material de los electrodos, y también la distancia entre electrodos, en cuanto a la variación del parámetro eléctrico se fijó el voltaje, y se midió la corriente que requiere el proceso de electrocoagulación en cada reactor en un lapso de tiempo de 50 minutos para así tener un conocimiento previo para determinar el diseño del hardware.

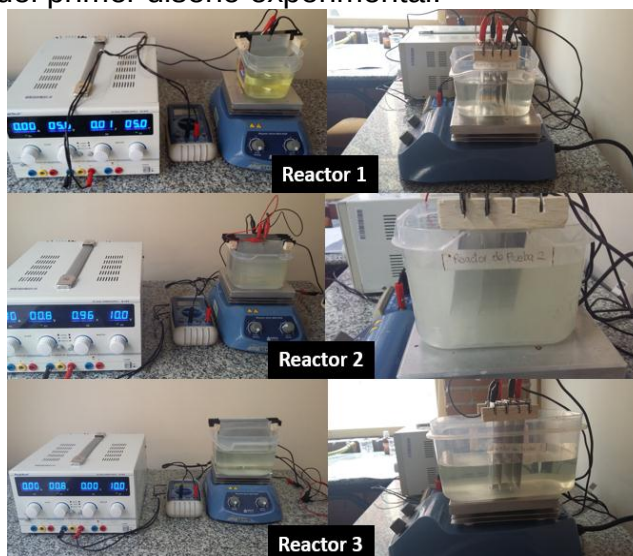
Figura 5. Diseño Experimental 1.



Fuente: Propia.

Para realizar el primer diseño experimental se debe tener en cuenta las preparaciones previas explicadas anteriormente. Se toma una solución de Cr (VI) con una concentración inicial cercana a 2 mg/l. La conexión de los electrodos es de forma monopolar, es decir intercalando el ánodo y el cátodo.

Figura 6: Montaje del primer diseño experimental.



Fuente: Propia.

Para analizar los resultados obtenidos de este primer diseño experimental se debe tener en cuenta el método de detección de cromo hexavalente, para determinar al final de cada prueba la eficiencia de cada tanque al aplicar los valores de 5V, 10V, 15V indicados en la figura anterior.

1.3.1. Método de detección de cromo hexavalente por espectrofotometría con 1,5 difenilcarbazona

Se escogió este método colorimétrico para determinación de cromo VI porque es una de las técnicas más económicas, eficaces, exactas y precisas en la identificación de este oxianión en solución [23]. Se basa en una reacción cromo VI con la 1,5-difenilcarbazida en medio ácido el cual pasa a 1,5-difenilcarbazona formando un complejo de color rojo-violeta que se determina colorimétricamente a una longitud de onda de 540nm con el espectrofotómetro. Se establece que la intensidad del color es directamente proporcional a la concentración de cromo hexavalente [22, 24].

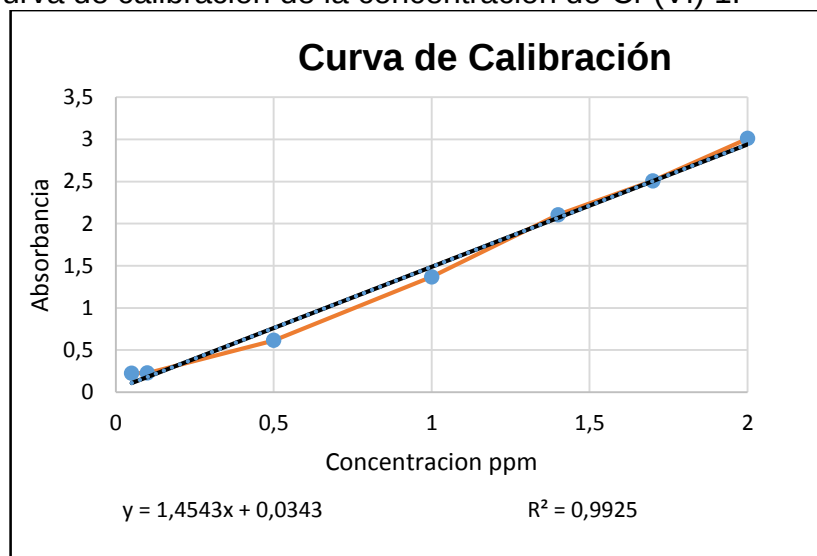
La preparación de esta curva de calibración se explica en el ANEXO 3. Los resultados de esta curva de calibración fueron los siguientes:

Tabla 5. Curva de calibración de la concentración de Cr (VI).

Concentración de Cr (VI) (mg/L)	Absorbancia (A)	Tramitancia (%)
0,05	0,2247	59,7
0,1	0,2274	59,4
0,5	0,6146	24,4
1	1,3685	4,3
1,4	2,1041	0,9
1,7	2,507	0,4
2	3,0105	0

Fuente: Propia.

Gráfico 1. Curva de calibración de la concentración de Cr (VI) 1.



Fuente: Propia.

Según el gráfico 1, la curva de calibración arrojada tiene un 99% de confiabilidad, según lo anterior podemos realizar el primer diseño experimental y determinar la

eficiencia en cada reactor a partir de la ecuación de la recta arrojada en el gráfico que es:

$$y = 1,4543 x + 0,0343$$

Donde:

$y = \text{absorbancia}$.

$x = \text{concentracion (ppm ó } \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{)}$

1.4. Resultados de las pruebas de voltaje en 5, 10 y 15 V para cada reactor

Los resultados obtenidos se registraron por cantidad de voltaje aplicado es decir se muestra el comportamiento de los tres reactores en 5V, 10V y 15V respectivamente, el registro de datos se muestran a continuación:

• Aplicando 5 Voltios

Tabla 6. Pruebas de electrocoagulación con 5 voltios.

Tiempo (min)	Reactor 1			Reactor 2			Reactor 3		
	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)
0	0,00	2,55	1,73	0,00	2,74	1,86	0,00	2,37	1,61
5	0,18	1,70	1,15	0,93	2,32	1,57	1,84	2,10	1,42
10	0,19	1,32	0,88	0,95	2,19	1,48	1,85	1,83	1,23
15	0,19	1,14	0,76	0,96	1,85	1,25	1,86	1,52	1,02
20	0,19	1,00	0,66	1,04	1,84	1,24	1,87	1,28	0,86
35	0,19	0,56	0,36	1,10	1,76	1,19	1,90	1,10	0,73
50	0,19	0,55	0,35	1,13	1,66	1,12	1,91	1,02	0,68
60 min después	0,00	0,52	0,33	0,00	0,48	0,31	0,00	0,40	0,25

Fuente: Propia.

• Aplicando 10 voltios

Tabla 7. Pruebas de electrocoagulación con 10 voltios.

Tiempo (min)	Reactor 1			Reactor 2			Reactor 3		
	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)
0	0,00	1,95	1,32	0,00	2,18	1,47	0,00	2,29	1,55
5	2,00	1,72	1,16	2,48	2,11	1,43	2,93	2,05	1,39
10	2,04	1,62	1,09	2,51	2,01	1,36	2,99	1,99	1,35
15	2,10	1,57	1,06	2,54	1,97	1,33	2,99	1,86	1,25
20	2,11	1,50	1,01	2,58	1,57	1,05	3,03	1,77	1,19
35	2,22	1,26	0,84	2,70	1,01	0,67	3,13	1,56	1,05
50	2,35	1,03	0,69	2,72	1,00	0,66	3,21	1,48	1,00

60 min después	0,00	0,67	0,44	0,00	0,12	0,06	0,00	0,46	0,29
----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Fuente: Propia.

- **Aplicando 15 voltios**

Tabla 8. Pruebas de electrocoagulación con 15 voltios.

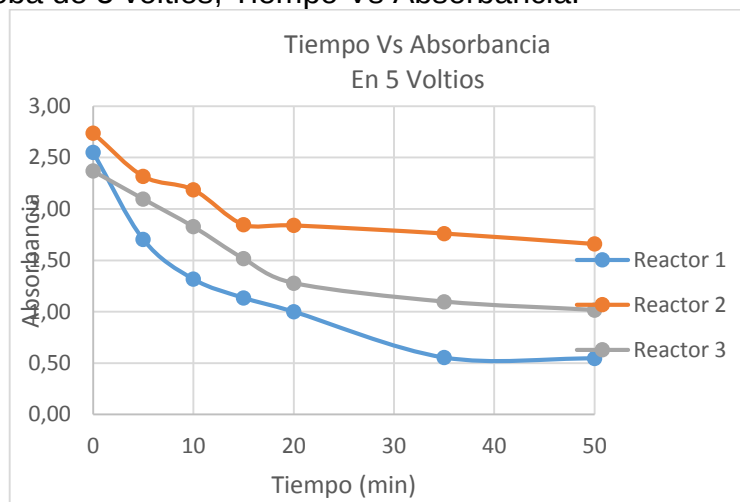
	Reactor 1			Reactor 2			Reactor 3		
Tiempo (min)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Corriente (A)	Absorbancia	ppm (mg/L)
0	0,00	2,21	1,49	0,00	1,46	0,98	0,00	2,77	1,88
5	2,22	1,93	1,31	2,48	1,42	0,95	2,91	2,58	1,75
10	2,32	1,18	0,79	2,49	1,35	0,90	2,95	2,36	1,60
15	2,39	1,10	0,73	2,60	1,14	0,76	2,95	1,96	1,33
20	2,46	1,01	0,67	2,73	0,88	0,58	3,00	1,66	1,12
35	2,67	1,00	0,66	2,93	0,86	0,57	3,50	1,37	0,92
50	2,78	0,98	0,65	2,95	0,84	0,55	3,50	0,76	0,50
60 min después	0,00	0,06	0,01	0,00	0,23	0,13	0,00	0,36	0,22

Fuente: Propia.

A partir de los resultados anteriores arrojados y registrados se realizaron 3 graficas, correspondientes al comportamiento de la reducción de Cr (VI) en cada uno de los reactores de acuerdo a la cantidad de voltaje aplicado en las pruebas con valores de 5V, 10V y 15V.

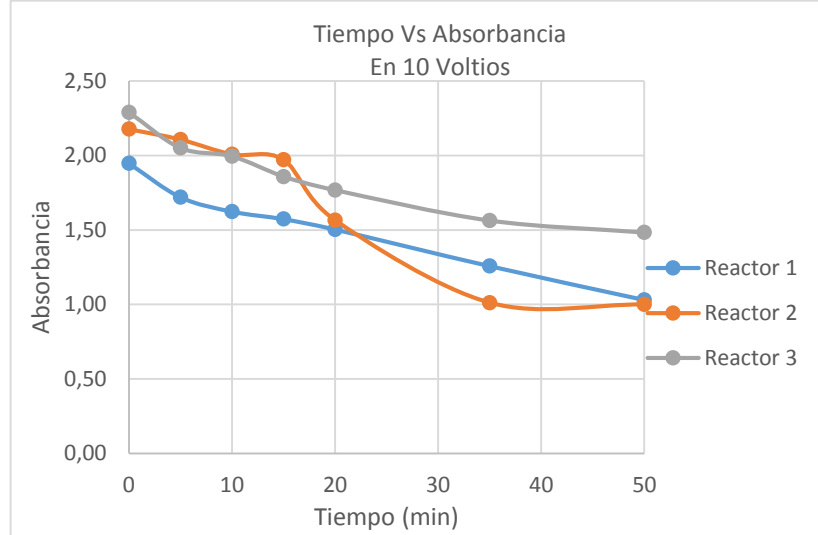
Se graficó la Absorbancia Vs. Tiempo, Dado a que la absorbancia es directamente proporcional a la reducción de Cr (VI) se observa en cada gráfica el comportamiento de la reducción en cada reactor en un tiempo de 50 minutos.

Gráfico 2. Prueba de 5 voltios, Tiempo Vs Absorbancia.



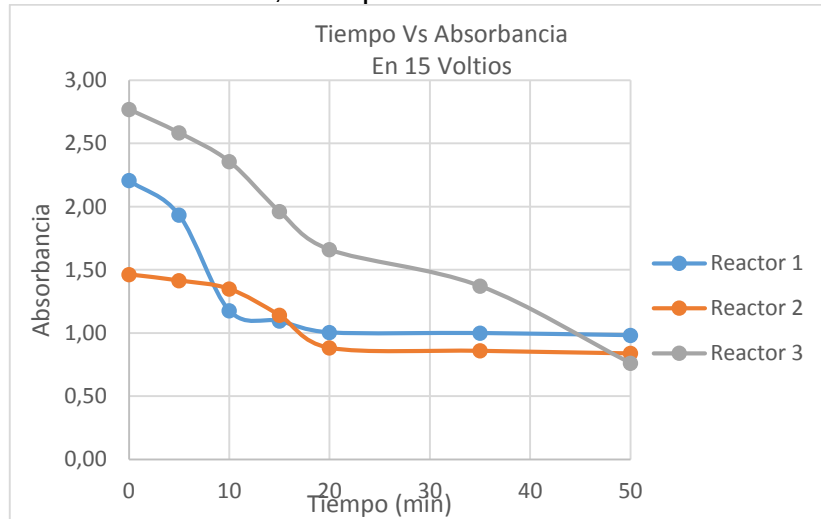
Fuente: Propia.

Gráfica 3. Prueba de 10 voltios, Tiempo Vs Absorbancia.



Fuente: Propia.

Gráfica 4. Prueba de 15 voltios, Tiempo Vs Absorbancia.



Fuente: Propia.

1.5. Análisis del primer diseño experimental

Con respecto a los resultados arrojados del primer diseño experimental se puede decir que:

Según las gráficas 2, 3 y 4 el proceso de electrocoagulación efectivamente remueve cromo hexavalente, la diferencia es que cada reactor actúa diferente, esto depende del área de electrodos con respecto al volumen, esta explicación se da de acuerdo a que la corriente depende de la variación de voltaje.

Los datos de la corriente máxima adquirida en cada prueba fueron los siguientes:

Tabla 9. Corriente máxima adquirida en cada prueba de electrocoagulación al variar el voltaje.

	Corriente (A)		
	Voltaje 5 (v)	Voltaje 10 (v)	Voltaje 15 (v)
Reactor 1	0,19	2,35	2,78
Reactor 2	1,13	3,72	2,95
Reactor 3	1,91	3,21	3,5

Fuente: Propia.

Con estos resultados se puede identificar que a menor inyección de voltaje, se adquiere menos corriente. La corriente mínima adquirida fue en el reactor 1 con un valor de 0,19 amperios, la corriente máxima adquirida fue en el reactor 2 con un valor de 3,72 amperios.

Para analizar la eficiencia de remoción en cada reactor, se obtienen los resultados a partir de la concentración hallada anteriormente y de la siguiente ecuación de eficiencia, expresada a continuación:

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

Los datos de eficiencia en cada prueba fueron los siguientes:

Tabla 10. Eficiencia en cada reactor con respecto al voltaje aplicado.

	Eficiencia en cada reactor (%)		
	Voltaje 5 (v)	Voltaje 10 (v)	Voltaje 15 (v)
Reactor 1	80,86	66,89	99,05
Reactor 2	83,36	96,04	86,29
Reactor 3	84,16	81,22	88,23

Fuente: Propia.

Según las eficiencias arrojadas al aplicar 5 voltios no hay mucha diferencia en los valores, al aplicar 10 voltios la mayor eficiencia se obtuvo en el reactor 2 con 96%, y al aplicar un voltaje de 15 voltios se obtuvo una eficiencia en el reactor 1 con 99%.

Tabla 11. Comparación de eficiencia vs corriente en cada reactor.

Voltaje (v)	R1		R2		R3	
	Eficiencia (%)	Corriente (A)	Eficiencia (%)	Corriente (A)	Eficiencia (%)	Corriente (A)

5	80,86	0,19	83,36	1,13	84,16	1,91
10	66,89	2,35	96,04	3,72	81,22	3,21
15	99,05	2,78	86,29	2,95	88,23	3,5

Fuente: Propia.

Al comparar la eficiencia con la cantidad de corriente adquirida se demuestra que la cantidad de corriente que necesita un proceso de electrocoagulación está relacionada con la cantidad de contaminante removido, fundamental para hacer una evaluación de costos. Se puede determinar que en el reactor 1 respondió a los parámetros establecidos en la reacción ya que adquirió la menor cantidad de corriente al aplicar todos los voltajes, y obtuvo buenas eficiencias en comparación con los reactores 2 y 3.

El reactor final tendrá las medidas del reactor 1, y se establece que el voltaje máximo para realizar el hardware será hasta 5V, a continuación en el capítulo 2 se presenta el desarrollo del hardware y en el capítulo 3 el diseño del software para automatizar las funciones de aplicación de voltaje y dosificación de electroválvulas.

CAPITULO 2: Desarrollo del Hardware y el componente electrónico del sistema

En el siguiente capítulo se explicara el diseño realizado para llevar a cabo el hardware y todo el componente electrónico que compone el sistema.

El hardware es el componente físico, que conecta el programa desarrollado en LabVIEW con el prototipo de electrocoagulación, es quien transforma e interpreta los datos y las instrucciones introducidos en códigos binarios desde el software, para que sean leídos y aplicados al electrocoagulador en forma de señal y así se cumplan las funciones fundamentales de automatización como lo es la aplicación de voltaje pedido por el usuario y encender/apagar las electroválvulas.

2.1. Diseño experimental de hardware

A partir al diseño experimental del Capítulo 1 se estableció que la variación de voltaje será hasta 5 V. Con ayuda del codirector perteneciente a la facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás se decidió que la fuente conmutada se haría con un integrado que arroja hasta 1,4 A porque sería económica y fácil de armar.

Teniendo en cuenta los límites de corriente 1,4 A y de voltaje 5 V, se realizó un ensayo variando el número de electrodos debido a que este prototipo de electrocoagulación se realiza para hacer prácticas de electroquímica ambiental en

el laboratorio y la aplicación de voltaje y corriente arrojada está relacionada al uso del número de electrodos así que los resultados deben ajustarse al hardware, esto estará establecido en el manual del equipo, esta prueba consiste en determinar la cantidad de corriente arrojada hasta 1,4 A al variar el voltaje hasta 5V, este procedimiento se hizo para 4, 6 y 8 electrodos. Los resultados fueron los siguientes:

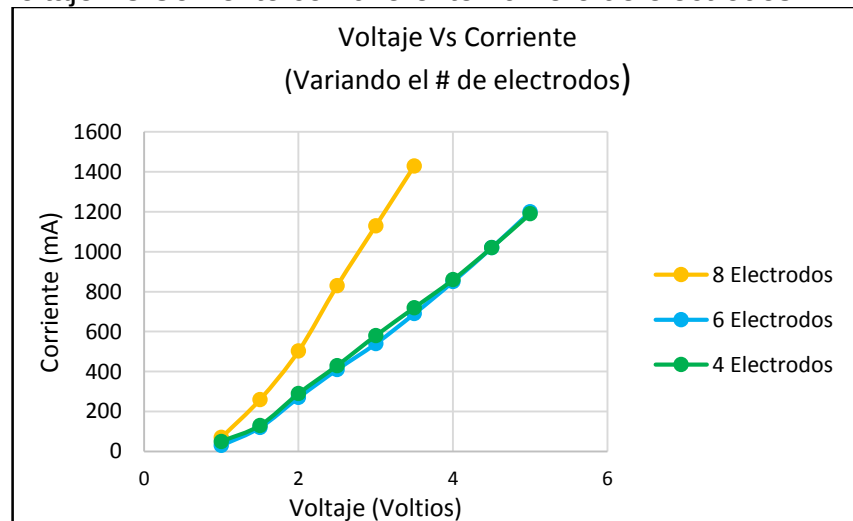
Tabla 12. Valores de corriente arrojados dependientes de la variación de voltaje.

	4 Electrodos	6 Electrodos	8 Electrodos
V	mA	mA	mA
1	50	30	70
1,5	130	120	260
2	290	270	503
2,5	430	410	830
3	580	540	1130
3,5	720	690	1430
4	860	850	-
4,5	1020	1020	-
5	1190	1200	-

Fuente. Propia.

En la tabla anterior se interpreta que al usar 4 y 6 electrodos se lee una corriente de 1,19 A y 1,2 A respectivamente al variar el voltaje hasta 5 voltios como se había establecido al inicio; caso opuesto al usar 8 electrodos aquí se arrojó 1,4 A de corriente al variar el voltaje hasta 3,5 V.

Gráfica 5: Voltaje Vs Corriente con diferente número de electrodos.



Fuente: Propia.

Se expresa en la gráfica que a medida que aumenta el voltaje aumenta la corriente linealmente, es decir que a mayor voltaje aplicado mayor corriente requerida. Se obtuvo una diferencia de 0,1 A usando 4 y 6 electrodos es decir se tratan corrientes similares en estos dos casos al variar de 0 hasta 5 voltios, estos valores son muy

semejantes y es válido expresar que en esta prueba solo se define la cantidad de corriente arrojada al variar el voltaje así que esos valores arrojados se dan por la cantidad de corriente que requiere el sistema.

Al usar 8 electrodos se observa que al aplicar un voltaje de 3,5 voltios la corriente aumenta significativamente hasta 1,4 A límite necesario para realizar el circuito de la fuente de voltaje, en resumen al aumentar el número de electrodos aumenta la corriente requerida por el sistema.

Los componentes físicos, integrados y materiales para construir el hardware se determinaran a partir de este diseño, si en algún momento se aplica un voltaje mayor a los planteados anteriormente, el circuito puede sufrir alteraciones o daños por lo tanto se estropearía el hardware.

2.4. Construcción y funcionamiento del Hardware

A partir de la prueba anterior se definió el diseño de la fuente de voltaje ajustable del hardware en la que se logrará adquirir un máximo de 1,4 A, logrando variar hasta 3,5 y 5 V de acuerdo al número de electrodos.

Para llevar a cabo la fuente de voltaje ajustable (esquema del Anexo 5) se escogió un regulador de tensión llamado LM317k (esquema del ANEXO 5-A) [41] que tiene una intensidad de 1,5 Amperios y variación de voltaje de 1,2 hasta 37 Voltios, en este caso se usara la variación de voltaje de 1,4 V hasta 5 V; el circuito de este regulador de tensión, se armó en la protoboard y se probó con un multímetro y una fuente de alimentación de 30 V; de igual forma se necesitaba un circuito integrado con la capacidad de variar la resistividad a través de una señal por un pulso cuadrado que vendría desde los algoritmos realizados en LabVIEW para esto se escogió el integrado X9C103p o potenciómetro digital de 10 K Ω (esquema Anexo 5 – B) [30], este integrado se conforma de 8 pines que tienen funciones determinantes en el software explicados en su datasheet [41].

Luego de establecer el circuito del potenciómetro digital en la protoboard se probó la lectura de señal en ondas cuadradas y se unió al circuito del LM317k para manipular los niveles de tensión de forma remota desde el programa realizado en LabVIEW. A esta unión se ajusta una fuente conmutada de 5V con el integrado LM2576s_5 (Anexo 6-A) que cumple la función de energizar el potenciómetro digital.

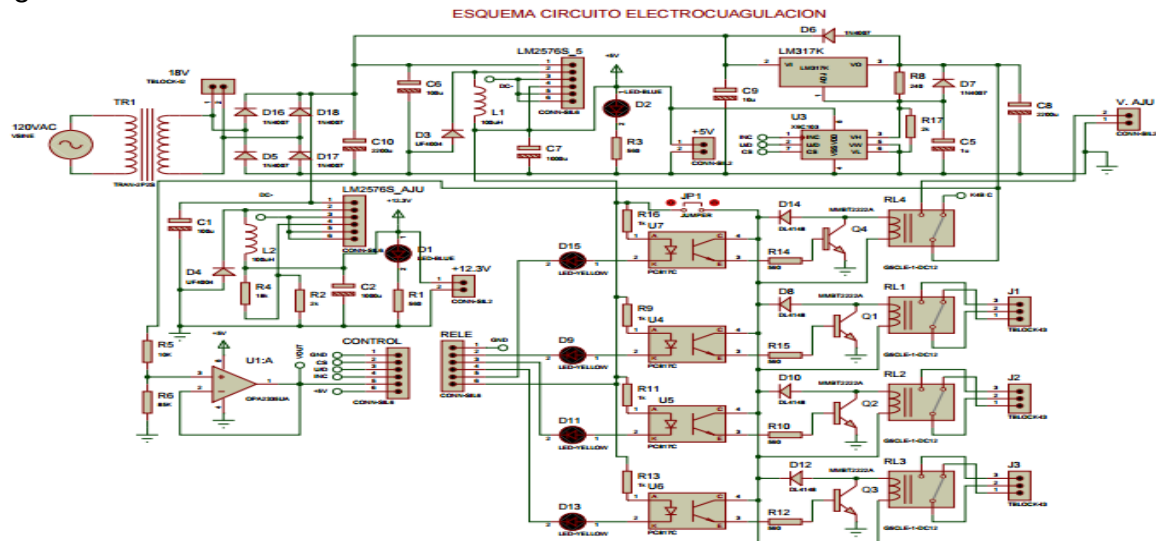
Otra parte del hardware es para elaborar el sistema de automatización de las electroválvulas, cada electroválvula funciona con 12 V así que fue necesario hacer una fuente conmutada con el integrado LM2576s_adj (Anexo 7-A) [7] que energiza el sistema de electroválvulas (Anexo 9) con 12 V y un sistema de rele's que funciona como interruptor controlado por el circuito por medio de una bobina y un electroimán,

al dar la orden desde LabVIEW se acciona el sistema permitiendo abrir y cerrar los circuitos eléctricos independientes.

La fuente de alimentación de todo el circuito se realiza con un transformador EI509 [8] este dispositivo disminuye la tensión inicial recibida de 120 V en forma de corriente alterna desde el toma corriente y la transforma a un voltaje de 18 V para alimentar el circuito; posteriormente se diseña un convertidor de corriente alterna (A/C) a corriente directa (D/C) con un puente rectificador (Anexo 8) para ajustar de una señal sinusoidal a lineal.

El paso a seguir es acoplar todos los circuitos en el software PROTEUS para formar el esquema del plano eléctrico general quedando de la siguiente forma:

Figura 7. Plano electrónico del Hardware.

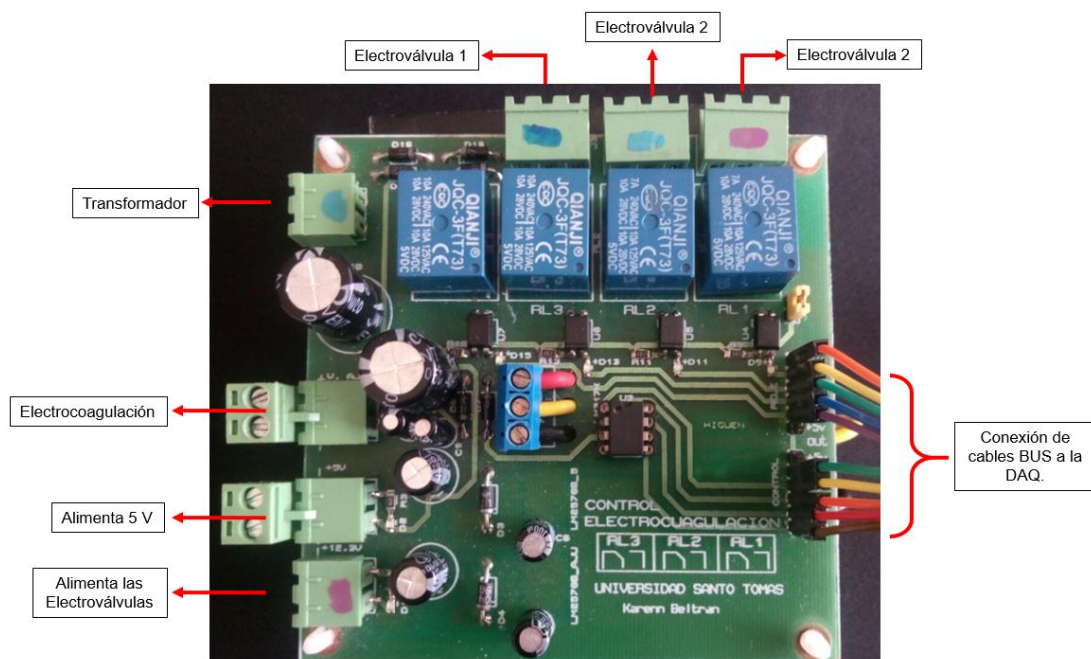


Fuente: Propia. (Imagen adjunta y explicada en el Anexo 4).

2.5. Impreso final del Hardware con sus componentes

Físicamente el hardware es una tarjeta madre, el impreso se realizó por el plano eléctrico diseñado en PROTEUS, en la figura 9 se muestra el resultado del impreso del hardware explicando las terminales de conexión.

Figura 8. Hardware con sus componentes.



Fuente: Propia.

Para que este hardware tenga contacto con los algoritmos creados en LabVIEW se conecta el cable bus ubicado a la derecha de la imagen a la USB – 6008 para realizar adquisición de datos; este proceso se explica en el diseño de software mostrado en el capítulo 3.

CAPITULO 3: Diseño y Desarrollo del software

En este capítulo se expone el diseño de los algoritmos por medio del software LabVIEW que permite la interacción del usuario y el prototipo de electrocoagulación. El software es el componente lógico que realiza las operaciones lógicas entregadas al hardware [44]. En este proyecto se realizó la construcción del algoritmo creado en el software por medio de la adquisición de datos, a continuación se plantea una figura que muestra las partes del software.

Figura 9. Pasos que describen las partes del software.

SubVI 1	SubVI 2	SubVI 3	SubVI 4
Bienvenida y reconocimiento de la práctica	Automatización para el sistema de dosificación de las soluciones usando electroválvulas	Automatización para la Aplicación de voltaje	Toma de datos y gráficas

Fuente. Propia.

La realización de este programa permite la interacción del usuario con el prototipo de electrocoagulación cuenta con cuatro partes dos automatizadas y una manual, como se ha expresado anteriormente las partes de automatización son para las funciones de dosificación de las soluciones usando electroválvulas y aplicación de voltaje.

Adicionalmente se realizó un programa para dar la bienvenida al usuario allí se registra y se hace un reconocimiento a la práctica por medio de una lista de chequeo que permite recordarle al usuario los materiales y pasos que deben estar listos antes de continuar con la práctica de electrocoagulación; en el cuarto SubVI al finalizar se cuenta con un registro, toma de datos y gráfica, aquí aparece una ventana que le recuerda cada 5 minutos que el usuario debe tomar una muestra y esta sea analizarla en el espectrofotómetro, los datos arrojados se registran en el programa y este instantáneamente realiza la gráfica y guarda el registro en una tabla de Excel.

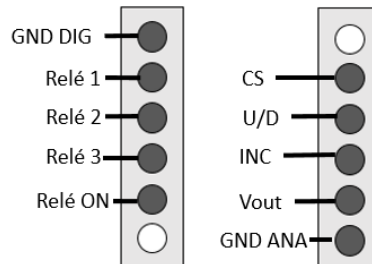
3.6. Adquisición de datos (USB – 6008)

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de acondicionar o convertir señales con un computador personal ya sea un fenómeno físico eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido, en este caso nos enfocamos en aplicación de voltaje. El dispositivo DAQ actúa como la interfaz entre el PC y las señales leídas por el hardware, funciona como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un PC pueda interpretarlas [28].

En este proyecto se trabajó la adquisición de datos con un dispositivo llamado USB – 6008, este cuenta con 32 pines, 8 para entradas analógicas (AI), 2 para salidas analógicas (AO), 12 para entradas y 10 para salidas digitales. La conexión realizada del hardware a la DAQ se hizo por medio de un cable Bus.

Las especificaciones de la regleta que tiene los cables bus son las siguientes:

Figura 10. Significado de cada terminal del cable bus.



Fuente: Propia.

Estos van conectados a los pines de la DAQ de la siguiente forma:

Tabla 13. Conexión de las terminales del cable bus a los pines de la DAQ.

PIN DAQ	CABLE BUS
32	GND Digital
17	Relé 1
18	Relé 2
19	Relé 3
27	Relé ON
25	U/D
26	INC
2	Vout
1 y 3	GND Análoga

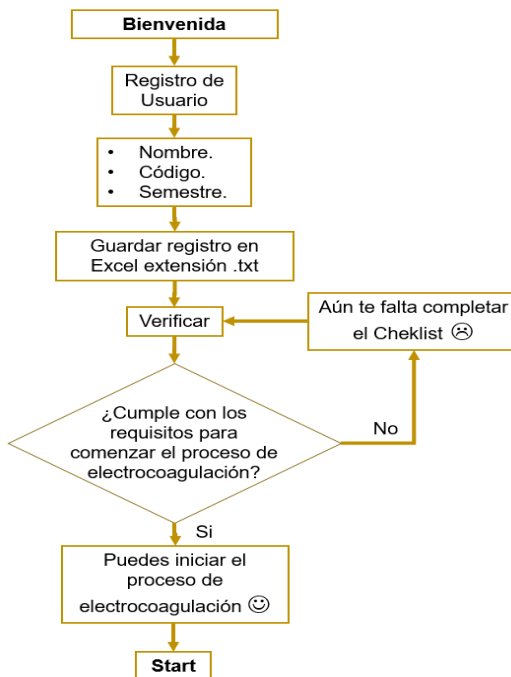
Fuente: Propia.

De acuerdo a esto se comenzó el diseño de cada VI mostrado a continuación.

3.7. Diseño del VI “Bienvenida y reconocimiento de la práctica”

Este SubVI se desarrolló para dar la apertura del software permitiendo al usuario interactuar con el programa, Antes de armar un VI se debe realizar una representación gráfica del proceso a seguir. El diseño de este SubVI se formó a partir del diagrama de flujo evidenciado a continuación:

Figura 11. Diagrama de flujo VI “Bienvenida y reconocimiento de la práctica”.



Fuente: Propia.

Luego de analizar sus pasos se construye. Al correr este SubVI se debe registrar el nombre, código y semestre del usuario, luego se da click en guardar por lo que en el programa se envía a la tabla de registro guardada en un Excel con extensión .txt que podrá ser vista en cualquier momento.

Figura 11. Inicio del SubVI de Bienvenida y Checklist.

Nombre	Codigo	Semestre
KARENIN	2106726	10
KARENIN	2106726	10
christian	2080907	10

Fuente: Propia.

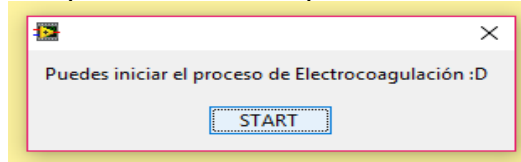
Al darle click en guardar se abre instantáneamente una ventana que funciona como una lista de chequeo, en donde se muestra una lista a tener en cuenta, como los electrodos lijados, electrodos puestos, soluciones listas en el prototipo de electrocoagulación, espectrofotómetro a 540 nm, y transformador encendido, este proceso se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 13. Verificar la lista de chequeo.

Fuente: Propia.

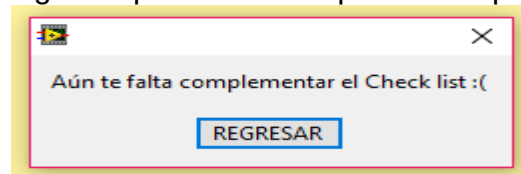
Si el usuario cumple con todos los requisitos puede continuar con la práctica mostrado en una ventana (Figura 14), de lo contrario saldrá una ventana que le recomienda regresar y verificar de nuevo (Figura 15).

Figura 14. Ventana que da paso al iniciar el proceso de electrocoagulación.



Fuente: Propia.

Figura 15. Ventana de regresar para verificar que se cumpla con el checklist.



Fuente: Propia.

Al terminar con este SubVI inmediatamente aparece el tiempo establecido para las electroválvulas, este tiempo se determinó con un diseño experimental explicado en a continuación

3.8. Diseño del sistema automatizado para la dosificación de las soluciones usando Electroválvulas

A continuación se presentara el diseño experimental que se realizó para la dosificación de las soluciones de Cromo hexavalente, Hidróxido de sodio y Cloruro de sodio indispensables en el proceso de electrocoagulación. Esta prueba se realizó en una maqueta previamente construida en la que se instalan las 3 electroválvulas y se ajustan a los tanques que contiene la solución respectivamente.

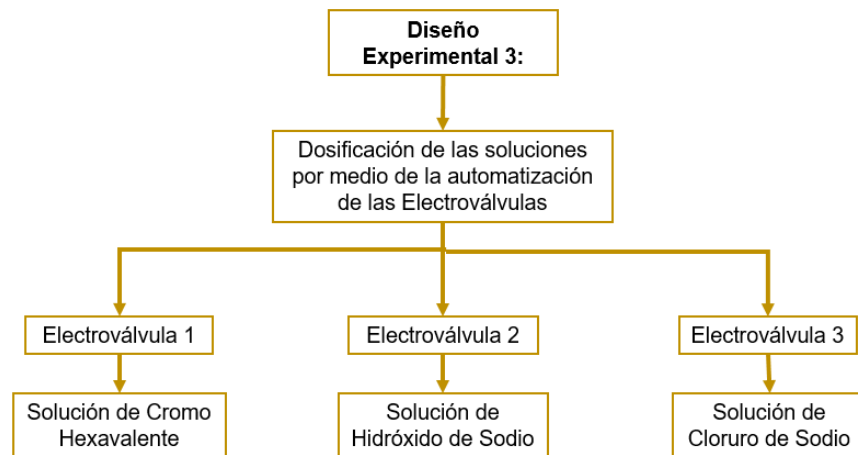
Figura 16. Sistema de electroválvulas para automatizar el sistema.



Fuente: Propia.

3.8.1. Pruebas de dosificación para cada solución

Figura 17. Diseño experimental del sistema de dosificación.



Fuente: Propia.

Se realizó un diseño experimental para determinar el tiempo justo en el que cada electroválvula deba cerrarse, debido a que se realizara un sistema automatizado con el software LabVIEW, lo que permite dosificar la cantidad exacta de solución, el diseño de algoritmos se muestra más adelante. Cada prueba consta de 6 repeticiones para cada electroválvula en la cual se determinará el tiempo que tarda cierto volumen de solución en caer al tanque, los resultados son:

- **Diseño experimental para la dosificación de Cromo Hexavalente:** La prueba se realizó con un tanque que contenía 900 ml de solución.

Tabla 14. Tiempo que tarda la solución de Cromo VI en caer al reactor.

Repetición	Volumen (ml)						
	1s	5s	10s	15s	20s	25s	30s
1	4,06	20,93	43,11	63,65	83,86	99,27	120,48
2	3,96	21,13	42,89	63,69	80,68	101,77	115,81
3	4,09	21,18	42,78	63,44	84,99	96,42	117,16
4	4,11	21,02	42,32	63,00	81,46	95,43	110,66
5	4,17	21,45	42,59	62,82	82,54	94,55	110,59
6	4,21	21,29	42,59	63,16	81,00	98,77	106,41

Fuente: Propia.

Según los datos arrojados en esta prueba se identifica que en un lapso de 30 segundos el promedio de volumen de solución arrojado al reactor es de 113,52 ml. Dado que el volumen del reactor escogido en el diseño conceptual del electrocoagulador es aproximadamente es de 700 ml, se define que el tiempo que

tarda la electroválvula en descargar la solución de cromo hexavalente al reactor de electrocoagulación es de 3 minutos.

- **Diseño experimental para la dosificación de Hidróxido de Sodio:** La prueba se realizó con un tanque de (70 ml).

Previamente se realizó una prueba de pH en la solución de Cr (VI). La solución inicial tiene un pH de 6, la concentración de NaOH es de 2,5 M, los resultados arrojados fueron los siguientes:

Tabla 15. Prueba de pH para determinar la solución de NaOH.

V (ml) de solución de NaOH	Promedio pH
0,5	7,36
1	8,61
1,5	9,26
2	9,70
2,5	9,93
3	10,08
3,5	10,22
4	10,35

Fuente: Propia.

Para efectuar el proceso de electrocoagulación se ajustó a 9 el pH, según los datos registrados en la tabla 13, el pH que se necesita se logra al agregar desde 1,5 a 2 ml de solución de NaOH ajustando el pH a valores entre 9,26 y 9,7. Ahora se realiza una prueba de la cantidad de volumen que tarda en caer al reactor por la electroválvula los datos son:

Tabla 16. Tiempo que tarda la solución de NaOH en caer al reactor.

Repetición	Volumen (ml)				
	1s	5s	10s	15s	20s
1	2,34	11,96	22,00	35,12	46,20
2	2,34	11,60	22,10	36,86	44,14
3	2,43	11,37	21,84	35,32	43,25
4	2,45	10,77	21,80	35,19	45,34
5	2,44	11,40	21,79	33,12	45,54
6	2,53	11,23	21,70	35,18	47,89

Fuente: Propia.

Esto quiere decir que en aproximadamente 2,5 ml de solución caen en 1 s.

- **Diseño experimental para la dosificación de Cloruro de Sodio:** La prueba se realizó con un tanque de (70 ml).

En la prueba inicial se agregó 10 ml de NaCl al 1,7 M, esto para favorecer la disolución del ánodo y se logre un buen proceso de electrocoagulación. Para que la descarga de los 10 ml de solución en el tanque sea exacta se lleva a cabo la siguiente prueba:

Tabla 17. Tiempo que tarda la solución de NaCl en caer al reactor.

Repetición	Volumen (ml)				
	1s	5s	10s	15s	20s
1	2,90	16,43	34,50	51,60	68,52
2	2,27	16,18	33,97	49,83	66,91
3	2,59	16,55	34,64	52,26	69,19
4	3,04	16,95	34,67	52,73	70,17
5	2,77	16,69	34,69	52,31	64,08
6	2,62	17,07	34,65	52,26	62,97

Fuente: Propia.

Según los datos arrojados se realiza una interpolación de los datos arrojados y se define que en 3 s la cantidad de volumen que cae al reactor por la electroválvula es de 10 ml.

3.8.2. Resultados de las pruebas de dosificación para cada electroválvula

Los resultados generales se muestran en la siguiente tabla. Se determina la cantidad de tiempo que debe estar activa cada electroválvula para que se realice una descarga adecuada de cada solución.

Tabla 18. Tiempo y volumen adecuados de cada solución.

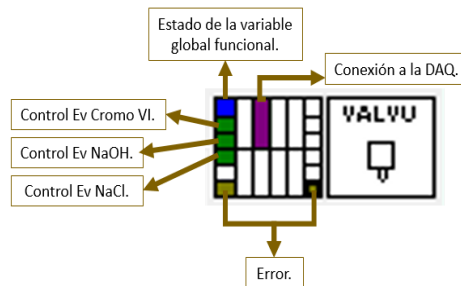
	Tiempo (s)	Volumen (ml)
Cromo VI	186	700
NaOH	1	2,5
NaCl	3	10

Fuente: Propia.

3.8.3. Diseño del software usado para la automatización de las electroválvulas

El VI de electroválvulas permite que estas sean automatizadas es decir que se abran y cierren de acuerdo al tiempo estimado en el diseño experimental de cada electroválvula explicado en el punto 3.3.1, este VI está compuesto por una variable global funcional que tiene el objetivo de transmitir la señal por medio de adquisición de datos, este se formó a partir de una máquina de estados, cuyo objetivo es realizar un canal que genere una señal digital que tenga los bits indicados para cerrar y abrir las electroválvulas.

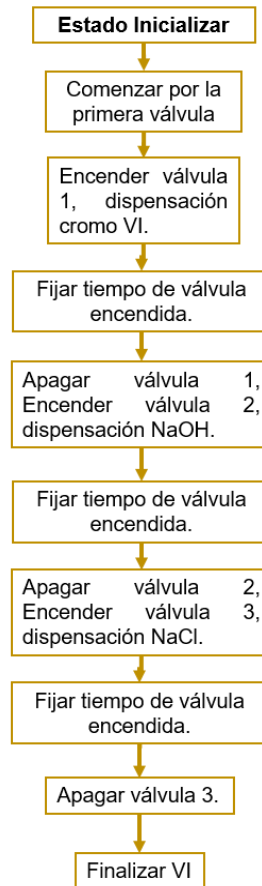
Figura 18. Icono de la variable global funcional de las electroválvulas y su sus funciones.



Fuente: Propia.

El VI principal está diseñado por una estructura de secuencia representada en el diagrama de flujo mostrado en la siguiente figura.

Figura 19. Diagrama de flujo para las electroválvulas.



Fuente: Propia.

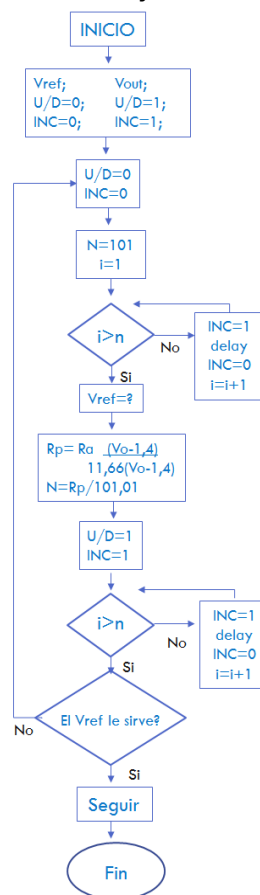
Al correr este VI se enciende la electroválvula 1 para dispensar cromo VI durante 186 segundos luego se cierra y enseguida se abre la electroválvula 2 para dispensar

NaOH durante 1 segundo al cerrarse inmediatamente se abre la electroválvula 3 para dispensar sal disuelta y se cierra en 3 segundos como se indicó en el diseño experimental para cada electroválvula expresado en el punto 3.3. En este VI no se observa nada en el panel frontal porque la automatización del sistema de dosificación fue realizada por el programador es decir que al correr todo el programa se hace desde la programación en el diagrama de bloques ya que los tiempos son fijos y el usuario no puede cambiarlos.

3.9. Diseño del VI “Inicio (Aplicación de voltaje)”

La aplicación de voltaje se diseñó a partir de una lógica de diagrama de flujo de la siguiente forma: El usuario aplica un voltaje requerido, el programa identifica la señal y sigue una serie de pasos internos que analiza los valores obtenidos en la adquisición de datos permitiendo el paso de las señales al hardware quien aplica a los electrodos el voltaje deseado logrando así que se realice el proceso de electrocoagulación, esto se muestra a continuación:

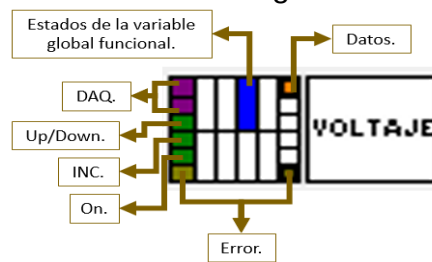
Figura 20. Diagrama de flujo del VI de voltaje.



Fuente: Propia.

Este VI está compuesto de una variable global funcional que al igual que el VI de las electroválvulas tiene el objetivo de transmitir la señal por medio de adquisición de datos, este se formó a partir de una máquina de estados, cuyo objetivo es realizar un canal que genere una señal digital que tenga los bits indicados para aplicar la señal de voltaje cercana a la requerida por el usuario.

Figura 21. Icono y explicación de la variable global funcional del VI de voltaje.

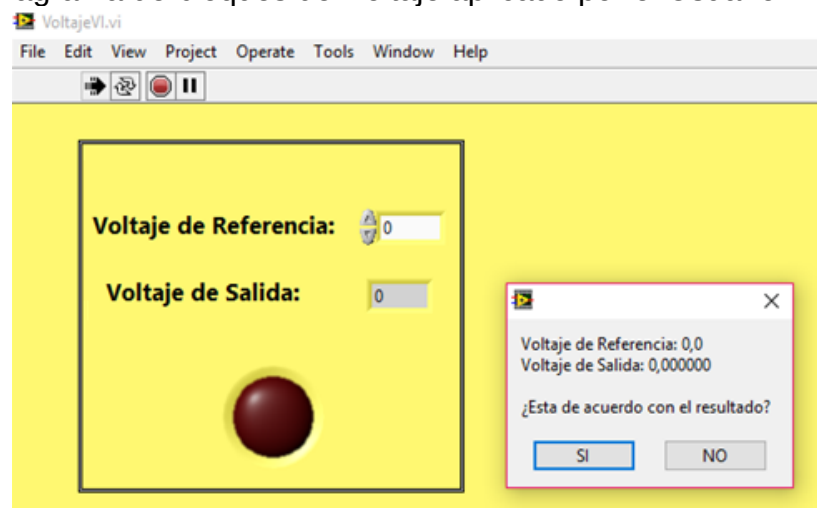


Fuente: Propia.

El VI principal está conformado por dos estructuras case que siguen el orden del diagrama de flujo presentado en la figura X.

Esta serie de pasos que ocurren dentro del programa se muestran en el diagrama de flujo inicia con un valor de pulsos igual a 200 que es un valor que permite devolver el voltaje que hay en la DAQ al valor mínimo es decir 1,4 V luego el programa intenta llegar a un valor cercano del voltaje aplicado hallando la resistencia adecuada para lograr la variación del número de pulsos y el ajuste del respectivo número de incrementos cuando se cumplan los algoritmos planteados en el programa el resultado final va a ser una pregunta ¿El siguiente valor de voltaje le sirve para iniciar la reacción? El usuario acepta y continua o se retracta de su decisión si no le sirve el valor. Al correr este VI se observa lo siguiente en el panel frontal:

Figura 22. Diagrama de bloques del voltaje aplicado por el Usuario.



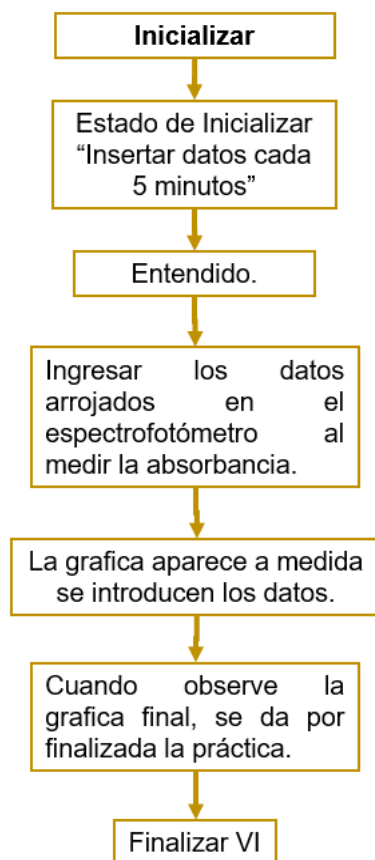
Fuente: Propia.

Si el usuario está de acuerdo con el voltaje de salida puede oprimir si y continuar con la reacción encendiendo el led rojo, si no está de acuerdo oprime no y digita otro valor diferente en el voltaje de referencia. Si el usuario desea continuar con la reacción el hardware aplica el voltaje deseado iniciando el proceso de electrocoagulación.

3.10. Diseño del VI “Toma de datos y gráfica”

Al finalizar el tiempo estimado para el proceso de electrocoagulación se muestra en la pantalla el siguiente VI, que tiene el objetivo de almacenar los datos y graficar inmediatamente se introducen al programa, este fue diseñado en una máquina de estados a partir del diagrama de flujo mostrado a continuación:

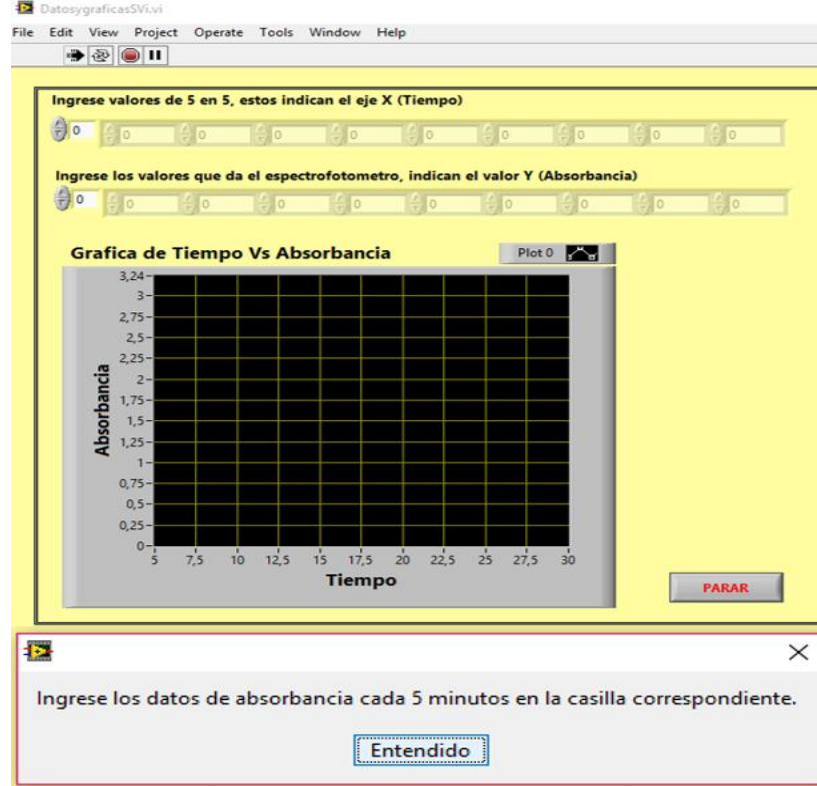
Figura 23. Diseño del diagrama de flujo del VI, toma de datos y gráfica.



Fuente: Propia.

En el diagrama de bloques de este VI se arroja una ventana cada 5 minutos que le indica que el usuario debe ingresar los datos, se dará click en entendido para comenzar el registro de datos y formar la gráfica inmediatamente. Se realizó este SubVI para mostrar los alcances del software al graficar instantáneamente.

Figura 24. Diagrama de bloques para graficar los resultados de absorbancia.



Fuente: Propia.

Según la figura 18 en la ventana se muestra una tabla horizontal para ingresar los valores de tiempo en el que se tomen las muestras de agua para analizar en el espectrofotómetro, y otra tabla en horizontal para ingresar los valores de cada muestra arrojados por el espectrofotómetro. Cuando se observe la gráfica el usuario puede parar el programa y analizar sus resultados, es decir el experimento de electrocoagulación ha finalizado.

De esta forma en el capítulo 4 se mostrara el equipo ensamblado y de esta forma se determinara si el diseño y construcción del electrocoagulador funciona verificando la remoción de cromo hexavalente.

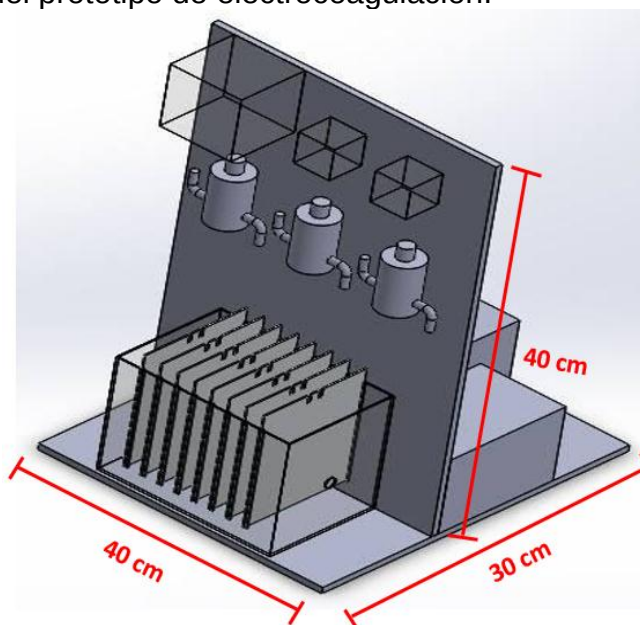
CAPITULO 4: Ensamblaje del prototipo de Electrocoagulación automatizado

En el siguiente capítulo se muestra un prototipo de electrocoagulación ensamblado con un acabado ingenieril, junto con las pruebas de remoción de cromo hexavalente para verificar su funcionamiento.

4.1. Plano del prototipo de electrocoagulación

Para construir el prototipo de electrocoagulación se realizó un plano en Solid Edge que especifica el modelo de cada elemento que lo compone y las medidas principales del prototipo.

Figura 25. Plano del prototipo de electrocoagulación.



Fuente: Propia.

4.2. Maqueta ensamblada del prototipo de electrocoagulación

El material escogido para hacer el prototipo de electrocoagulación fue acrílico de 3 mm de color blanco y transparente, el reactor de electrocoagulación sigue las medidas establecidas en el diseño experimental:

Tabla 19. Medidas del electrocoagulador y los electrodos.

	Largo	Alto	Ancho	Espesor	Volumen/Área
Electrocoagulador	12 cm	12 cm	8 cm	-	1152 cm ³
Electrodos	10 cm	-	8 cm	0,1 cm	80 cm ²

Fuente: Propia.

En el reactor de electrocoagulación debe haber agitación así que se implementó un motor, luego de ensamblar todas sus partes el prototipo quedo de esta forma:

Figura 26. Prototipo de electrocoagulación ensamblado.

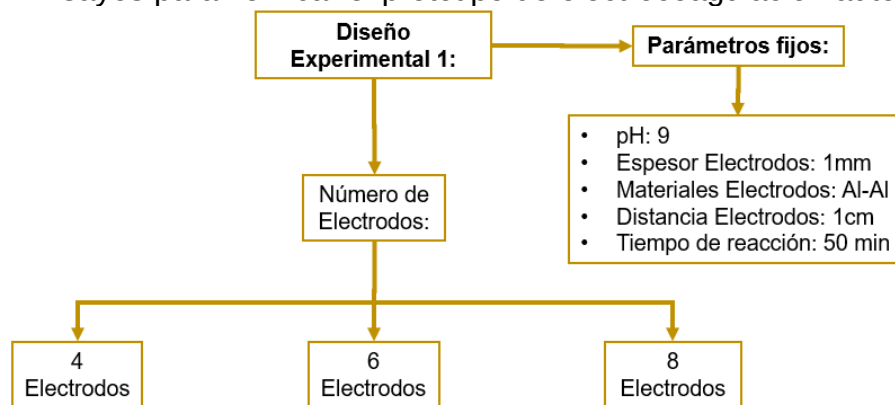


Fuente: Propia.

4.3. Pruebas de remoción de cromo hexavalente con el prototipo de electrocoagulación automatizado

A continuación se verifica el funcionamiento del prototipo de electrocoagulación final previamente automatizado, para esto se realizó una serie de ensayos explicado a continuación.

Figura 27. Ensayos para verificar el prototipo de electrocoagulación automatizado.

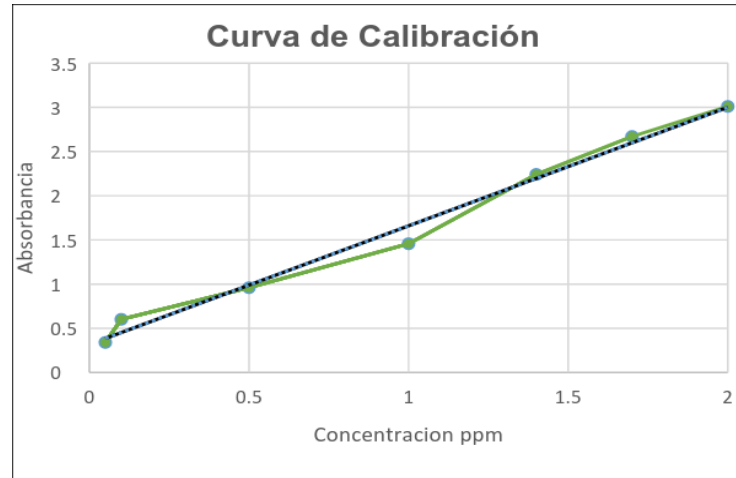


Fuente: Propia.

Se realizan 3 pruebas con el prototipo de electrocoagulación en cada prueba se varia el número de electrodos (4, 6 y 8 electrodos), los parámetros fijos para las pruebas son: el espesor de cada electrodo 1 mm, materiales de los electrodos Al-Al, Distancia entre electrodos 1 cm, tiempo que tarda la reacción en cada prueba 50 min.

Para realizar la prueba se prepara la curva de calibración con concentraciones de cromo de 0,05 a 2 y siguiendo los pasos como se indicó en el capítulo 1, el resultado de la curva de calibración fue el siguiente:

Gráfico 6. Curva de calibración de la concentración de Cr (VI) para verificar el electrocoagulador.



Fuente: Propia.

Según el gráfico 6, la curva de calibración arrojada tiene un 98% de confiabilidad, a partir de este resultado se desarrollan los cálculos para hallar la eficiencia del reactor teniendo en cuenta la ecuación de la recta:

$$y = 1,3421 x + 0,3171$$

Donde:

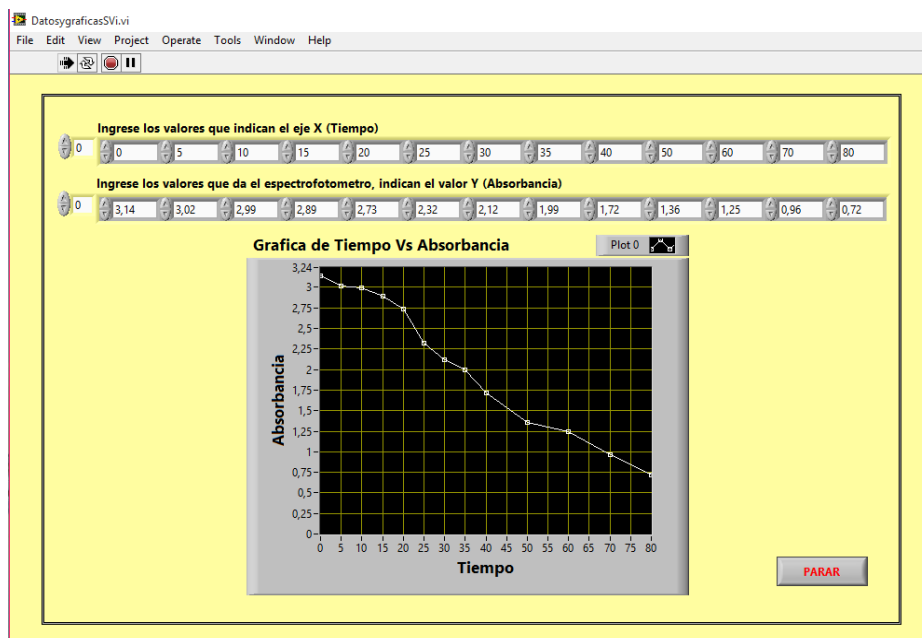
$y = \text{absorbancia.}$

$x = \text{concentracion (ppm ó } \frac{mg}{L} \text{)}$

En esta prueba se tomó una concentración inicial cercana a 2 mg/l y se realizaron las pruebas con 4 voltios para verificar si todo el prototipo remueve la concentración de cromo hexavalente.

- En la primera prueba se realizó un experimento de electrocoagulación con 4 electrodos, en 80 minutos, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

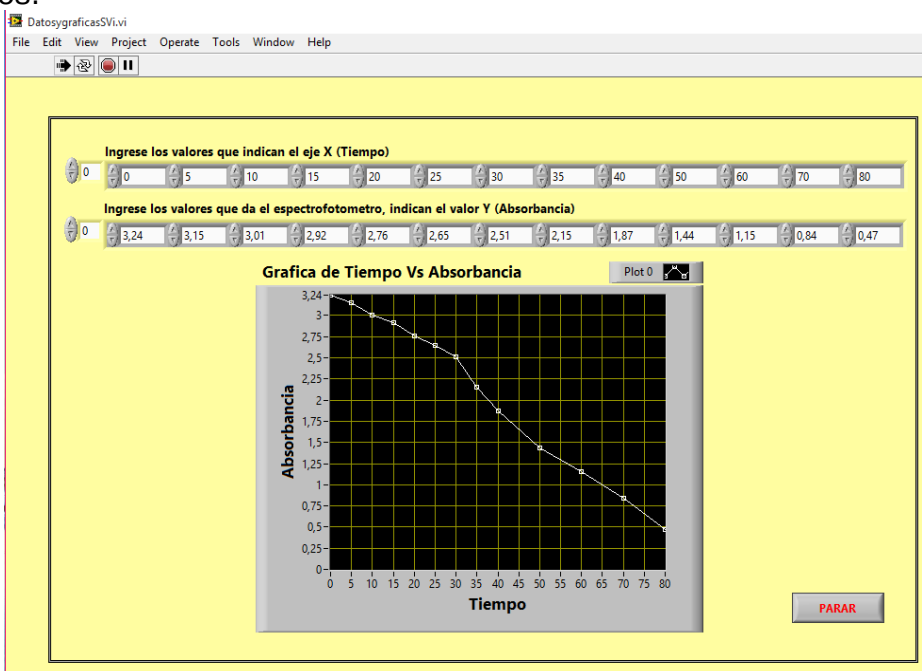
Figura 28. Gráfica arrojada por el programa, prueba usando 4 electrodos.



Fuente: Propia.

- En la segunda prueba se realizó el experimento de electrocoagulación con 6 electrodos, los resultados fueron los siguientes:

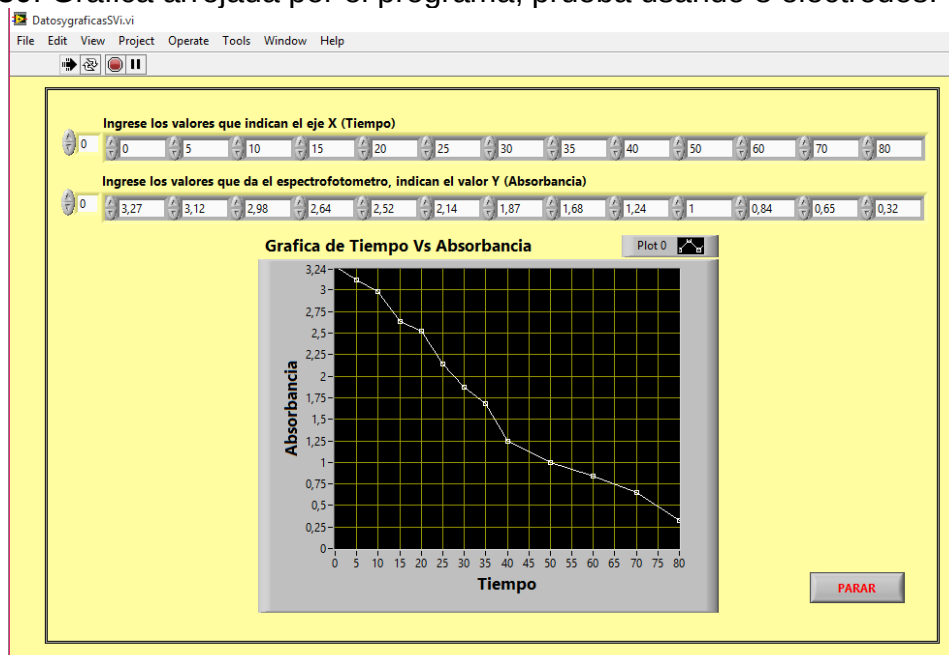
Figura 29. Gráfica arrojada por el programa, en 80 minutos, prueba usando 6 electrodos.



Fuente: Propia.

- En la última prueba para verificar el electrocoagulador se realizó con 8 electrodos, en 80 minutos, los resultados fueron los siguientes:

Figura 30. Gráfica arrojada por el programa, prueba usando 8 electrodos.



Fuente: Propia.

A partir de los datos registrados en LabVIEW se identifica en las gráficas que las pruebas realizadas con el prototipo de electrocoagulación automatizado por medio del hardware y software si removieron cromo hexavalente.

Como dato adicional se determinara la eficiencia al usar 4, 6 y 8 electrodos, a partir de los datos de absorbancia arrojados anteriormente en cada prueba, posteriormente hallamos los valores de las concentraciones de cromo a partir de la ecuación de la recta, los resultados fueron los siguientes:

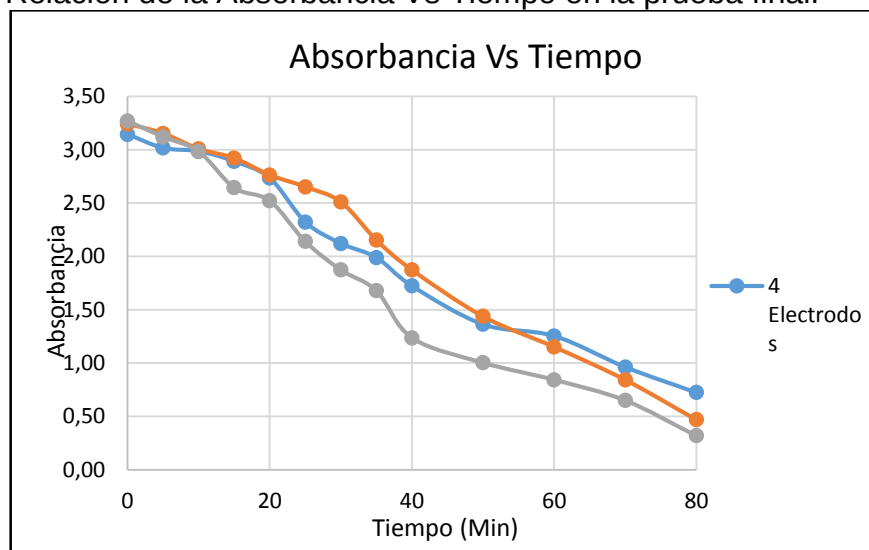
Tabla 20. Resultados de las pruebas con el electrocoagulador final.

Tiempo (min)	4 Electrodos		6 Electrodos		8 Electrodos	
	Absorbancia	ppm (mg/L)	Absorbancia	ppm (mg/L)	Absorbancia	ppm (mg/L)
0	3,14	2,11	3,24	2,18	3,27	2,20
5	3,02	2,01	3,15	2,11	3,12	2,09
10	2,99	1,99	3,01	2,00	2,98	1,99
15	2,89	1,92	2,92	1,94	2,64	1,73
20	2,73	1,80	2,76	1,82	2,52	1,64
25	2,32	1,49	2,65	1,74	2,14	1,36
30	2,12	1,34	2,51	1,63	1,87	1,16
35	1,99	1,25	2,15	1,37	1,68	1,01
40	1,72	1,05	1,87	1,16	1,24	0,68

50	1,36	0,78	1,44	0,83	1,00	0,51
60	1,25	0,70	1,15	0,62	0,84	0,39
70	0,96	0,48	0,84	0,39	0,65	0,25
80	0,72	0,30	0,47	0,11	0,32	0,00

Fuente: Propia.

Gráfica 7. Relación de la Absorbancia Vs Tiempo en la prueba final.



Fuente: Propia.

Para analizar las eficiencias de cada prueba se realizó la siguiente ecuación:

$$Eficiencia\ de\ la\ Remoción\ (\%) = \frac{Concentración\ inicial - Concentración\ final}{Concentración\ inicial} * 100$$

Los resultados fueron las siguientes:

Tabla 21. Tabla de eficiencia para cada prueba de electrocoagulación.

	Eficiencia (%)
4 Electrodo	85,60209424
6 Electrodo	94,79134625
8 Electrodo	99,94921968

Fuente: Propia.

Según los resultados anteriores se puede concluir que a mayor uso de electrodos hay una mejor eficiencia en el proceso, porque al usar 4 electrodos hay un 85% de eficiencia, usando 6 electrodos hay un 94% de eficiencia y al usar 8 electrodos hay un 99 % de eficiencia.

5. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO

El ingeniero ambiental es quien evalúa los daños generados en el ambiente y así mismo propone soluciones integradas, teniendo en cuenta dimensiones científicas, químicas, ecológicas, sociales, económicas y tecnológicas con el objetivo de promover un desarrollo sostenible [48]. En este proyecto se elaboró un prototipo de electrocoagulación como tecnología limpia, enfocado en la remoción de cromo hexavalente; se escogió este contaminante porque es un problema ambiental encontrado en los efluentes de industrias de cuero, acero, galvanoplastia y textiles, ubicados en las poblaciones aledañas a las grandes ciudades las cuales son de gran vulnerabilidad.

El enfoque de este proyecto fue diseñar un prototipo de electrocoagulación a escala laboratorio implementado con automatización; esto con el objetivo de que sean exactas las medidas y se evite el desperdicio de material, para incorporarlo como un equipo en los laboratorios de ingeniería ambiental, dando a conocer a sus estudiantes prácticas enfocadas en la electroquímica y así difundir, que como ingenieros pueden relacionar varias disciplinas y asociarlas para generar nuevo conocimiento, fortaleciendo la parte tecnológica fundamental en las competencias de un ingeniero.

Al implementar este equipo de descontaminación de aguas con cromo hexavalente presente en los efluentes de las industrias se vería beneficiado tanto la población como los propietarios ya que sería un proceso viable, dado que su mecanismo es preciso, se evitaría la cantidad de mano de obra que se utiliza actualmente, y se cuidaría la descarga de contaminantes que afectan la calidad de vida de la población.

De acuerdo a lo anterior se lleva al estudiante, a desarrollar nuevas habilidades y experiencias, capacitándose en temas que probablemente puedan experimentar cuando se enfrenten en la vida laboral.

6. CONCLUSIONES

- El diseño conceptual del electrocoagulador a nivel laboratorio se llevó a cabo por los siguientes requerimientos, optar por tres reactores de tamaños diferentes, ya que en la bibliografía se encontraban reactores con medidas grandes para industrias, medianos y pequeños a nivel laboratorio; otro requerimiento fue el material de los reactores para hacer las pruebas el escogido fue el plástico porque es de común venta en las misceláneas, económico y era un material con el que se podrían realizar varias pruebas y no sufriría daños; el tercer requerimiento fue variar voltajes de 5, 10 y 15 voltios en cada reactor, el reactor escogido por su eficiencia al remover cromo hexavalente estaría listo para automatizar la función de aplicación de voltaje.
- En las pruebas realizadas para escoger el reactor en el diseño conceptual se establecieron parámetros fijos como lo es el pH de 9, se usaron 4 electrodos con 1 mm de espesor, el material de los electrodos eran de Al – Al y la distancia entre cada uno era de 1 cm. Al igual que se escogió el cromo hexavalente como contaminante modelo con una concentración inicial de 2 mg/l.
- Se escogió cromo hexavalente como contaminante modelo como requerimiento para realizar el diseño del reactor y la verificación del prototipo de electrocoagulación, porque es un metal conocido por el peligro que ocasiona en la salud de los humanos, este puede ser cancerígeno por inhalación, puede dañar el ADN e inducir mutaciones genéticas, a partir de la creación de este prototipo se llevara a cabo el estudio para tratar este contaminante en futuras investigaciones.
- Según los datos arrojados se identifica que a menor inyección de voltaje se adquiere menor corriente y viceversa, por lo tanto se hallaron las eficiencias en cada reactor y estas se compararon con la cantidad de corriente que necesitaban, de esta forma se dedujo que el reactor 1 tuvo una eficiencia cercana a los otros dos reactores, de tal forma que al aplicar 5 voltios se obtuvo una eficiencia del 81% y necesito una corriente de 0,19 A.
- Se construyó el electrocoagulador a nivel laboratorio a partir de las medidas del tanque que respondió a los parámetros establecidos es decir el reactor 1, las medidas finales fueron: largo 12 cm, alto 12 cm, ancho 8 cm, llenando un volumen de 750 cm³, electrodos de aluminio, de 1mm de espesor y área sumergida de 64 cm², con 1 cm de distancia entre cada electrodo.
- Como el objetivo es automatizar la función aplicación de voltaje se realizó un hardware para conectar el reactor con el algoritmo creado en el software LabVIEW, se planteó comprar una fuente de voltaje en el mercado pero se excedía en costos, tamaño y manejo así que se decidió realizar una fuente de 5

voltios lo suficiente para automatizar el prototipo de electrocoagulación, el diseño del hardware requirió del voltaje máximo que se aplicaría es decir los 5 voltios de acuerdo a esto se usó el integrado LM317k que arroja 1,4 A máximo.

- Se realizaron pruebas de aplicación de voltaje y corriente arrojada al variar el número de electrodos (4, 6 y 8 electrodos) para evaluar el comportamiento de la corriente al aumentar o disminuir el número de electrodos, se obtuvo resultados similares al aplicar 5 voltios y obtener una corriente de 1,2 A al usar 4 y 6 electrodos se podría encontrar una diferencia al realizar un análisis de reducción de cromo y el tiempo que se tarda el proceso de electrocoagulación en reducirlo; al usar 8 electrodos se obtuvo una corriente de 1,4 A al variar hasta 3,5 voltios. Esta prueba se realizó para tener en cuenta que si algún usuario intenta adaptar un mayor número de electrodos el circuito puede sufrir algún daño.
- El diseño de este hardware fue imprescindible para el funcionamiento de este prototipo de electrocoagulación, este se diseñó siguiendo los requisitos de voltaje máximo aplicado 5 voltios y corriente máxima 1,4 A, en caso de aplicar un voltaje mayor o añadir más número de electrodos es posible que el circuito sufra alteraciones o daños impidiendo su buen funcionamiento.
- Se diseñó y construyó el hardware para permitir la interacción del algoritmo programado en el software con el equipo de electrocoagulación, este corresponde a parámetros establecidos como un máximo de 5 v y 1,4 A. Este es un producto del proyecto de investigación que permite poner en práctica la interdisciplinariedad de un ingeniero a nivel tecnológico.
- Para desarrollar un instrumento virtual fue necesario realizar un diseño previo en un diagrama de flujo para determinar el ordenar de los algoritmos, Al usar máquina de estados fue fundamental elegir el orden de los estados más relevantes para realizar la programación porque se complicaría la programación, de igual forma se tuvo en cuenta si se cuentan con las librerías necesarias para desarrollar el programa.
- Al automatizar el prototipo de electrocoagulación se evidencia el uso de herramientas informáticas en busca de precisión y buen manejo de reactivos y soluciones además de una aplicación de voltaje puntual.
- Se diseñó y construyó un software para automatizar las funciones de aplicación de voltaje y dosificación de soluciones por medio de electroválvulas, esto para integrar el uso de software como herramienta útil para un ingeniero y evaluados con gran importancia en instituciones basadas en investigación como Colciencias a nivel nacional y también instituciones académicas de ingeniería a nivel mundial.
- Se Verificó el funcionamiento del electrocoagulador realizando 3 pruebas variando el número de electrodos de 4, 6 y 8 removiendo Cr^{6+} con una

concentración cercana a 2 ppm, se concluye que a mayor cantidad de electrodos en este caso 8 electrodos hubo una remoción más eficiente en este caso 99%, al usar 4 electrodos su eficiencia fue del 85%, no quiere decir que no remueva sino que al ampliar más tiempo puede ser bueno pero habría un consumo mayor de energía.

- El desarrollo de este prototipo de electrocoagulación hace que los estudiantes identifiquen un enfoque nuevo de la ingeniería ambiental hacia la electroquímica que es asequible y fácil de aprender.
- La integración de diferentes ciencias en la ingeniería desarrollan métodos de tecnologías limpias que proveen soluciones. En Colombia la electroquímica en instituciones educativas colegios y universidades es uno de los temas menos estudiados, por eso se crea un prototipo que sea útil en la enseñanza.

RECOMENDACIONES

- Mejorar el software implementando el reconocimiento del prototipo de electrocoagulación desde un algoritmo en LabVIEW al poner el mouse sobre la imagen para que el usuario interactúe con el software y despierte más curiosidad sobre el tema.
- Implementación de un panel solar como fuente de alimentación para el hardware, para que se lleven a cabo todas las funciones del proceso.
- Se estima que a partir de este proyecto de investigación se realice un perfeccionamiento del equipo al diseñar un sistema de monitoreo y control con variables de temperatura, pH y conductividad para controlarlo desde LabVIEW.
- Implementar un sistema de remoción del lodo flotante o sedimentable, así mismo llevar a cabo una caracterización de este lodo generado durante el proceso de electrocoagulación.
- Integrar un método de detección del contaminante en este caso cromo hexavalente, incorporando electrodos de platino para determinar la reducción de cromo desde el momento que inicie y termine la reacción.
- Se recomiendan prácticas para identificar si se puede incorporar otro tipo de material en los electrodos, o determinar la cantidad de material de electrodo que se flocula en el agua a tratar.
- Perfeccionar el tratamiento de electrocoagulación con cromo hexavalente en diferentes concentraciones con este equipo de electrocoagulación, para que sea comercializado e implementado en industrias que descarguen este contaminante.
- Para implementar el trabajo del prototipo de electrocoagulación se podría efectuar un análisis de aguas residuales con contaminantes orgánicos, inorgánicos y microorganismos, para observar si tiene la misma eficiencia de remoción.
- Realizar una evaluación de costos de este sistema para implementarlo en la industria que requiera descontaminar sus aguas residuales que contengan cromo hexavalente u otros contaminantes que previamente hayan sido estudiados con este prototipo para lograr su descontaminación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Allen J. Bard; Gyorgy Inzelt; Fritz Scholz. Electrochemical Dictionary. 2nd Edition. Springer, 2012.
- [2] RAJESHWAR, Krishnan; IBANEZ, Jorge. Environmental Electrochemistry: Fundamentals and applications and pollution Abatement. London: Academic Press, INC, 1997. 775p.
- [3]. RESTREPO, Ana; ARANGO, Alvaro; GARCES, Luis. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. Jul – Dic 2006, Vol 1. No 2. Pág.4.
- [4]. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Antecedentes de la contaminación hídrica en Colombia. Pág 2-8. Elaborado en: Colombia, 2009, 45 p.
- [5]. Departamento Nacional de Planeación, Informe técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Pág. 38. Elaborado en Colombia, 2013, 70 p.
- [6]. ARANGO, Alvaro; GARCES, Luis. Diseño de una celda de Electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. En: Revista Universidad EAFIT. Sep, 2007, Vol. 43. No.147. pág. 12.
- [7]. Texas Instruments. Datasheet LM2576s_adj step down voltage regulator. En: Catalogo Texas Instruments. Enero 1999. Vol 1. Pag 1 - 6.
- [8]. SGS Distribuciones. Transformador AC – DC. {En Línea}. Diciembre 8 del 2015. Disponible en: <http://sgsdistribuciones.com/transformador-ei509/>.
- [9]. National Instruments. Instrumentos Virtuales. Estados Unidos. Pág. 1 -5. Mayo 2015.
- [10]. GCF aprende libre. ¿Qué es hardware y Software?. {En Línea}. Noviembre 30 del 2015. Disponible en: http://www.gcfaprendelibre.org/tecnologia/curso/informatica_basica/empezando_a_usar_un_computador/2.do
- [11]. Koshland Science Museum. Glosario de Agua potable. {En línea}. Noviembre 30 del 2015. Disponible en: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/glossary.html#gloss162>.

- [12]. Universidad Nacional de Cuyo. Fundamentos de Bases de datos: Diseño Conceptual. Elaborado por la facultad de Ingeniería. Argentina, Pág. 1 – 26. Junio 2010.
- [13]. Mora, Ángel; Roa, David; Núñez Bryan. Práctica 1: Diferencia entre compuestos orgánicos e inorgánicos. Elaborado en la Universidad de la Amazonia, Florencia – Caquetá, Septiembre 2014.
- [14]. Instituto tecnológico de Costa Rica. Introducción a Códigos. Pág. 1 -42. Elaborado en Costa Rica en la Escuela de Ingeniería Electrónica. Febrero 2007.
- [15]. Charles, Alexander; Matthew Sadiku. Fundamentos de circuitos eléctricos, tercera edición. Pág 1 – 1051. Traducido en México, 2004. Editorial: Mc Graw Hill.
- [16]. SARRIA, Víctor; PARRA, Sandra; RINCON, Ángela; TORRES, Ricardo; PULGARÍN, Cesar. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. En: Revista colombiana de química, Vol. 34, No.2. 2005.
- [17]. Luis Alberto Cantera Cantera. Automatización del proceso de tratamiento de aguas pluviales por el método de electrocoagulación. México, 2013, 147p. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Control y Automatización. Instituto Politécnico Nacional, Facultad de Ingeniería mecánica y eléctrica.
- [18]. PIÑA, Soberanis; DOMINGUEZ, Martin; RAMIREZ, González. Revisión de las variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Abr 2011, Vol 10. No 2. Pág. 3
- [19]. Barrenechea, Ada. Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida, Capítulo 4: Coagulación. Manual de la organización panamericana de la salud. Lima, 2004. 1 – 597 p.
- [20]. Martínez, Fabiola. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Ciudad Real, 2007, 279 p. Tesis para optar al grado de doctor en ingeniería química. Universidad de Castilla – La Mancha.
- [21]. Lenntech. pH y Alcalinidad. {En Línea}. Noviembre 29 del 2015. Disponible en: www.lenntech.es/ph-y-alcalinidad.htm.
- [22]. Milovanovic, Jelena. Desarrollo y optimización de un método para la determinación de Cr^{6+} en matrices complejas. Alicante, 2011, 29 p. Trabajo de grado, Institut Universitari de l'Aigua i de les Ciències Ambientals.

- [23]. Doria, Gloria; Paz, Paulo; Hormanza, Angelina. Standardization of diphenylcarbrazid as an indicator and a complexity factor in the identification of chromium hexavalent – Cr (VI). En: Producción + Limpia. Julio, 2013, Vol.8, No.2. pag.9.
- [24]. Severiche, Carlos; González Humberto. Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría. En: Revista de la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Buenaventura Medellín. Enero, 2013, Vol.4, No.1. Pág. 5.
- [25]. Gil, Julio. Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la universidad del cauca. Santiago de Cali, 2012. 127 p. Trabajo de grado para optar Maestría en ingeniería con énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental. Universidad del Valle.
- [26]. RESTREPO, Ana; ARANGO, Alvaro; GARCES, Luis. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. Jul – Dic 2006, Vol 1. No 2. Pág.4.
- [27]. Ministerio de desarrollo económico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. Pág 1 – 145. Elaborado en: Colombia, Noviembre 2000, 10 – 16 p.
- [28]. National Instruments. Data acquisition ¿Qué es Adquisición de datos?. {En Línea}. Noviembre 29 del 2015. Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.
- [29]. Abril Nieves; Bárcena Antonio; Fernandez Emilio; Galvan Aurora; Jorrín Jesús; Peinado José; Melendez Fermín; Túnez Isaac. Espectrofotometria: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. En: Revista Universidad de Córdoba. Enero 2004. Vol 1. Pag 1-8.
- [30] Xicor. Datasheet X9C103P Nonvolatile Digital Potentiometer. En: Catalogo Xicor. Enero 1995. Vol 1. Pag 1 – 14.
- [31]. ARANGO, Alvaro; GARCES, Luis. Designing an electrocoagulation cell to treat wastewater in dairy industries. En: Revista Universidad EAFIT. Sep, 2007, Vol. 43. No.147. pag. 12.
- [32]. Vasudevan, Subramanyan; Lakshmi, Jothinathan. Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from wáter – A novel approach. En: Elsevier. Junio, 2011, pag 643 – 651.

- [33]. Mollah, Mohammad; Morkovsky, Paul; Gomes, Jewel; Kesmez, Mehmet; Parga, Jose; Cocke, David. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. En: Elsevier, Agosto, 2004. Pag 199 – 210.
- [34]. Esmaeilirad, Nasim; Carlson, Ken; Omur, Pinar. Influence of softening sequencing on electrocoagulation treatment of produce water. En: Elsevier. Octubre, 2014. Pag 721 – 729.
- [35]. Mercado, Iván; Reyes, Deisy; Morante, Gonzalo. La electroquímica en función de la ingeniería ambiental, Método de electrocoagulación aplicado a un flujo continuo de residuos líquidos. En: Casimiro. Noviembre, 2006. Pág. 4.
- [36]. Ozyonar, Fuat; Karagozoglu, Bunyamin. Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. En: Polish Journal of Environmental Studies. June, 2010. Vol.20. No1. Pág. 173 – 179.
- [37]. PIÑA, Soberanis; DOMINGUEZ, Martin; RAMIREZ, González. Review of design variables and operation conditions in electrocoagulation. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Abr 2011, Vol 10. No 2. Pág. 3
- [38]. Guohua Ghen. Electrochemical technologies in wastewater treatment. En: Elsevier, Separation purification technology. Oct 2003, Vol 38, Pag 11 – 41.
- [39]. Morales, Nelly. Electrocoagulation system as treatment of galvanic wastewater. En: Revista de ciencia e ingeniería Neogranadina, Universidad Militar Nueva Granada. Jun 2010. Vol. 20, Pag 33 -44.
- [40] Holt, Peter; Barton; Geoffrey; Mitchell, Cynthia. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. En: Elsevier, Chemosphere. Oct 2004. Vol 59. Pag, 355 – 367.
- [41]. SGS Thompson Microelectronics. Datasheet LM317K. En: Catalogo SGS Thompson Microelectronics. Nov 2000. Vol 1. Pag 1 -11.
- [42]. Jing, Feng; Ya, Sun; Zheng, Zheng; Ji, Zhang; Shu, Li; Yuan, Tian. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. En: Journal of environmental sciences. April 2007. Vol 19. Pág. 1409 – 1415.
- [43]. GUERRERO, Carlos. Sistema electrónico para control de temperatura en invernaderos, con interfaz en labVIEW. Zacatecas, 2009, 91 p. Tesis de licenciatura para obtener el título de Ingeniero en comunicaciones y electrónica. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- [44]. National Instruments. ¿Qué es LabVIEW?. {En Línea}. Mayo 24 del 2015. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/esa/>.

[45]. Montenegro, Davis. Introducción a G con Aplicaciones. Pág. 14. Elaborado en: Colombia, 2013, 181 p.

[46]. National Instruments. Áreas de aplicación ¿Cómo puedo usar LabVIEW?. {En Línea}. Noviembre 22 del 2015. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/applications/esa/>.

[47]. Universidad Autónoma de Madrid. Procesos redox espontáneos: pila daniell y pilas de concentración. En: Cartilla de laboratorio, Universidad Autónoma de Madrid. Enero 2012. Vol 1. Pag 20-29.

[48]. My Majors. Environmental Engineer Career. {En línea}. Febrero 2 del 2016. Disponible en: <https://www.mymajors.com/career/environmental-engineers/skills/>.

ANEXO 1.

Preparación de la solución de Cromo Hexavalente.

Agua madre: De una concentración de 1000 ppm de cromo hexavalente, se toman 5 ml y se aforan a 500 ml con agua destilada en un balón, para que la concentración final de cromo hexavalente sea 10 ppm determinados a partir de la siguiente formula:

$$Cd = \frac{Vc \times Cc}{Vd} \quad (1)$$

Vc = Volúmen del Concentrado (ml).

Cc = Concentración del Concentrado ($\frac{mg}{l}$).

Vd = Volúmen del Diluído (ml).

Cd = Concentración del Diluído ($\frac{mg}{l}$).

En donde:

$$Cd = \frac{5ml \times 1000 \text{ mg/l}}{500ml}$$

$$Cd = 10 \frac{mg}{l}$$

- **Concentraciones tomadas a partir del agua madre para realizar la curva de calibración:**

A partir de la ecuación (1) se reemplazan los valores como se indica a continuación:

Vc = Volúmen del Concentrado (A partir de $10 \frac{mg}{l}$).

Cc = Concentración del Concentrado. (Solución madre $10 \frac{mg}{l}$)

Vd = Volúmen del Diluído (Se toman balones aforados de 50 ml).

Cd = Concentración del Diluído (Concentración de Cr(VI)).

Tabla 4: Datos de concentración de Cr(VI).

Concentración de Cr(VI) (ppm)	Tomar de la muestra madre (ml)
0,05	0,25
0,1	0,5
0,5	2,5
1	5
1,4	7
1,7	8,5
2	10

Fuente: Propia.

La concentración de Cr(VI) escogida para realizar la prueba es de 2 ppm.

ANEXO 2.

Preparación de la solución de NaCl.

Se diluyo 1 g de NaCl en 10 ml de H₂O.

$$M = \frac{m}{PM} * \frac{1}{V}$$

M = Concentración Molar (M).

m = masa de soluto (g)

PM = Peso de un mol de molécula ($\frac{g}{mol}$)

V = Volumen (L)

$$M = \frac{1g}{58,4 g/mol} * \frac{1}{0,01L}$$

$$M = 1,7 M$$

Se agregaron 2 ml de NaCl al 1,7 M preparado.

ANEXO 3.

Preparación de la curva de calibración con el método de colorimetría 1,5 difenil carbazida.

En este proyecto se realizaron los siguientes pasos:

- Solución de 1,5 difenilcarbazida: Se pesan 50 mg de 1,5 difenilcarbazida y se disuelven en 10 ml de acetona, se envasa en un frasco oscuro debido a que la solución es sensible a la luz [23].
- solución de Ácido Sulfúrico al 50%: Se toman 25 ml de ácido sulfúrico y se afora en un balón de 50 ml con agua destilada.
- Método de detección de cromo: A cada solución de cromo hexavalente aforada previamente en un balón de 50 ml, se agrega 0,5 ml de ácido sulfúrico teniendo en cuenta que su pH oscile entre 1 a 2, luego se añade 1 ml de la solución de difenilcarbazida al 0,5% y se deja reposar 10 minutos para que se desarrolle el color; posteriormente se realiza la medición en el espectroscopio a 540 nm.

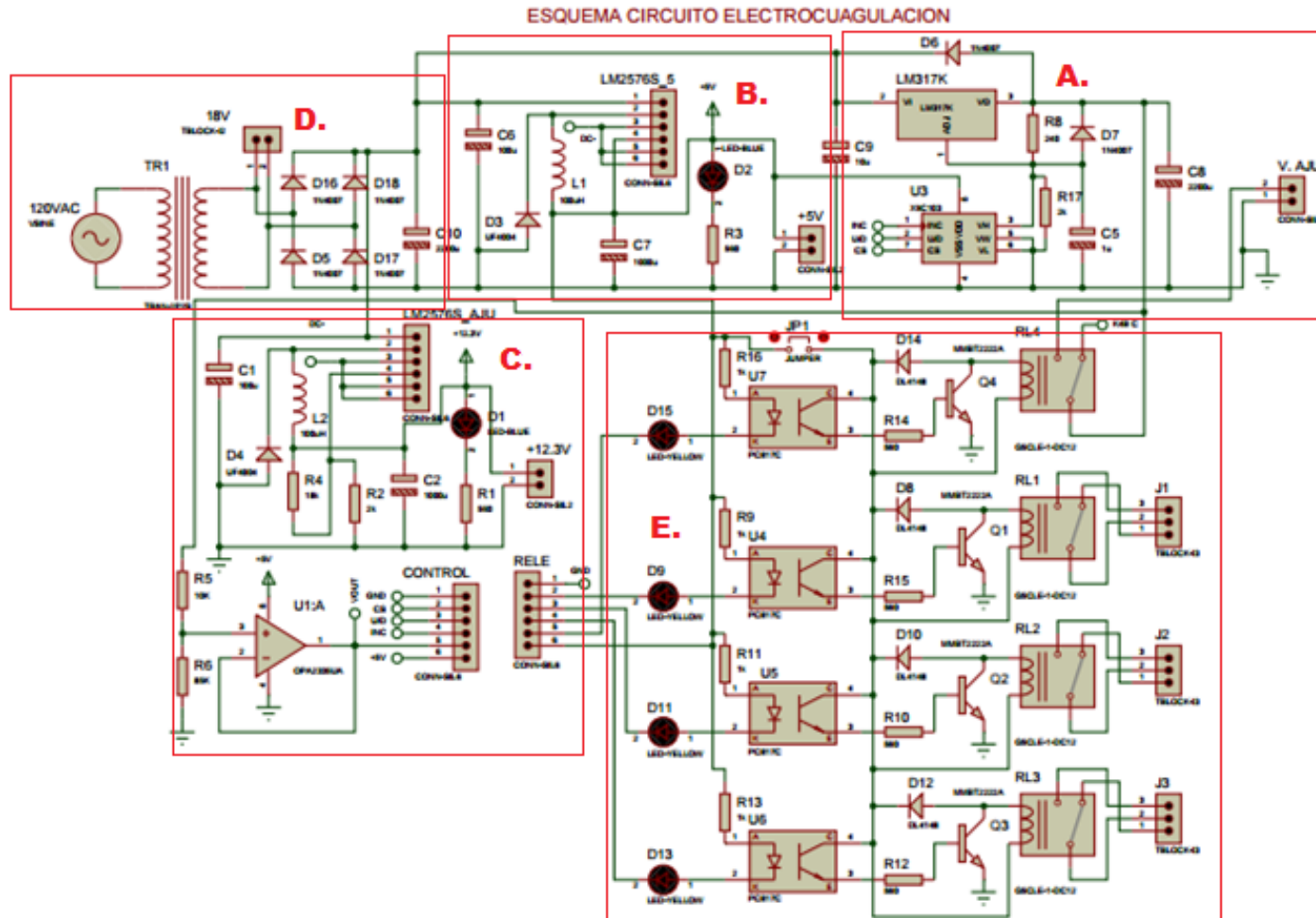
Figura 6: Curva de calibración de la concentración de Cr (VI) con la 1,5 difenilcarbazida.



Fuente: Propia.

Luego de realizar la medición en el espectrofotómetro se realiza una curva de calibración en la cual se ajusta la concentración vs absorbancia.

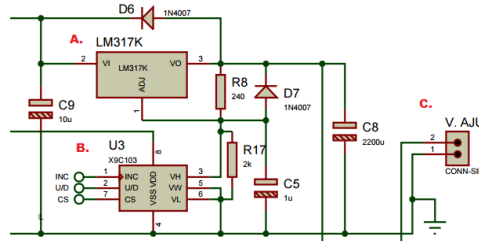
ANEXO 4. Esquema del circuito para el proceso de Electrocoagulación.



- A. Fuente de voltaje ajustable.
- B. Fuente conmutada de 5 Voltios.
- C. Fuente conmutada de 12 Voltios.
- D. Puente rectificador, convertor A/C – D/C.

- E. Circuito de relevos.

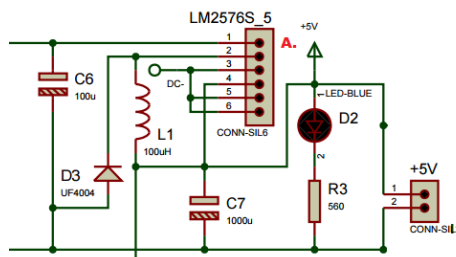
ANEXO 5. Fuente de voltaje ajustable.



- A. LM317k
- B. Potenciómetro digital.
- C. Salida de voltaje.

El LM317k es un integrado que permite variar el voltaje hasta 30 voltios pero este depende de la cantidad de corriente adquirida por el circuito en este caso las pruebas dieron que al variar 5 voltios se obtenía la corriente máxima que ofrece el integrado que es de 1,4 A, este integrado va unido al potenciómetro digital que tiene una serie de pines que permite leer las señales transmitidas en binarios desde el computador por medio de resistencias que permiten el paso de corriente y condensadores que permiten el almacenamiento de corriente, la salida de voltaje es la conexión que se realiza a los electrodos.

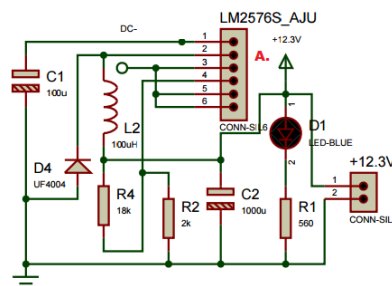
ANEXO 6. Fuente conmutada de 5 V.



- A. Integrado LM2576s_5

Esta fuente conmutada es de 5 voltios, este circuito fue hecho con dos condensadores de 100µ, un diodo que circula corriente en un solo sentido, un integrado LM2576s_5 que tiene una serie de pines conectados respectivamente que tiene 5 voltios de salida y es quien energiza el potenciómetro.

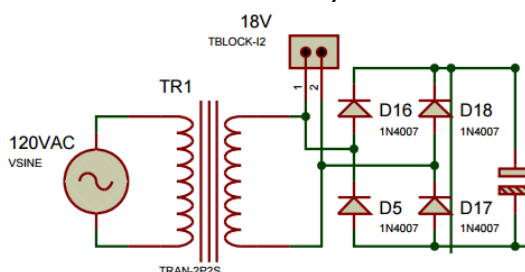
ANEXO 7. Fuente conmutada de 12 V.



- A. Integrado LM2576s_adj.

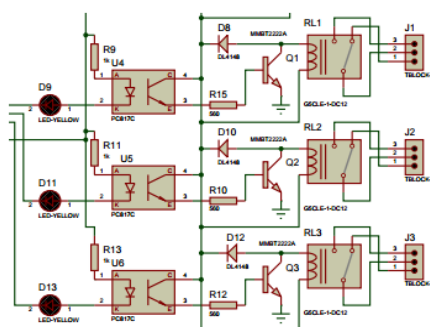
El circuito de la fuente conmutada de 12 voltios se creó para energizar las electroválvulas, esto se realizó con 2 condensadores uno de 100μ y otro de 1000μ , 3 resistencias que oponen el paso de corriente y hacen que el circuito responda a sus especificaciones por ultimo esta la salida de 12 voltios que luego se conecta a las electroválvulas.

ANEXO 8. Puente rectificador, conversor A/C – D/C.



El puente rectificador es la entrada de corriente al circuito, entran normalmente 120 voltios de corriente alterna, el transformador disminuye la tensión a 18 voltios y con ayuda de 4 diodos la señal sinusoidal es modificada a lineal y de esta forma cambia a corriente directa.

ANEXO 9. Circuito de Relevos.



El circuito de relevos se implementó de un arduino de cuatro relés pero adaptándolo solo a tres que pertenecen a las tres electroválvulas que suministran las soluciones este se forma de tres relés de 5 voltios, diodos, resistencias y leds. Su funcionamiento permite abrir y cerrar electroválvulas al enviar la señal desde el algoritmo creado en LabVIEW.