

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TESIS

DISEÑO DE CELDA ELECTROLÍTICA PARA ANÁLISIS ELECTROQUÍMICOS

**PRESENTA:**

LUIS CARLOS CAICEDO ROSERO

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES CUAUTLE

Fecha: abril 2021

---



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 15/04/2021

Dependencia: División de Estudios de  
Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión

OPCION: I

C. LUIS CARLOS CAICEDO ROSERO

Candidato a Grado de Maestro en:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

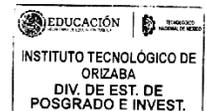
" DISEÑO DE CELDA ELECTROLÍTICA PARA ANÁLISIS ELECTRÓQUÍMICOS".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®  
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

Dr. MARIO LEONCIO ARRIOJA RODRÍGUEZ  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Avenida Oriente 9 No. 852  
Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320  
Orizaba, Veracruz, México.  
Teléfono: 272-110-53-60  
Email: [cyd\\_orizaba@tecnm.mx](mailto:cyd_orizaba@tecnm.mx)  
[www.orizaba.tecnm.mx](http://www.orizaba.tecnm.mx)





Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **Febrero 10, de 2021.**

Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.  
**LUIS CARLOS CAICEDO ROSERO**

La cual lleva el título de:

**DISEÑO DE CELDA ELECTROLÍTICA PARA ANÁLISIS ELECTROQUÍMICOS**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Lxcelencia en Lducación Tecnológica®  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES  
CUAUTLE

FIRMA

SECRETARIO: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL SUP.: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

FIRMA

FTI-TI-013



Avenida Oriente 9 No. 852  
Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320  
Orizaba, Veracruz, México.  
Teléfono: 272-110-53-60  
Email: [cyd\\_orizaba@tecnm.mx](mailto:cyd_orizaba@tecnm.mx)  
[www.orizaba.tecnm.mx](http://www.orizaba.tecnm.mx)



## AGRADECIMIENTOS

***Lo que un hombre pueda ser, lo debe ser. Esta necesidad la llamamos autorrealización.***

**A. Maslow**

*En los caminos que nos coloca la vida, el espíritu aspira a la satisfacción del deber cumplido, hemos recorrido lugares y reconocido amigos que no sabíamos que teníamos, que nos esperaban en el tiempo para llegar a hacer mas confortable la vista y más sosegado el trasegar alrededor del sol... y vamos caminando, esperando satisfacer sus esperanzas.*

*Varios son los motivos y agradecimientos que debemos por los sacrificios y la confianza depositadas en este su servidor. A Dios...*

*Por la familia, porque árbol que olvida sus raíces inevitablemente se seca, porque:*

*... El ánimo y la esperanza está en las huellas de nuestros pasos, sabiendo que la punta del zapato apunta a casa, siempre a casa...* A.M.R.R – J.A.C.R. Fliá. Caicedo – LAC – Fliá. Rosero.

*Por los amigos, que son retoños. Y es que:*

*Recuento, las sonrisas, las miradas, hoy, recuento los pasajes y las alboradas... los amaneceres. Todos acordes se uniforman, y forman la figura de los indelebles... en medio de las sombras, surgen retoños haciendo de la vereda una laguna de luz y calor... y nos siguen, y caminan, caminaran con nosotros en ese infinito hacia el horizonte, que no es norte ni sur, ese horizonte que surgen de nuestros imposibles.* TODOS INDISPENSABLES.

*Por los maestros, a quienes nunca terminaremos de compensar sus dudas y anhelos, a quienes siempre les deberemos gratitud y honradez, porque según Goethe:*

*Talents are best nurtured in solitude; character is best formed in the stormy billows of the world.*

*Al país del cóndor con sus cordilleras de corazones y planicies de lanceros, al del águila que hace honor a la vida hasta después de la muerte en una taza de pozole y unas nogadas, de los verdes, de los blancos y de los rojos y que todos pican.*

*Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de estudios en la Maestría.*

*A Todos, Gracias y Pleamar*

En honor a Dios, por la vida, a pesar de todo...

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	5
Lista de Figuras .....	7
Lista de Tablas .....	9
RESUMEN .....	10
ABSTRACT .....	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1    Introducción .....	12
1.2    Problemática .....	14
1.3    Justificación .....	15
1.4    Hipótesis .....	17
1.5    Objetivo General .....	17
1.6    Objetivos Específicos .....	17
1.7    Metodología .....	17
1.7.1    Alcance de la propuesta investigativa.....	18
1.7.2    Infraestructura.....	19
1.7.3    Productos de la investigación.....	20
1.7.4    Cronograma del proyecto.....	20
1.8    Estado del campo .....	21
1.8.1    Técnicas electroquímicas .....	23
1.9    Estado de la técnica .....	26
CAPÍTULO 2. ESPECIFICACIONES Y DISEÑO.....	29
2.1    Introducción .....	29
2.1.1    Electrolisis.....	29
2.2    Proceso de diseño.....	32
2.2.1    Criterios de diseño .....	34
2.3    Diagrama de bloques .....	37
2.3.1    Tipo de análisis .....	38
2.3.2    Geometría.....	38
2.3.3    Materiales.....	40
2.3.4    Costos.....	42
2.4    Adquisición y tratamiento de la señal .....	44
2.5    RESUMEN .....	46
CAPÍTULO 3. INSTRUMENTACIÓN .....	49
3.1    BLOQUE ELÉCTRICO .....	49
3.1.1    Fuente de alimentación .....	49
3.1.2    Etapas para una fuente regulada.....	50
3.1.3    Parámetros de diseño .....	51
3.1.4    Cálculos .....	51
3.1.5    Fuente de Alimentación no Estabilizada .....	51
3.1.6    Regulado y Estabilización .....	56
3.1.7    Fuentes de alimentación con módulos Arduino.....	58

3.2	BLOQUE DE MEDICIÓN .....	59
3.2.1	El Amplificador Operacional Ideal (OPAM) .....	59
3.2.2	COMUNICACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS .....	60
3.3	BLOQUE TÉRMICO .....	61
3.3.1	Control de la Temperatura .....	61
3.3.2	Sensor de Temperatura.....	61
3.3.3	Agitador.....	62
3.4	RESUMEN .....	63
CAPÍTULO 4.	SISTEMATIZACIÓN Y CONTROL .....	64
4.1	Interfaz Arduino – Python.....	64
4.2	RESUMEN .....	67
CAPÍTULO 5.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	69
5.1	RESULTADOS .....	69
5.2	DISEÑOS DE FUENTES .....	71
5.2.1	FUENTE LINEAL ESTABILIZADA UTILIZANDO LM317T .....	71
5.2.2	FUENTE CON CIRCUITO DE CARGA ACTIVA (DUMMY LOAD) .....	72
5.3	CONCLUSIONES .....	73
TRABAJO FUTURO	.....	74
BIBLIOGRAFÍA	.....	75
ANEXOS	.....	80
ANEXO 1.	TABLA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS DE PLACAS ARDUINO.....	81
ANEXO 2.	PONENCIA. La Electroquímica y la Ingeniería Ambiental. Una Visión a la Electrocoagulación como alternativa sustentable.....	87

## Lista de Figuras

Figura 1-1. Línea de tiempo del desarrollo de la electroquímica. ....	13
Figura 1-2. Clasificación de registro mundial de patentes por país. ....	16
Figura 1-3. Clasificación de registro mundial de patentes por país. ....	16
Figura 1-4. Árbol de investigación inicial para el proyecto. ....	18
Figura 1-5. Alcance y desarrollo de la propuesta de investigación.....	19
Figura 1-6. Diagrama de bloques de construcción de la celda electrolítica. ....	20
Figura 1-7. Cronograma del proyecto. ....	21
Figura 1-8. Esquemática de doble capa. ....	22
Figura 1-9. Diagrama de planos de las técnicas electroquímicas. ....	23
Figura 1-10. Clasificación general de las técnicas electroquímicas. ....	25
Figura 2-1. Esquema de una Celda electrolítica .....	29
Figura 2-2. Esquema de proceso electrolítico .....	30
Figura 2-3. Celda Electrolítica y Circuito Equivalente .....	30
Figura 2-4. Secciones y componentes de la celda electrolítica según un análisis electrónico .....	34
<i>Figura 2-5. Metodología de Diseño.....</i>	<i>35</i>
Figura 2-7. Diagrama de bloques celda electrolítica coulombimétrica [54] .....	38
Figura 2-8. Curva de costos del ciclo de vida.....	42
Figura 2-9. Porcentaje de Costo durante el ciclo de vida para las diferentes etapas del ciclo .....	43
Figura 2-10. Esquema de ejecución de las instrucciones para Arquitecturas RISC y CISC .....	44
Figura 3-1. Tipos de Fuentes de alimentación.....	49
Figura 3-2. Etapas de una Fuente Lineal Regulada. ....	50
Figura 3-3. Estructura de un Transformador. ....	52
Figura 3-4. Voltaje en onda senoidal luego del transformador.....	53
Figura 3-5. Voltaje en onda senoidal luego de la rectificación.....	54
Figura 3-6. Esquema de Fuente regulable estabilizada.....	56
Figura 3-7. Circuito de la carga activa (Dummy Load) .....	57
Figura 3-8. Diagrama de una celda electrolítica. (A) Potenciostato. (B) Galvanostato. (C) Uso de un Potenciostato como Galvanostato.....	58
Figura 3-9. Esquema de un Amplificador Operacional (OPAM) .....	59
Figura 3-10. Diagrama del Instrumento de Adquisición de señal del Electrodo de Trabajo .....	60
Figura 3-11. Sensor TMP75 .....	62

Figura 4-1. Esquema de la interfaz Gráfica Arduino-Python .....	67
Figura 5-1. Diseño de Fuente Estabilizada con CI LM317T en Multisim .....	72
Figura 5-2. Proceso de Elaboración de la Fuente Estabilizada con CI. ....	72
Figura 5-3. Circuito y Componentes de la Fuente con Carga Activa. ....	73
Figura 5-4. Proceso de Elaboración de la Fuente de Alimentación con Carga Activa. ....	73

## Lista de Tablas

Tabla 1-1. Ciencias que relaciona la Electroquímica y su objeto de estudio.....	15
Tabla 1-2. Tabla de técnicas electroquímicas[10].....	23
Tabla 1-3. Principales técnicas electroquímicas. [1] .....	24
Tabla 2-1. Especificaciones y Restricciones de Diseño.....	36
Tabla 2-2. Resumen de características de las técnicas electroanalíticas. ....	37
Tabla 2-3. Propiedades de materiales.....	41
Tabla 2-4. Costos de un Proyecto y Costos más Relevantes para la elaboración del dispositivo .....	43
Tabla 2-5. comparación de las arquitecturas RISC y CISC .....	45
Tabla 3-1. Comparativa de los Tipos de Fuentes de Alimentación .....	50
Tabla 3-2. condiciones de Entrada-Salida al Transformador.....	52
Tabla 3-3. Parámetros del sensor TMP75 .....	61
Tabla 4-1. Comparativa entre los Software para Manipulación de Datos .....	64
Tabla 4-2. Código Arduino de la Interfaz Gráfica.....	65
Tabla 4-3. Código Python de la Interfaz .....	66
Tabla 5-1. Algunos Tipos de Análisis más comunes, Tipos de fuente de Alimentación y Tipo de señal de excitación .....	70

## RESUMEN

Se aborda el diseño de una celda electrolítica para análisis electrolíticos para una coulombimetría amperostática con dos electrodos en una celda de PTFE. En una celda electrolítica se busca minimizar el sobrepotencial, por tanto, se tomó el enfoque de las Normas ISO 55000 y 50001, Etapas en la gestión de un activo y Reducción de los costos energéticos, buscando alargar la vida útil del instrumento. Siguiendo este enfoque se partió de los estudios en el diseño para celdas electrolíticas a mayor escala y dado que no existen estudios profusos en el diseño como instrumentales analíticos se desarrolló una metodología apropiada a la escala de laboratorio, tomando como parámetros en orden jerárquico: Tipo de Análisis, Geometría, Operatividad y Costos. Estos se ven relacionados por la Electrodinámica y la Hidrodinámica y las variables del proceso, Corriente (I) – Voltaje (V)– Temperatura. Se utilizó una metodología modular buscando que el instrumento tenga flexibilidad. El diseño utiliza estos criterios aunados a licencia de código abierto para no tener obsolescencias no programadas.

Se utilizan los criterios de la ingeniería electrónica para complementar el diseño, pues en las referencias se suele tomar solo a la celda sin involucrar los componentes electrodinámicos y el análisis de materiales, lo que permitió extraer que la fuente de excitación (alimentación a la celda) es un parámetro primordial dado que el proceso requiere una alimentación estabilizada y constante hasta el final del análisis y existen diferentes tipos de impulsos para diferentes tipos de análisis. Como se busca la ampliación y mejoras al instrumento analítico se diseñaron dos fuentes estabilizadas, una basada en un módulo Arduino que incluye el circuito de carga fantasma o “dummy load” para garantizar la alimentación constante y que permite diferentes tipos de impulsos, programable y ajustable, así como el módulo de adquisición de señal en modo convertidor I/V. Para la sistematización y control del sistema se tomó una interfaz Arduino – Python que nos representa los datos de Voltaje y Temperatura en la celda por medio de la librería Matplotlib.

Se plantea como trabajo futuro la implementación de otro electrodo, ajustar el software tanto el módulo de control como para la fuente de excitación, así como implementar un control de temperatura. También realizar los análisis para la calibración de la celda.

## ABSTRACT

The design of an electrolytic cell for electrolytic analysis for amperostatic coulometry with two electrodes in a PTFA cell is discussed. In an electrolytic cell, the aim is to minimize the overpotential, therefore, the focus was taken from the ISO 55000 and 50001 Standards, Stages in the management of an asset and Reduction of energy costs, seeking to extend the useful life of the instrument. Following this approach, we started from the studies on the design of electrolytic cells on a larger scale and since there are no extensive studies on the design of analytical instruments, we developed a methodology appropriate to the laboratory scale, taking as parameters in hierarchical order: Type of Analysis, Geometry, Operability and Costs. These are related by Electrodynamics and Hydrodynamics and the process variables, Current (I) - Voltage (V) - Temperature. A modular methodology was used in order to make the instrument flexible. The design uses these criteria coupled with open-source licensing to avoid unplanned obsolescence.

The criteria of electronic engineering are used to complement the design, since in the references it is usually taken only to the cell without involving the electrodynamic components and the analysis of materials, which allowed to extract that the source of excitation (feeding to the cell) is a primordial parameter since the process requires a stabilized and constant feeding until the end of the analysis and there are different types of impulses for different types of analysis. As the extension and improvements to the analytical instrument are sought, two stabilized sources were designed, one based on an Arduino module that includes the phantom load circuit or "dummy load" to ensure constant power supply and allows different types of pulses, programmable and adjustable, as well as the signal acquisition module in I / V converter mode. For the systematization and control of the system, an Arduino - Python interface was used to represent the voltage and temperature data in the cell by means of the Matplotlib library.

Future work includes the implementation of another electrode, adjusting the software for both the control module and the excitation source, as well as implementing a temperature control. Also perform the analysis for the calibration of the cell.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

La electroquímica es una ciencia que surge del estudio de los efectos de la electricidad sobre los cuerpos vivos, tal como lo realizaron Sultzer, Galvani y Volta[1], aun tomando como elementos de estudio su propio cuerpo. Hoy han logrado cruzar los campos de las ciencias químicas extendiéndose a campos como la biología o la ingeniería. Es una ciencia que ha aportado mucho a la consecución de los avances tecnológicos actuales, por ejemplo, en la actualidad no nos imaginamos un instrumento en particular que no posea una pila.

Los mayores avances para lograr su consolidación como ciencia fueron recientes, desde el siglo XVII, pero le han permitido establecerse y traspasar sus campos de acción y volverse una herramienta de gran utilidad para otras ciencias y que logró establecerse en la vida cotidiana.

Las posibilidades de futuras aplicaciones van desde los espacios del hogar, en la vida cotidiana como purificadores de agua, hasta la locomoción y transporte a través de celdas de hidrógeno, es por tanto relevante realizar una inspección y análisis de las características de los procesos electrolíticos.

Se requiere mucho empeño y personal de investigación para lograr una comprensión adecuada de los procesos que involucra, y para lograr su apropiación dentro del ambiente común, se requiere un conocimiento profundo, firme y confiable, de lo contrario se somete a la humanidad a otra debacle como la de las tecnologías nucleares, donde no se sabe a ciencia cierta si han sido mayores sus aportes que los daños que ha generado.

Puede que en la actualidad no se avizoren las potenciales aplicaciones y la importancia de comprender profusamente esta rama de la ciencia, pero en un futuro, partiendo de los estudios actuales, se logrará ya con los hechos constatar su relevancia.

Los conocimientos adquiridos dentro de la rama de la electroquímica fueron obtenidos por medio de la práctica positivista, dentro de la cual se observaron y analizaron sus parámetros, y como producto se obtuvieron sus bases teóricas. Un esquema que resumen este proceso se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

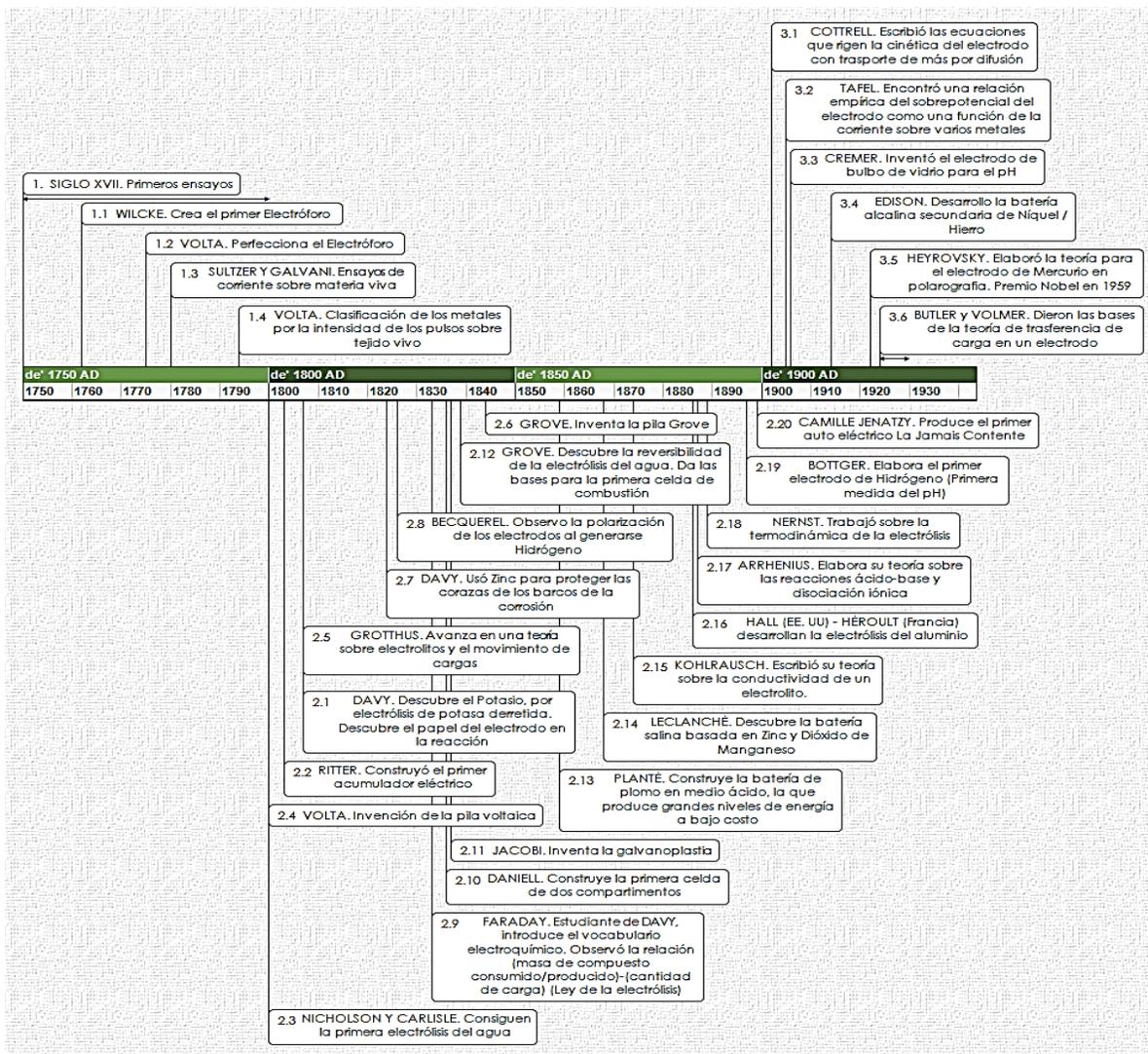


Figura 1-1. Lfnea de tiempo del desarrollo de la electroqufmica.

## 1.2 Problemática

Los recientes estudios realizados en el Instituto Tecnológico de Orizaba [2], respecto a celdas de combustible, así como obtención de biohidrógeno, hacen patente la necesidad de equipos para estudiar propiedades electroquímicas.

Los estudios acerca de las propiedades electroquímicas de las sustancias, aunque son ampliamente estudiadas, no pueden ser replicadas en un análisis comprobatorio dentro del laboratorio sin el uso de equipos de alto costo y que se manejan como cajas negras, donde no se cuenta con la posibilidad de la variación de las condiciones más allá de las permitidas por el equipo.

Por tanto, el equipamiento resulta ser una restricción al conocimiento y no las sustancias mismas o el proceso. Para ello se propone el diseño de un prototipo a escala laboratorio de celda electroquímica para el análisis volt-amperométrico, el cual permita realizar el estudio de la variación de los parámetros de un proceso electrolítico.

El Instituto Tecnológico de Orizaba no cuenta con un equipo que permita el estudio de una reacción electrolítica y se hace necesario la construcción o consecución de un equipo que lo permita, por lo cual como primera etapa de esta investigación se considera el diseño de este equipo.

Como ente del conocimiento es más relevante su diseño, adecuación y afinamiento para lograr una apropiación mayor y lograr mayores y mejores avances en la comprensión y las aplicaciones de la electroquímica.

Las características de la celda serán las necesarias para la comprobación de los parámetros principales de una reacción electrolítica, y se deja para estudios posteriores la implementación, el análisis y desarrollo de las mejoras y la afinación del equipo.

### 1.3 Justificación

La electroquímica es un campo que está logrando transversalizar muchas ramas del conocimiento, no solo desde el ámbito práctico, sino a las ramas de las ciencias teóricas, esto fundamentado en la conjunción que se da en esta ciencia de dos conceptos que son sus objetos de estudio.

*Tabla 1-1. Ciencias que relaciona la Electroquímica y su objeto de estudio.*

Ciencia	Objeto de estudio	
<b>Electricidad</b>	Forma de energía en movimiento. Composición básica elemental de la materia	
<b>Química</b>	¿Qué son las cosas?	¿Qué es la materia?

Estos dos aspectos engloban lo que para la humanidad ha sido un dilema y se ha convertido en un vacío cognitivo que se ha tratado de estudiar desde la antigüedad.

En la actualidad se realizan ensayos en electroquímica, donde se varían los parámetros, las condiciones del medio o las condiciones de corriente. Con el presente trabajo se desea obtener el diseño de una celda electroquímica a escala laboratorio que permita realizar la comprobación y análisis de las condiciones específicas de los ensayos.

Al ser un campo de estudio en auge, contar con un equipo que permita el estudio de los procesos electroquímicos, dará al Instituto Tecnológico de Orizaba relevancia dentro de las Instituciones de Educación Superior, invirtiendo con personal y estudios posteriores en esta rama científica.

En la actualidad, México es el segundo país de Iberoamérica, luego de España, y número 19 a nivel mundial en la producción de patentes en este campo de estudio, lugar preferente dado la gran prospectiva de aplicación de las propiedades eléctricas de la materia a los usos cotidianos, industriales y de transporte entre otros, esto se aprecia en las Figuras 1-2 y 1-3.

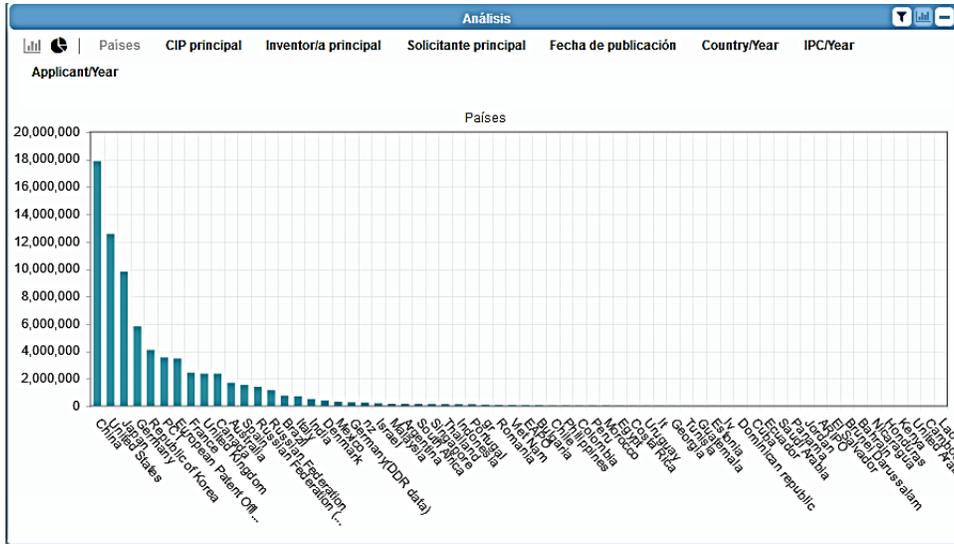


Figura 1-2. Clasificación de registro mundial de patentes por país. Actualizado a 07 de junio de 2019. Criterio de búsqueda "electrolytic cell".[3]

Se han registrado varias aplicaciones de las celdas electrolyticas en el país [4], [5] de Instituciones de Educación Superior y que han arrojado productos de alto impacto social en una escala de tiempo relativamente corta.

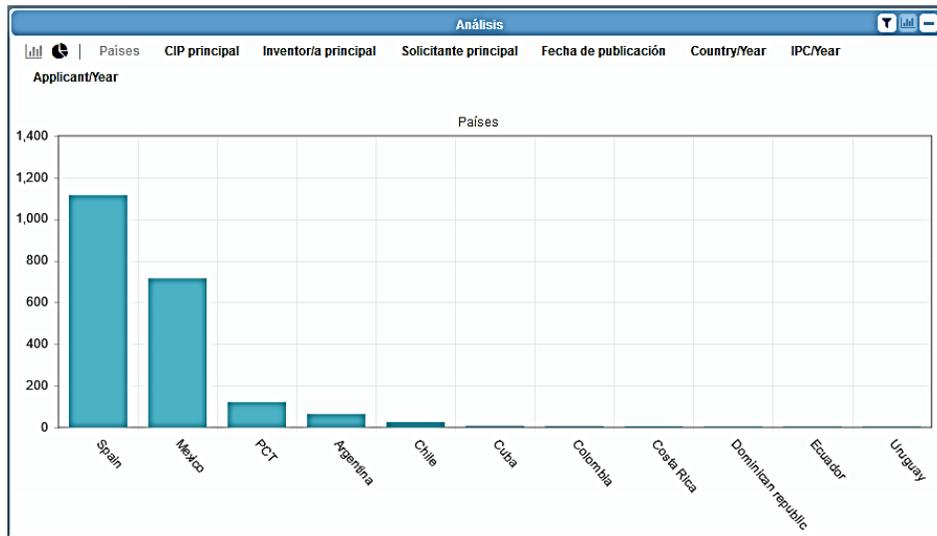


Figura 1-3. Clasificación de registro mundial de patentes por país. Actualizado a 07 de junio de 2019. Criterio de búsqueda "celda electrolytica".[6]

#### 1.4 Hipótesis

Es posible diseñar una celda electrolítica para el análisis electroquímico en estado estable de una reacción de electrólisis, para su uso en laboratorio, con unas condiciones paramétricas básicas de control de temperatura y corriente.

#### 1.5 Objetivo General

Diseñar una celda electroquímica a escala de laboratorio (150 cm<sup>3</sup>) con regulación de corriente para la experimentación de las condiciones de una reacción electroquímica en un electrolito acuoso puro.

#### 1.6 Objetivos Específicos

- Realizar la investigación sobre los avances y desarrollos en la electroquímica
- Proponer un modelo de esquema del equipo
- Diseñar la fuente de excitación de la celda para una operación de 3 A y 20 V.

#### 1.7 Metodología

El proceso investigativo parte de las bases de la electroquímica, donde se debe examinar los principios que la rigen para poder obtener un modelo del prototipo, basado en las condiciones propuestas para la presente investigación.

El equipo que se desea obtener estará especificado a escala de laboratorio, utilizando como electrolito un medio acuoso puro en la celda.

Se debe establecer el nivel de desarrollo de las celdas electroquímicas, teniendo en cuenta las diferentes aplicaciones que se le ha dado en las diferentes ramas científicas donde ha logrado permear, establecer las condiciones y características instrumentales y paramétricas de los ensayos, así como observar la utilidad que dieron en estos experimentos.

Además, se realizará un análisis de las condiciones experimentales que nos permita tener las características propias para la investigación, para obtener los parámetros más específicos y característicos del instrumental del equipo.

Con base en estos alcances obtenidos, iniciar con el diseño instrumental y la construcción de la celda. Todo este proceso se resume en la Figura 1-4.

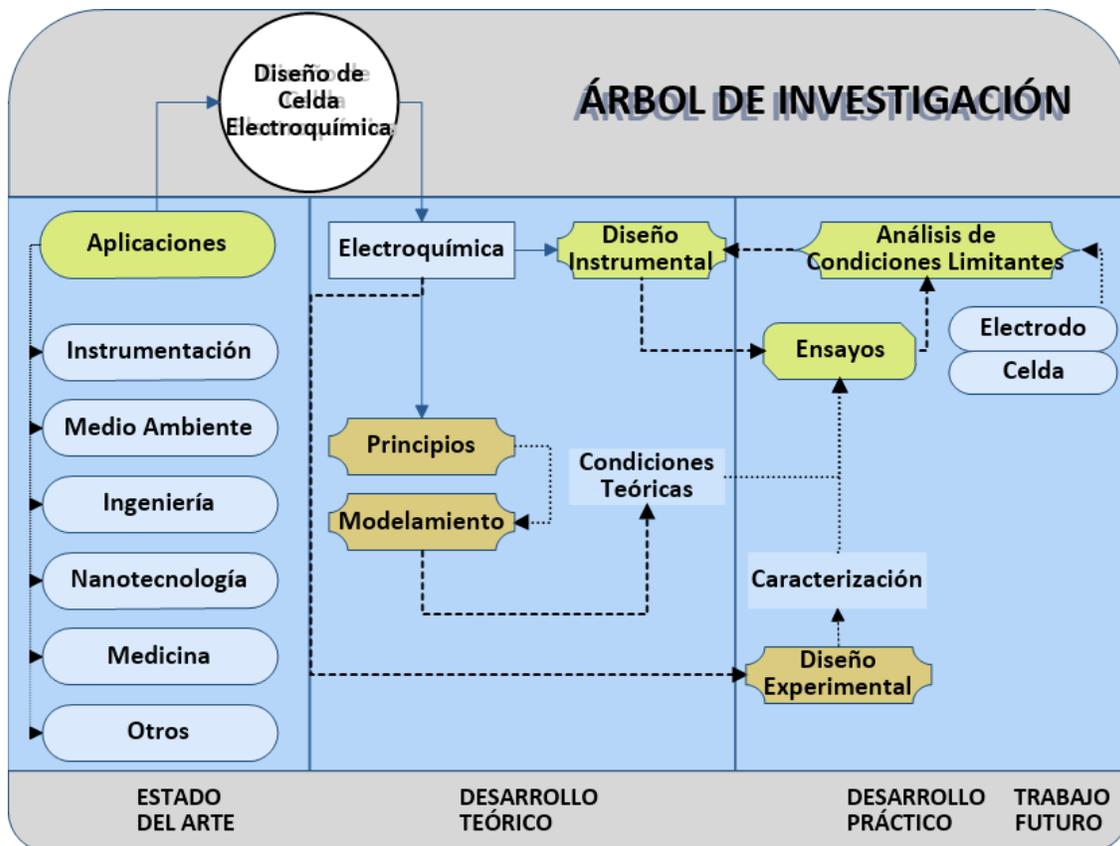


Figura 1-4. Árbol de investigación inicial para el proyecto.

### 1.7.1 Alcance de la propuesta investigativa

Este proyecto investigativo se concentrará en el diseño de un prototipo a escala de laboratorio (aproximadamente 25 cm<sup>3</sup>) de una celda electroquímica, que permita realizar el análisis de la oxidoreducción para su análisis electroquímico en soluciones de electrolitos con electrodos semiconductores o metálicos, para un flujo de corriente de 3 A y 20 V aproximadamente.

Se deja como propuesta para posteriores desarrollos la aplicación a casos y mejoras para la utilización de la celda en otros tipos de análisis. El siguiente esquema desglosa el proceso de desarrollo de la propuesta.

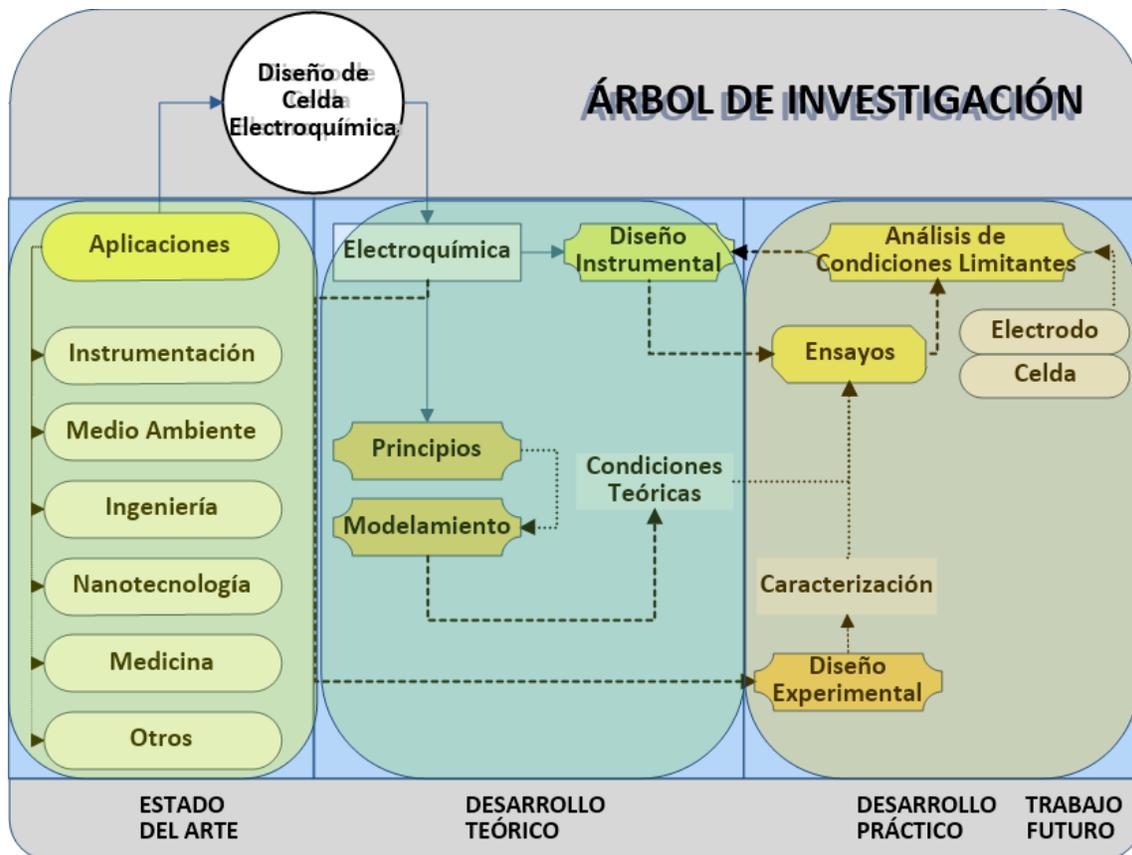


Figura 1-5. Alcance y desarrollo de la propuesta de investigación.

Se desea lograr un diseño instrumental para la investigación en el campo de la electroquímica que permita realizar el proceso de electrólisis dentro de unas condiciones parametrizadas.

### 1.7.2 Infraestructura

El presente proyecto investigativo busca diseñar una celda electrolítica para realizar medidas de electroquímicas, trabajando la estructura modular propuesta en la figura 1.6, donde se realiza la diferenciación por color de la infraestructura e instrumentación disponible, en color verde, y aquella que se debe construir con el color naranja.

Dentro de la infraestructura con la se cuenta para iniciar este proyecto investigativo están:

- Fuente regulada de corriente
- Sensor de Temperatura
- Control y automatización, con sus materiales y equipamiento.

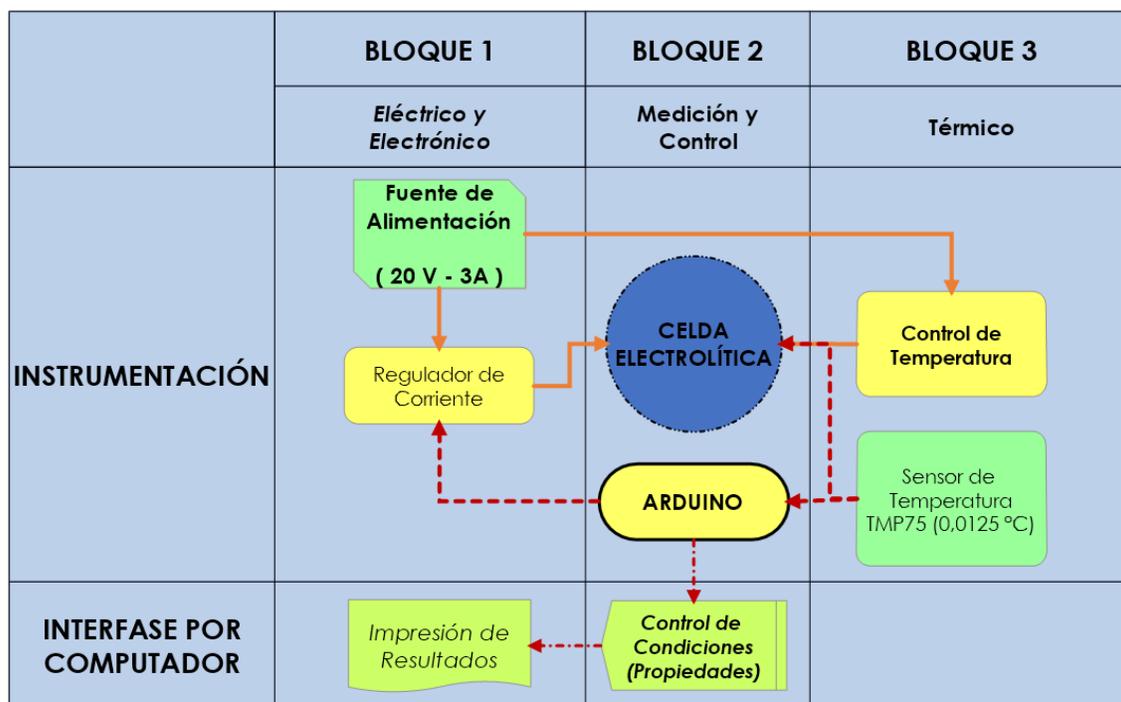


Figura 1-6. Diagrama de bloques de construcción de la celda electrolítica.

Este diseño modular se hace para lograr analizar de forma puntual cada problema que se presente dentro de cada bloque, buscando que exista una complementariedad de cada bloque. Se realizará la interfaz que permita el control y manipulación de las condiciones de la celda.

Se diferencian tres bloques, eléctrico y electrónico, de temperatura y cada uno se acoplará a la celda en el bloque central.

### 1.7.3 Productos de la investigación

- Diseño de la celda electroquímica
- Borrador de artículo científico

### 1.7.4 Cronograma del proyecto.

Los hitos principales del proyecto se especifican en el siguiente diagrama de Gantt. Se propone una estrategia metodológica donde se puede ir incluyendo cada construcción anterior dentro del marco general y congruente al concepto modular del proyecto.

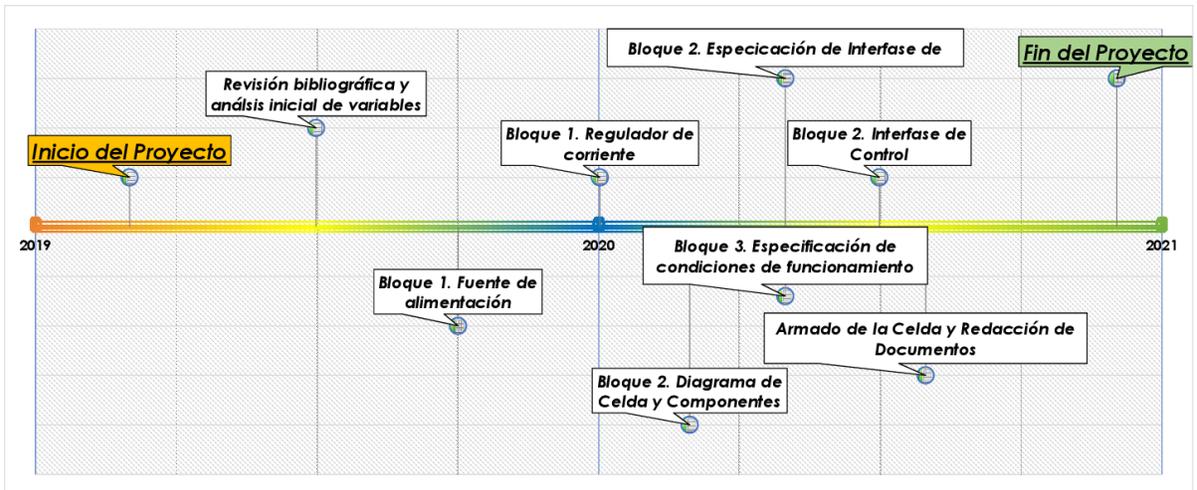


Figura 1-7. Cronograma del proyecto.

Se establecen los hitos principales dentro de la evolución del proyecto a través de un tiempo total de 2 años con relación al diagrama de bloques.

### 1.8 Estado del campo

La electroquímica estudia los fenómenos que ocurren en la interfase electrodo-electrolito que involucran la transferencia de electrones dentro de una reacción química, esto conlleva a la mezcla de procesos de transferencia de energía, en forma de corriente, y de masa, haciendo necesario un análisis termodinámico y de transferencia de masa para su análisis, [1], [7]. A este tipo de reacciones se les llama de oxidación-reducción, donde la fuerza electromotriz es llamada potencial electroquímico, el cual se mide a condiciones estándar y se establece para una sustancia en específico y se lo llama potencial estándar.

Es un proceso complejo que involucra para su análisis dos ramas de la ciencia, la electrónica y la química con una difusión en doble capa, que depende de la carga ( $\sigma$ ) del electrodo y el potencial eléctrico ( $\varphi$ ) del electrolito. Al ingresar una corriente se genera un ordenamiento y posterior desplazamiento hacia los electrodos de los iones del electrolito, según su carga, al ánodo ( - ) los iones positivos y al cátodo (+) los iones negativos.

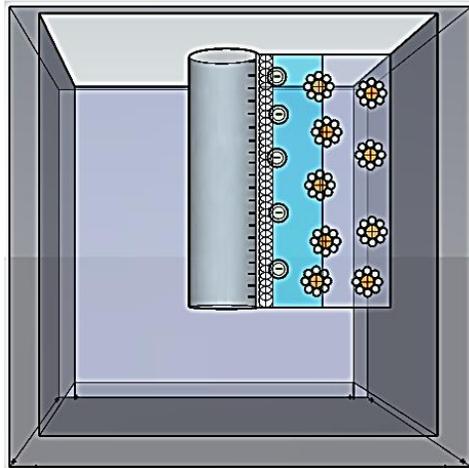


Figura 1-8. Esquemática de doble capa.

En este proceso teóricamente se logran diferenciar dos zonas o capas [8], [9]. Según la zona el proceso de distribución de carga, tal como se muestra en la Figura 1-8. Se asume como difusivo para la capa más externa, donde los iones se pueden desplazar más libremente con decaimiento exponencial a medida que se distancian del electrodo, y una capa más compacta donde los iones se agrupan y el decaimiento es lineal.

El potencial electroquímico está relacionado con la estructura atómica de las sustancias en el proceso de reacción. Su capa de valencia indica su carga, siguiendo la regla del octeto, siendo cationes (+, cediendo electrones) o aniones (–, adquiriendo electrones). Su subnivel atómico de energía se relaciona con la tendencia de carga, siendo posible varios tipos de cargas, iones permanentes, iones no permanentes o semipermanentes, aquellos de subniveles  $s^1$ ,  $s^2$  tienden a ser cationes, y los  $p^6$ ,  $p^7$  aniones. Aquellos intermedios tienen diferentes comportamientos, algunos clasificados como semiconductores.

De forma global en un balance de materia-carga ocurre un proceso de oxido-reducción donde el material que se oxida cede electrones y el que se reduce acepta electrones, lo cual puede o no involucrar al electrolito y los electrodos.

La reacción puede ser espontánea produciendo electricidad, la cual sale de la celda a un circuito, este tipo de celdas toma el nombre de electrolíticas, galvánicas o voltaicas. Cuando la reacción no es espontánea la energía necesaria para la reacción proviene de una fuente externa, en este caso la celda toma el nombre de electroquímica.

### 1.8.1 Técnicas electroquímicas

En las técnicas electroquímicas se analizan diferentes parámetros y a diferentes condiciones experimentales, la tabla 1-2 sintetiza las técnicas comúnmente utilizadas, los parámetros que se observan y las condiciones experimentales, así mismo se pueden identificar en el gráfico de planos de la Figura 1-9.

Tabla 1-2. Tabla de técnicas electroquímicas[10]

Técnica	Medida	Condiciones
Potenciometría	E	$i = 0$
Polarografía Voltamperometría	$i = f(E)$	
Amperometría	i	$E = \text{cte.}$
Cronoamperometría	$i = f(t)$	$E = \text{cte.}$
Coulombimetría	Q	$E = \text{cte.}$ o $i = \text{cte.}$
Cronocoulombimetría	$Q = f(t)$	$E = \text{cte.}$
Conductimetría	R	
Electrogravimetría	m	

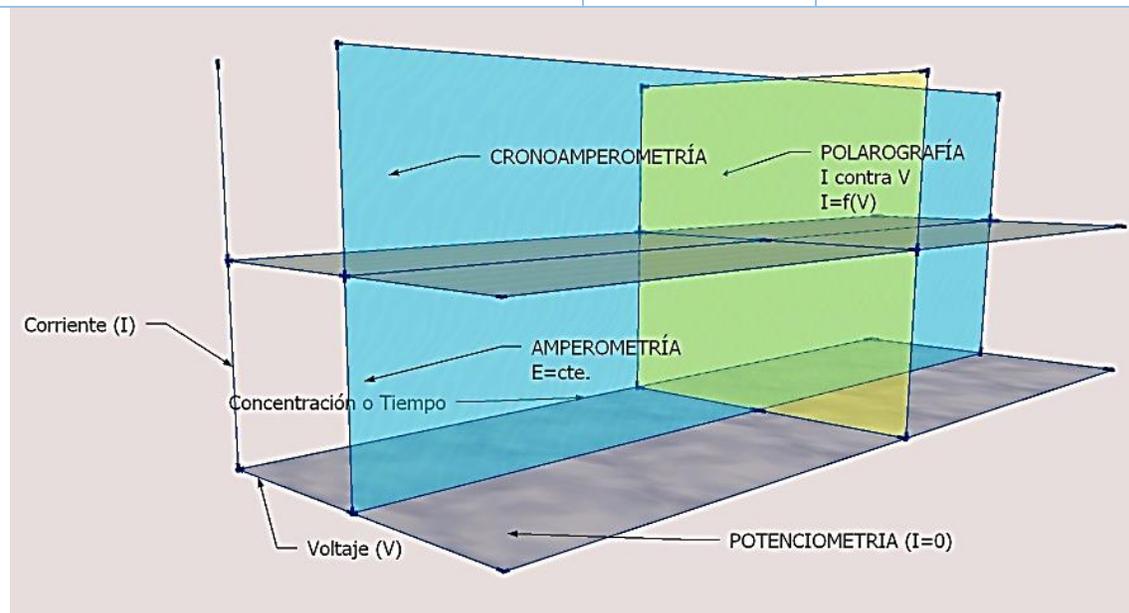


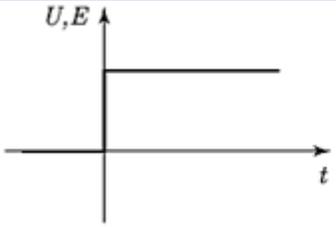
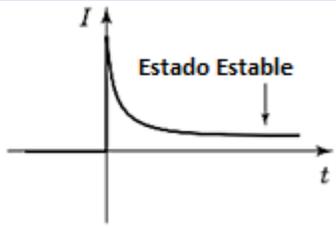
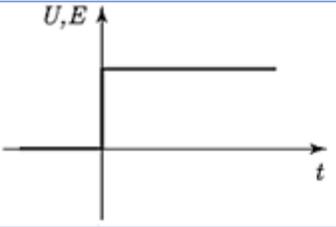
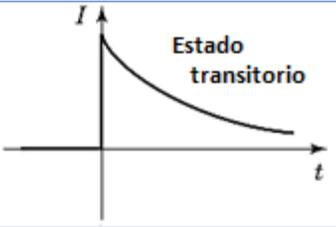
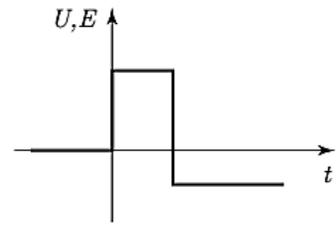
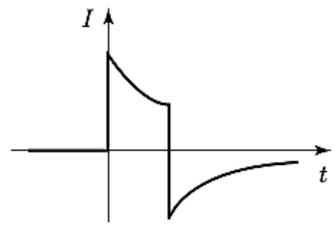
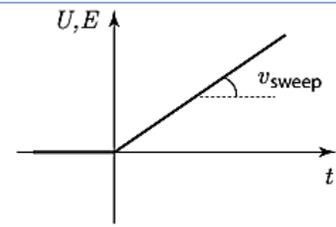
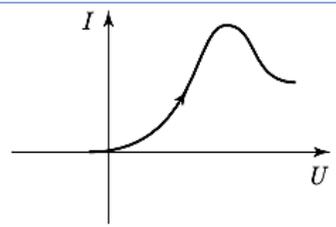
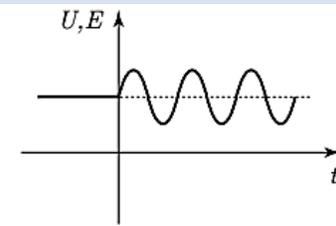
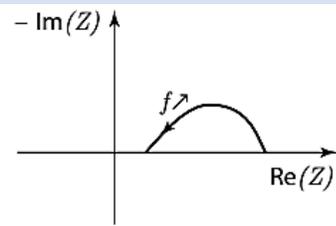
Figura 1-9. Diagrama de planos de las técnicas electroquímicas.

Teniendo en cuenta el estado termodinámico se agrupan en técnicas estáticas o dinámicas. Dentro de las técnicas electroquímicas más utilizadas están:

- Métodos estáticos: de impedancia y potenciometría,
- Métodos dinámicos: Cronoamperometría, cronopotenciometría, voltamperometría.

Una descripción de las respuestas obtenidas en algunos ensayos se da en la tabla 1-3.

Tabla 1-3. Principales técnicas electroquímicas. [1]

	Señal Impuesta	Respuesta
<b>Estado estable</b> (para algunas condiciones experimentales)		
<b>Cronoamperometría</b>		
<b>Una sola etapa</b>		
<b>Dos etapas</b>		
<b>Voltamperometría</b>		
<b>Impedanciometría</b>		

De modo general se pueden clasificar según el lugar de análisis siendo posible el análisis de la respuesta al efecto de la corriente externa en la interfase o en seno, cada una de las técnicas es de importancia para un campo en la industria, como es el caso de la cronoamperometría la que retoma importancia en la industria de las pilas voltaicas al medir la corriente debida a la difusión en función del tiempo.

Un resumen general de las técnicas electrolíticas se da en la Figura 1-10, clasificándolas según el lugar de análisis y el estado del proceso.

En el desarrollo del proyecto se establecerán según las limitantes de tiempo, presupuestales y de alcance del nivel de estudio, la(s) técnica(s) a las cuales se aplicará la celda electrolítica a diseñar.

<b>TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS</b>	De Interfase	Dinámicas	Potenciometría •Con electrodos metálicos •Con electrodos de membrana Valoracionespotenciometricas
		Estáticas	Potenciostáticas •Columbometría potenciostáticas •Voltamperometría •Valoraciones amperométricas •Electrogravimetría Intensidad constante •Valoraciones columbométricas •Electrogravimetrias
	En el Seno	Conductometría	
		Valoraciones conductométricas	

Figura 1-10. Clasificación general de las técnicas electroquímicas.

Los estudios de las propiedades electroquímicas han demostrado un gran impacto en la sociedad y de un tiempo de implementación desde los ensayos preliminares a su uso en la vida cotidiana relativamente corto, en comparación con otras ramas de la ciencia.

A pesar de ser un proceso muy común y del cual depende hasta los procesos vitales, esta rama de la ciencia es relativamente joven, pero su impacto se ve reflejado en solo dos centurias, dando mayor calidad de vida a los seres humanos en ámbitos desde el lujo y el confort como la salud.

Dentro de las muchas aplicaciones de la electroquímica se puede nombrar el de la industria química donde el 99 % del cloro gaseoso se produce por medios electroquímicos [11], el cual es ampliamente usado en el tratamiento del agua potable y en la industria del aseo.

### 1.9 Estado de la técnica

La electroquímica es una ciencia que ha fundamentado su crecimiento en las aplicaciones que se le han dado a sus fundamentos teóricos, casi a la par y desde sus inicios su evolución se vio influenciada por las aplicaciones que se lograban, es así que en 1925 [12] aparece la primer celda en la cual los electrodos metálicos de hierro y aluminio se utilizaron para la purificación del agua. Dada nuestra biología basada en esta sustancia, se volvió y siempre será de gran interés su aplicación tanto al agua potable como para aguas residuales, [5]–[7] entre otros, buscando aumentar los índices de calidad de vida de la población.

En 1942 [16] se registró el aumento de la eficiencia a partir de un electrodo de aluminio en el ánodo, durante los siguientes años se examinaron mejoras en la celda y el uso de membranas semipermeables variando el electrolito utilizándolas como baterías [17], [18], [19], esto para evitar o disminuir la producción de gases provenientes del electrolito, en 1965 se planteó la posibilidad de utilizar la celda con otros electrolitos [20], según el producto deseado. A partir de esta fecha se tomaron como variables de análisis toda la celda y su posible uso para la síntesis orgánica, por ejemplo la síntesis de adiponitrilo a partir de acrilonitrilo (plásticos) [21].

Algunas de las iniciativas se refieren a mejoras en los electrodos, observando su mejor funcionamiento con materiales semiconductores, como es el caso de la producción de hidrógeno gaseoso a partir de agua [22], en el cual se utiliza un polímero de ácido sulfónico per-fluorado. La reacción electrolítica del agua para la producción de hidrógeno gaseoso, siempre ha llamado la atención y es de gran interés por la posibilidad de uso del hidrógeno como combustible, como alternativa a los hidrocarburos entre otros [23]–[26].

Los tipos de electrodos y los arreglos geométricos de las celdas, así como el material constituyente se han analizado. Para los electrodos se han utilizado materiales muy variados, desde el diamante [27], [28] hasta materiales orgánicos como fibras de poliacrilonitrilo [29], reconocido por su resistencia a la llama. Los arreglos geométricos de las celdas varían también, la mayoría se orientan a mejorar la densidad de corriente o su capacidad de almacenamiento formando estructuras cilíndricas coaxiales de los electrodos [30] o pilas multicelda para lograr mayor densidad de corriente (750 mA/cm<sup>2</sup> en estado estable indefinidamente)[31], o en estructura de platos bipolares [32] con

una membrana de electrolito intermedio en un arreglo de uno o más platos, para disminuir costos de la celda.

Las membranas semipermeables se utilizan como medios de transporte de carga [33]–[35] o como medios de interferencia entre los productos de cada electrodo, en otros se obvió el uso de la membrana valiéndose de un arreglo de platos de grafito, PDMS y plexiglás en los cuales los electrolitos entran separados y terminan por una sola salida [36].

Los electrolitos se han analizado y algunas mejoras involucran soluciones no acuosas, [37]–[41] entre otros más así como las soluciones de compuestos orgánicos [42]–[44].

Muchos de los productos químicos de la industria y de la vida diaria se obtienen casi exclusivamente por electrólisis, como es el caso del cloro y sus compuestos oxigenados los cuales se obtienen casi en su totalidad por medio de la electrólisis [11].

Las aplicaciones se han diversificado y se pasa por la síntesis orgánica hasta la protección contra la oxidación y ahora se llega hasta la fotocatalisis. En el campo de los procesos químicos la producción de hidrógeno, la fijación de dióxido de carbono y la hidrogenación orgánica se proponen como procesos electroquímicos a tener en cuenta en el futuro [45], así como la intensificación de procesos [46]. En la bibliografía referenciada se puede ampliar el conocimiento sobre sus aplicaciones industriales [11].

Es posible encontrar en la actualidad muchos nichos de investigación y se ha logrado extrapolar a otras áreas con aplicaciones tan diversas como los paneles solares.

Uno de los retos que presenta la aplicación de la electroquímica es la miniaturización, el cual ya ha llegado a otras ramas científicas a obtener grandes aplicaciones, como es la computación cuántica, y es gracias a la multidisciplinariedad que se ha logrado este objetivo, para este caso es la nanotecnología la que ha dado un gran impulso y ha permitido que se descubran nuevas rutas de investigación y perspectivas de desarrollo y usos potenciales [47]–[50].

El almacenamiento de energía en condensadores electrolíticos se ha visto optimizado por la obtención de nuevas formas de almacenamiento y en nuevos materiales [48], [50], [51], esto tiene mucho impacto principalmente en las áreas del transporte y las comunicaciones, dándoles mayor portabilidad.

Una gran ventaja de la electroquímica con respecto a otras ciencias es que su tiempo de implementación al uso cotidiano es relativamente corto y por tanto se puede esperar un gran impacto dentro de las siguientes décadas por los desarrollos.

## CAPÍTULO 2. ESPECIFICACIONES Y DISEÑO

### 2.1 Introducción

#### 2.1.1 Electrolisis

La electroquímica es una ciencia “que analiza y describe las **transformaciones de la materia** en la escala atómica mediante cambios de **carga electrónica** que pueden controlarse mediante **dispositivos eléctricos**. Tales transformaciones se llaman **reacciones de oxidación-reducción**”[52]. Consiste en la aplicación de una corriente eléctrica para producir un cambio en la composición de una sustancia, por medio de una reacción de óxido-reducción. En la electrólisis se identifican 3 partes

- **Electrodos:** Son dos o más, Figura 2-1, y que según su funcionamiento pueden ser:
  1. **Ánodo:** donde ocurre la oxidación,
  2. **Cátodo:** donde ocurre la reducción

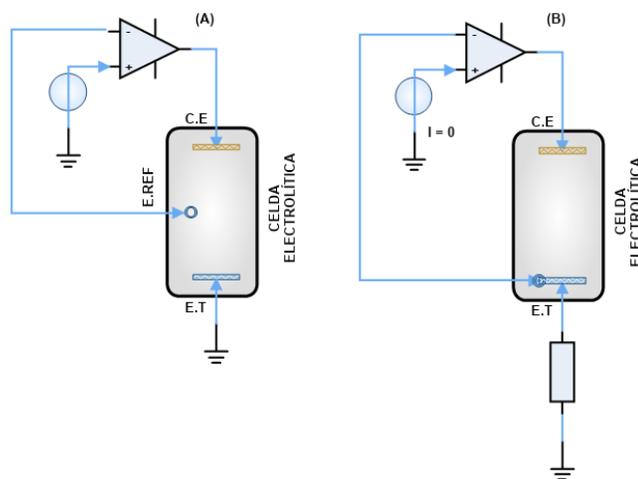


Figura 2-1. Esquema de una Celda electrolítica  
(A) con tres electrodos (B) Don dos electrodos. E.T: electrodo de trabajo. C.E: contraelectrodo. E.REF: electrodo de referencia

En la electrólisis electrodo de referencia tiene como función mantener el flujo de alimentación eléctrica constante, también se genera una capa de deposición en el electrodo de trabajo.

**Electrolito:** Medio donde ocurre la reacción química

Un esquema de una celda electrolítica se da en la Figura 2-2 para la reacción de óxido—reducción del Cobre y el Zinc en un electrolito de Sulfato de cada metal utilizando un medio poroso afín a los iones del electrolito para su intercambio.

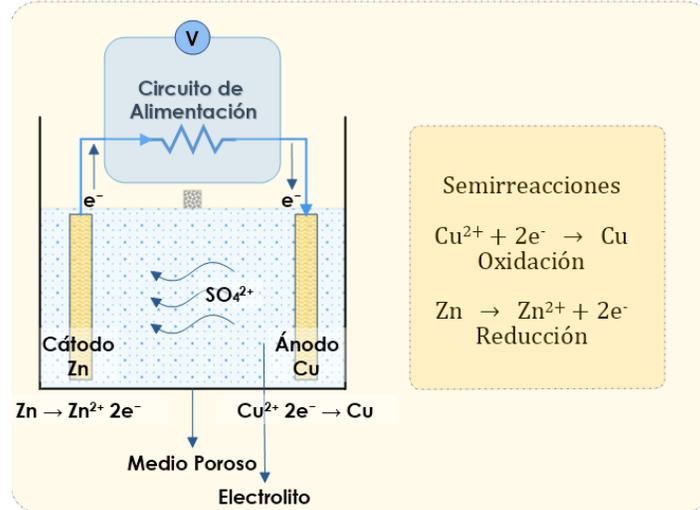


Figura 2-2. Esquema de proceso electrolítico

Como se especifica en la Figura 2-4, la electrólisis requiere de una fuerza externa, un **Voltaje** que venza las fuerzas internas de las moléculas y del circuito generado para que el proceso ocurra, lo cual se le llama **sobrepotencial**. Por tanto, no es un proceso espontáneo y toma importancia el valor de la **Potencia consumida**. En el diseño se busca minimizar el consumo de potencia.

Otro factor relevante es la **transformación de la materia**, controlada por el **flujo de corriente (I)**.

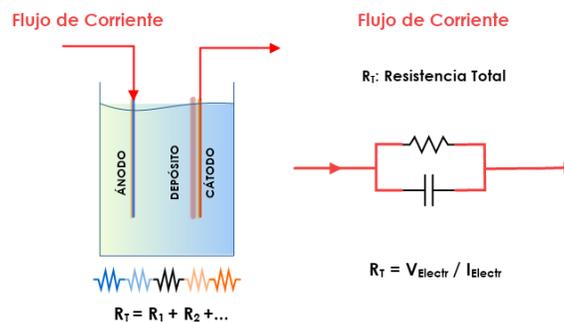


Figura 2-3. Celda Electrolítica y Circuito Equivalente

Como resultado de la interacción eléctrica en el electrolito, Figura 2-3, por medio de los electrodos de forma general simplificada la electrólisis se asemeja al circuito equivalente de es por ello que se hace la analogía simplificada a una resistencia y un capacitor en paralelo con el sistema electrolítico, dado que a medida que avanza la capa depositada puede variar el flujo de alimentación. El efecto capacitivo se debe a la acumulación de energía en la capa depositada en el cátodo.

### 2.1.1.1 Potencial de celda

La diferencia de potencial [53] a través de la celda dependerá de cuatro componentes que están interrelacionados:

- El potencial de circuito abierto  $U$ ,
- El sobrepotencial de la superficie del electrodo,
- La caída del potencial óhmico en el electrolito,
- El sobrepotencial de concentración.

Al estar estas componentes interrelacionadas, el cálculo del potencial total de la célula se hace más complicado que el de la caída potencial óhmica sola. Por eso no solo corresponde al diferencial de potencial eléctrico proporcionar la energía necesaria para realizar una electrólisis. Los valores de las potencias se pueden analizar también como debidas a las **resistencias óhmicas (R)** que involucra cada paso.

La **eficiencia de corriente** de los cambios químicos en los electrodos y el potencial de celda son los parámetros que determinan el consumo de energía de la célula. Es visible que el objetivo es siempre minimizar el potencial de celda.

El potencial de celda se minimiza:

- al tener una gran superficie en los electrodos
- con altos regímenes de flujo de transporte de masa y/o la operación en régimen turbulento
  - por movimiento del electrodo
  - el uso de promotores de turbulencia o agitadores en el electrolito.

El término  $I * R$  es la suma algebraica de las resistencias electrónicas e iónicas a través de la celda, y comprende todas las resistencias óhmicas en el sistema, como las de los electrolitos dentro del espacio interelectrodo, la membrana, los electrodos, los colectores de corriente y los contactos eléctricos externos. Por tanto, se busca minimizar las pérdidas de energía en las células, y se puede lograr:

- Al reducir los sobrepotenciales en los electrodos, mediante la elección adecuada de los materiales del electrodo.
- Un transporte de masa eficiente.
- Minimizando las resistencias dentro de los electrodos, a través de los electrolitos y a través de la membrana.

### 2.1.1.2 La velocidad de cambio químico

La velocidad de cambio químico global en un proceso de electrodo depende de la densidad de corriente,  $j$

$$j = \frac{I}{A}, \quad \text{donde} \quad \begin{array}{l} I: \text{corriente} \\ A: \text{Área del electrodo} \end{array}$$

y la selectividad del cambio químico, dado que existen reacciones laterales, que viene en términos de la eficiencia de corriente,  $\phi$ , definida como la fracción de la carga utilizada en la reacción deseada.

Dado que el trabajo se orienta hacia el diseño de un sistema de medición electrolítico, en el presente trabajo solo se dan a conocer los parámetros relevantes para el diseño y se dejan como referencias para un desarrollo a profundidad de electroquímica en Newman, Fuller y Harb, Kreysa et. al. [53]–[55].

## 2.2 Proceso de diseño

El diseño de celdas electroquímicas surge como técnica de la ingeniería desde 1960 con los estudios de C. L. Mantell [56] y se ha avanzado buscando la optimización y las aplicaciones industriales. Desde la ingeniería electroquímica se considera una celda electrolítica compuesta por los electrodos (cátodo y ánodo) y el medio de reacción (electrolito), no se tienen en cuenta la fuente de corriente, el vaso contenedor y demás componentes de una celda, así como el análisis de materiales solo se busca la durabilidad sin tener en cuenta sus propiedades eléctricas y magnéticas, dado que los avances e investigaciones se orientan a aplicaciones industriales. En este proyecto se toma el enfoque de la ingeniería electrónica como medio para el diseño de un instrumento de medición de un proceso electroquímico, para ampliar y complementar el concepto de diseño.

La metodología de diseño electrónico complementada al analizar las propiedades eléctricas, como la conductividad eléctrica, campo magnético, etc, complementando los análisis de la ingeniería electroquímica.

La electroquímica aplicada proporciona contribuciones prácticas, amigables al medio ambiente y con una buena relación de costo / eficiencia, que la hace competitiva, fácilmente implementable y escalable, con un mínimo de producción de residuos y materiales tóxicos. Sus principales ventajas son:

- **Versatilidad:** Es aplicable a múltiples procesos como la oxidación y/o reducción de materiales, separación de fases, concentración / dilución, la funcionalidad biocida y de descontaminación de, líquidos, purificación de sólido, así como permite el tratamiento desde microlitros a grandes volúmenes de hasta millones de litros.
- **Eficiencia energética:** requiere de temperaturas más bajas de operación en comparación a sus contrapartes no electroquímicas, como destrucción anódica de contaminantes orgánicos en lugar de la incineración térmica; la optimización de la estructura de electrodo y el diseño de la celda disminuyen las pérdidas de potencia por distribución no homogénea de corriente, caída de tensión y las reacciones secundarias.
- **Facilidad de automatización:** las variables de los procesos electroquímicos como potencial de electrodo y corriente de la célula, son apropiadas para la automatización y control de procesos.
- **Rentabilidad:** construcciones modulares y equipos periféricos son generalmente simples y se pueden diseñar a bajo costo.

No existen criterios específicos para el diseño de instrumentos a escala de laboratorio, por lo que se desarrolló una metodología propia para obtener un instrumento funcionalmente correcto, sencillo y eficiente.

El diseño de una celda refleja específicamente una aplicación en particular, a continuación, se mencionan algunas pautas generales:

- **Costos de capital construcción y funcionamiento moderados:** se requieren componentes de bajo costo y operación de procesos a una alta densidad de corriente, determinados por un bajo potencial de celda y una baja caída de presión a través de la celda. Una celda no dividida simplificará las necesidades de ingeniería y permitirá reducir el capital y los costos de funcionamiento.
- **Las disposiciones para el futuro:** un diseño modular que sea fácil de escalar, a través de un aumento en el tamaño o un aumento de las celdas de trabajo.
- **Conveniencia y fiabilidad en el funcionamiento:** seguridad en uniones para evitar fugas de electrolitos y alargar la vida útil de los componentes, lo cual implica un diseño adecuado para los procedimientos de instalación, mantenimiento y monitoreo.
- **Concentración controlada (uniforme):** densidad de corriente, potencial y distribuciones de flujo, junto con el transporte de masa adecuado y la provisión para el suministro de reactivos y la eliminación de productos.
- **Elección adecuada de los componentes de la celda:** para separadores y materiales de electrodos. Existen disponibles materiales variados adecuados para cada proceso,

recubrimientos catalíticos y materiales en disposiciones 2D y 3D. Tanto metales y el carbono se pueden encontrar como láminas, cilindros, coberturas, filtros y espumas.

- **Simplicidad y la versatilidad:** pueden ser unos factores importantes para lograr un diseño estable duradero.

Acorde a estos lineamientos de diseño, en la metodología se establecieron unas especificaciones y condiciones técnicas, con la funcionalidad esperada, el consumo de potencia, espacio máximo que puede ocupar, etc., y también las condiciones limitantes operativas y locativas, propias del proyecto.

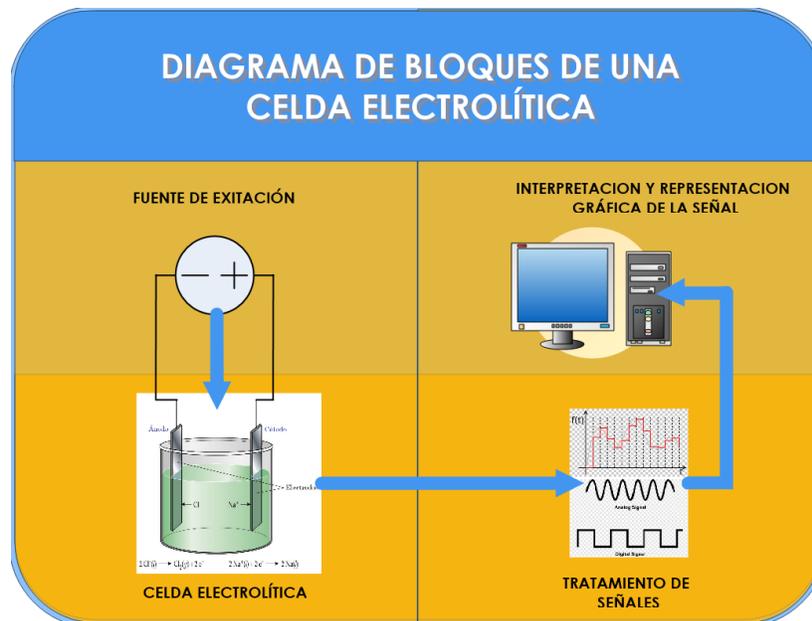


Figura 2-4. Secciones y componentes de la celda electrolítica según un análisis electrónico

En la Figura 2-4 observamos que el diseño de un instrumento de medición posee un alto componente de instrumentación electrónica, por lo que es relevante el análisis electromecánico y electrodinámico de la estructura y componentes de una celda electroanalítica.

### 2.2.1 Criterios de diseño

La metodología se muestra en la Figura 2-5, bajo este enfoque, se determinaron cuatro factores que delimitan el diseño:

1. El tipo de análisis
2. Geometría
3. Operatividad
4. Costos

Se partió de un estudio de las técnicas de análisis electroquímico y sus características en los tres factores restantes, buscando que exista una correlación entre ellos. Las variables determinantes del

proceso electroanalítico son: corriente (I), voltaje (V) y temperatura (T), que vienen definidas por dos factores intrínsecos del diseño de las celdas, la **Hidrodinámica**, que analiza el flujo de materia y energía térmica, y la **Electrodinámica** que se utiliza para conocer la relación eléctrica con el flujo másico del sistema y los niveles de eficiencia de la celda.



Figura 2-5. Metodología de Diseño

El diseño se inicia haciendo una revisión bibliográfica de los métodos de análisis. Se partió de la selección del método de análisis, para luego analizar las distintas geometrías, su funcionamiento y buscando unos costos reducidos. En los dos primeros factores se debe tener en cuenta principalmente el análisis hidrodinámico, posteriormente prevalecer el análisis electrodinámico, acorde al argumento ya establecido.

No se puede llegar a una solución donde se cumplan todos los requisitos por lo que se opta por un diseño modular, para que sean factibles desarrollos posteriores y acorde a los referencias bibliográficas encontradas [52], [54], [55], [57]–[63]. Se encontró que la fuente de excitación es el módulo relevante, dado que las diferentes técnicas de análisis requieren diferentes tipos de impulso eléctrico, acorde a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Para ello se realiza un resumen de las características resaltando aquellas de importancia para el proyecto, como su composición (número de electrodos) y Tabla 2-2. Resumen de características de las técnicas electroanalíticas. las consideraciones si dentro del instrumento se utilizan materiales peligrosos o tóxicos, dado que el laboratorio no cuenta con certificación para la disposición de estos residuos, como es el caso del Mercurio, lo cual establece una limitante en el desarrollo del proyecto. Este análisis se presenta en la Tabla 2-2.

*Tabla 2-1. Especificaciones y Restricciones de Diseño*

Especificaciones Técnicas
Voltaje Máximo: <b>5V</b> Corriente Máxima: <b>3A</b> Temperatura de Operación: <b>298° K</b> Volumen de Operación: <b>150 mL</b>
Restricciones
Manejo de sustancias: <b>No está permitido las sustancias peligrosas o muy corrosivas.</b> Costos: <b>Bajo Costo y de alcance modular</b>

Teniendo en cuenta que el proyecto busca generar un prototipo inicial, se priorizan las técnicas que no presenten restricciones y que permitan el desarrollo modular.

De la Tabla 2-2 analizamos la operatividad, buscando simplicidad en los diseños en los componentes de la celda, número de electrodos, tipo de corriente que utiliza y las condiciones de operación.

Se puede extraer que los **métodos coulumbimétricos** poseen mayor simplicidad y flexibilidad, permitiendo una implementación más práctica.

Otro criterio de diseño son los costos, los métodos electrolíticos involucran menores costos que otros métodos analíticos, sin embargo, se busca implementar dispositivos modulares que permitan una alta operatividad y baja complejidad, tal como los dispositivos RISC (Reduced instruction set computing o computer, o en español Computador con Conjunto de Instrucciones Reducidas), como medio para la adquisición de la señal, por su simplicidad, bajo costo, además que facilita la depuración de errores y operan a mayores velocidades de reloj que los dispositivos CISC (Complex Instruction Set Computer).

En la tabla 2-2 se presenta de forma abreviada las características eléctricas a tomar en consideración para cada una de las técnicas propuestas (Potenciometría, Voltamperometría, Coulombimetría). El tipo de alimentación es relevante en el diseño y construcción de la fuente de excitación o alimentación de la celda.

Tabla 2-2. Resumen de características de las técnicas electroanalíticas.

Técnica	Variable	Condiciones	Nro. de Electroodos	Manejo de Sustancias Peligrosas	Tipo de Alimentación Eléctrica
<b>1. Potenciometría</b>	<i>Mide la diferencia de potencia en los electrodos</i>				
Potenciometría	E	I = 0	2	SI <sup>(1)</sup>	CD
Conductimetría	L <sub>M</sub>	R=cte.	2	NO <sup>(2)</sup>	CD
<b>2. Voltamperometría</b>	<i>Mide la corriente de la celda mientras se altera activamente el potencial de las celdas</i>				
Polarografía Voltamperometría	I = f(E)		3	SI <sup>(1)</sup>	CA
Amperometría	I	E = cte.		SI <sup>(1)</sup>	CA
Cronoamperometría	I = f(t)	E = cte.		SI <sup>(1)</sup>	CA
<b>3. Coulombimetría</b>	<i>Mide la corriente en la celda en el tiempo</i>				
Coulombimetría	Q	E = cte. I = cte.	2	NO	CD
Cronocoulombimetría	Q = f(t)	E = cte.	2	NO	CD
Electrogravimetría	m		2	NO	CD
Símbolos					
<b>E</b>	Potencial eléctrico		<b>Q</b>	Carga eléctrica	
<b>L<sub>M</sub></b>	conductancia molar		<b>R</b>	Resistencia eléctrica	
<b>I</b>	Corriente		<b>m</b>	Masa	
<b>t</b>	Tiempo				
<b>(1)</b>	Utiliza electrodos con Mercurio		<b>(2)</b>	Requiere curvas de calibración y control de pH	

### 2.3 Diagrama de bloques

Acorde a lo especificado en la figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para los dos primeros criterios se tiene en cuenta la hidrodinámica que es la que determinará las condiciones propias al flujo de transformación de masa, la fuerza motriz es la corriente eléctrica proporcionada por la fuente de excitación. En los dos factores finales se tendrá como criterio la electrodinámica

para el diseño. Es así que se obtiene el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2-7Figura 2-6.

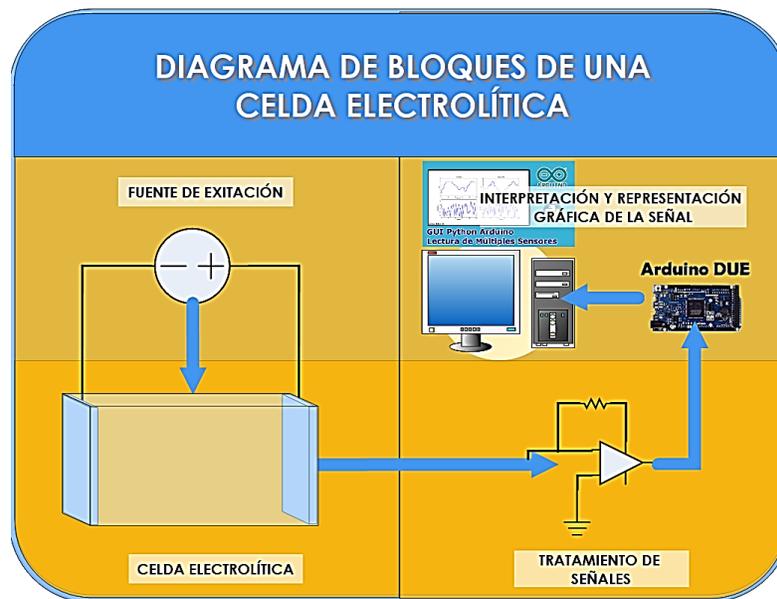


Figura 2-6. Diagrama de bloques celda electrolítica coulombimétrica [54]

### 2.3.1 Tipo de análisis

Teniendo en cuenta los factores anteriores se establece el diseño de una celda electroanalítica para **coulombimetría amperostática**, la cual opera a **corriente constante**, para la cual el diagrama de bloques de la celda viene dado por la Figura 2-6, especificando en tratamiento de señal un filtro basado en un amplificador, así como se utiliza un módulo Arduino Due como medio de adquisición de la señal para luego ser presentada en una interfaz gráfica basada en lenguaje Python. Cada uno de los criterios de diseño se disgregan a continuación.

### 2.3.2 Geometría

Dentro del análisis geométrico de la celda [55], [64], la geometría se determina buscando la estabilidad térmica y maximizar el coeficiente de transporte de materia ( $k_m$ ) y/o una gran área específica en el electrodo ( $a_e$ ), definidas como:

$$k_m = \frac{I_L}{A_e \cdot z \cdot F \cdot C_0}, \text{ donde: } I_L: \text{ Corriente limitante, } A_e: \text{ área del electrodo}$$

$z$ : número de electrones intercambiados en la reacción

$F$ : constante de Faraday

$C_0$ : Concentración en el seno del electrolito

$a_e = \frac{A_e}{V_r}$ , donde:  $A_e$ : Área del electrodo       $V_r$ : Volumen del reactor o celda

### 2.3.2.1 Celda y electrodos

La geometría de la celda va ligada a la geometría de los electrodos, pues simplifica el análisis y los procesos constructivos. Además, teniendo una correlación correcta entre las geometrías se optimiza el funcionamiento de la celda en su totalidad, al evitar fugas de corriente, ya sea en los componentes estructurales como en el electrolito.

### 2.3.2.2 Clasificación de las celdas [64]

Según los criterios de un alto valor de  $k_m$  y / o  $a_e$ , tendríamos los siguientes tipos de celdas:

- **Celdas de área de electrodo pequeña:** con transporte de masa mejorada, para aumentar  $k_m$ , mediante los electrodos en movimiento o mediante la aplicación de promotores de turbulencia.
- **Celdas de gran área de electrodo:** en un volumen de celda pequeña como las celdas de cátodos múltiples, de electrólisis de superficie extendida (ESE) o celdas de electrodos capilar.
- **Celdas de electrodos tridimensionales:** proporcionan un área de específica amplia y un aumento del transporte de masa específica dentro de la estructura tridimensional, como celdas de flujo poroso, la celda de cama empaquetada, celda de lecho fluidizado o celda del tubo giratorio.

El valor de  $k_m$  puede aumentarse al operar en convección forzada, lo cual se logra a través de la agitación de la solución, al mejorar el flujo de electrolitos con promotores de turbulencia o con electrodos en movimiento[64]. La orientación perpendicular de los electrodos a la dirección de flujo de corriente permiten una mayor accesibilidad de los reactivos [62]. En una disposición en paralelo de los electrodos se obtiene para un buen rendimiento del reactor (bajo potencial celular, alta eficiencia de corriente). En celdas a escala de laboratorio, los efectos de convección forzada suelen ofrecer una contribución significativa al rendimiento de transferencia de masa, así como los flujos turbulentos[65].

Por tanto, dado que en los análisis en laboratorio se trabaja por lotes, se escoge una *geometría rectangular para la celda y electrodos laminares en disposición paralela*, buscando un régimen de operación turbulento. La geometría rectangular es flexible y permite un análisis más simple de los componentes que en otro tipo de geometría al ofrecer una densidad de corriente y una distribución de potencial uniformes [58]. Los electrodos bidimensionales tienen baja densidad de corriente en

comparación con otros tipos de electrodos, y por lo tanto facilita el análisis cuantitativo al ser más controlable, lo cual se puede compensar al aumentar el área específica del electrodo [66].

### 2.3.3 Materiales

El análisis para la elección de los materiales [67], [68] busca la estabilidad de los componentes de la celda, durabilidad y en nuestro caso la estabilidad a las sustancias a analizar.

La estabilidad a la corrosión de los materiales utilizados en la construcción de la celda es el factor de mayor importancia que sus propiedades mecánicas.

La corrosión electroquímica de los metales en contacto con electrolitos puede ser causada por:

- Corrosión superficial
- Corrosión por picaduras (en particular por electrolitos con cloro)
- Corrosión por grietas y depósitos
- Agrietamiento por tensión, en celdas a presión por tuberías de gas y electrolitos.

Es posible la combinación de materiales para disminuir la corrosión en los materiales, utilizando caucho o polímeros.

Dado que el presente diseño se orienta para medición de electrolitos de laboratorio y que son generalmente de baja concentración, por tanto, el nivel de corrosión aunque es bajo, puede generar interferencias en la medición debido al uso continuo, pero, permite la utilización de materiales poliméricos o cristalinos que poseen buena resistencia a la corrosión, como es el caso de vidrios tipo Pyrex<sup>®</sup>, vidrios de boro — silicato, o polímeros como el politetrafluoroetileno (PTFE) [69], [70] o ácido poliláctico (PLA) que son de alta resistencia a la corrosión.

La comparación entre las dos opciones anteriores se muestra en la Tabla 2-3, basados en las propiedades eléctricas nos da como elección los polímeros por su baja constante dieléctrica, donde con valores entre 4,5 – 8, se comportan como aislantes [71].

Otra propiedad relevante es la estabilidad térmica, que dependerá en gran medida de las sustancias a analizar y su relación es compleja, los electrolitos son bastante estables térmicamente a temperatura ambiente [72]. Para una variación de 40°C se puede tener una variación en el potencial de celda con la temperatura de 0,006 V [73], demostrando su estabilidad. Existen aplicaciones de este factor a la investigación en ciencias biológicas, donde las sustancias tienen alta dependencia conformacional y estructural de la temperatura [74], [75].

Tabla 2-3. Propiedades de materiales

Material	Constante dieléctrica (F/m)	Conductividad Térmica (W/(m·K))***
PTFE	0 [70]*	$2.5 \times 10^{-3}$ [70]
PLA	2.9 [76] **	0.13 [77]
Vidrio Pyrex®	4.6 [78] **	1.1 [79]
Vidrios de Boro—Silicato	4.7 [71] **	1.1 [71]
	* A 60 Hz y 300 K ** A 1 MHz y 300 K	*** A 296 K

Para futuras aplicaciones se puede tener en cuenta los análisis en no electrolitos, en los cuales se debe tener en cuenta, además de los factores anteriores, la toxicidad de la sustancia [80].

### 2.3.3.1 Celda

A escala de laboratorio la resistencia mecánica a la deformación no es un factor relevante por los pequeños volúmenes de trabajo, que es la razón por la cual no se escogen materiales metálicos, por tanto, acorde a estos criterios se busca un material que tenga baja constante dieléctrica.

A escala de laboratorio los efectos eléctricos conductivos de los materiales como el cuarzo pueden ser relevantes en comparación con los valores de conductividad en el circuito *fente de excitación — electrodos — electrolitos*, se busca que el material de la celda sea poco conductor para evitar interferencias en los procesos de medida. Es por esto que de los materiales disponibles se tienen como opción apropiada el vidrio, y como la cantidad de boro aumenta la reactividad química, habrá que limitarse a concentraciones bajas en estos materiales [71]. Otro material de mejor resistencia a la corrosión son los polímeros, que bajo este aspecto sería los predilecto.

Acorde a esto, se establece cuerpo de *celda de una material polimérico* aislante con resistencia a la corrosión, para evitar las fugas de corriente [81].

Como el nivel de influencia de la temperatura en los factores de operación es bajo [73], en el dispositivo se opta por la medida de la temperatura con un aislamiento térmico para evitar las interferencias externas.

### 2.3.3.2 Electrodo

Existen diversos materiales para los electrodos, desde grafito [82], metales, recubrimientos metálicos a mezclas y estructuras porosas para mejorar la conductividad. Los ánodos de carbono cristalino (grafito) son inmune a las soluciones altamente corrosivas de cloruro [68].

Prima la conductividad sobre la resistencia a la corrosión para la selección del material del electrodo, pues se busca la estandarización del análisis, pudiendo tomar la alternativa de un material fácilmente disponible, para su remplazo, para compensar el desgaste por uso.

Existe una fuga de corriente de hasta el 4% con más de un electrodo de trabajo que puede generar acción corrosiva en la celda [81], por lo que en los alcances del presente proyecto se tendrán dos electrodos, y se propone la implementación de un sistema de tres electrodos para un estudio posterior.

#### 2.3.4 Costos

Según Fuenmayor, Silvera [83], [84], se hace un análisis del ciclo de vida del dispositivo (Normas ISO 55000 y 50001: Etapas en la gestión de un activo y la energía), para aumentar la confiabilidad durante la mayor cantidad de tiempo, buscando el punto óptimo de los costos.

Se concluye de las Figura 2-7 y Figura 2-8, que:

- Un buen diseño logra disminuir los costos, que, a menores inversiones en la etapa de diseño, los costos para el ciclo de vida del dispositivo aumentan en los momentos de operación y mantenimiento, Figura 2-8.

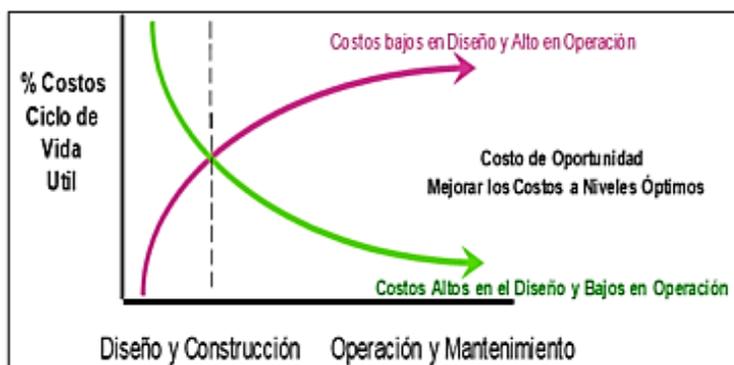


Figura 2-7. Curva de costos del ciclo de vida

- Los valores de diseño pueden alcanzar hasta 50-60%, y es el punto óptimo de inversión, lo cual es clave para no sacrificar valor y desempeño, la relación óptima Costos-Riesgos-Beneficios se obtiene al comparar los Costos de Capital Inicial y los Costos de Operación, donde se debe evitar ir a los extremos que se muestran en la Figura 2-9Figura 2-8.

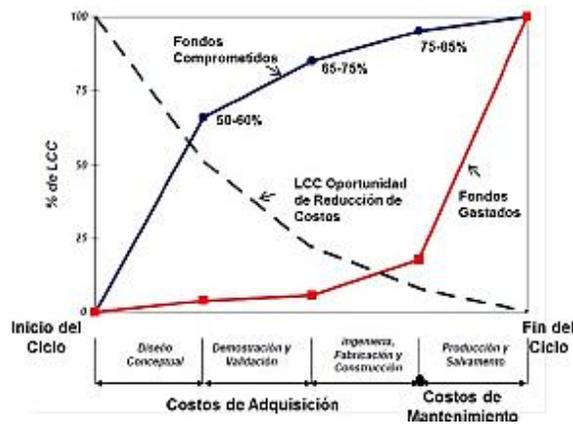


Figura 2-8. Porcentaje de Costo durante el ciclo de vida para las diferentes etapas del ciclo

De los costos de la elaboración del dispositivo según Fuenmayor, Silvera [83], [84], se toman como los más importantes para el presente proyecto aquellos que generen mayor nivel de inversión, y se establecen en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4. Costos de un Proyecto y Costos más Relevantes para la elaboración del dispositivo

A. Costo del Proyecto	B. Costo del Proyecto más relevantes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos de Construcción</li> <li>• Costos de las Herramientas</li> <li>• Costo de la Tecnología</li> <li>• Costos de Puesta en Marcha</li> <li>• Costos de los Repuestos</li> <li>• Costo de la Ingeniería</li> <li>• Costos de Entrenamiento</li> <li>• Costos de los Servicios</li> <li>• Costos de Suministros</li> <li>• Costos de los Manuales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos de Construcción</li> <li>• Costos de los Repuestos</li> <li>• Costos de Suministros</li> </ul>

Se puede concluir de la Tabla 2-4 B, que la disponibilidad y facilidad de manejo de los materiales, dada su resistencia, garantizarán la durabilidad del dispositivo teniendo en cuenta una carga de uso media.

Con los materiales de la Tabla 2-3 se puede concluir de un análisis de Costo Inicial – Costo de Operación, los polímeros serían los apropiados para la celda y los metales como el cobre para los electrodos, que ya vienen en placas aisladas, serían los indicados por su alta disponibilidad y bajo costo.

## 2.4 Adquisición y tratamiento de la señal

Existen varias arquitecturas y dispositivos para la adquisición y tratamiento de una señal, de ellas las que han tenido un desarrollo importante en los últimos años son las arquitecturas RISC (Reduced Instruction Set Computer) y CISC (Complex Instruction Set Computer) por su facilidad de implementación y flexibilidad en sus aplicaciones. Un esquema de la forma en que ejecutan las instrucciones dentro de cada arquitectura se presenta en la Figura 2-10, donde se observa claramente que la simplicidad de las instrucciones, para lo cual fue estructurada RISC, facilita la rapidez de su ejecución y favorece la simplicidad en su implementación en un proyecto en particular.

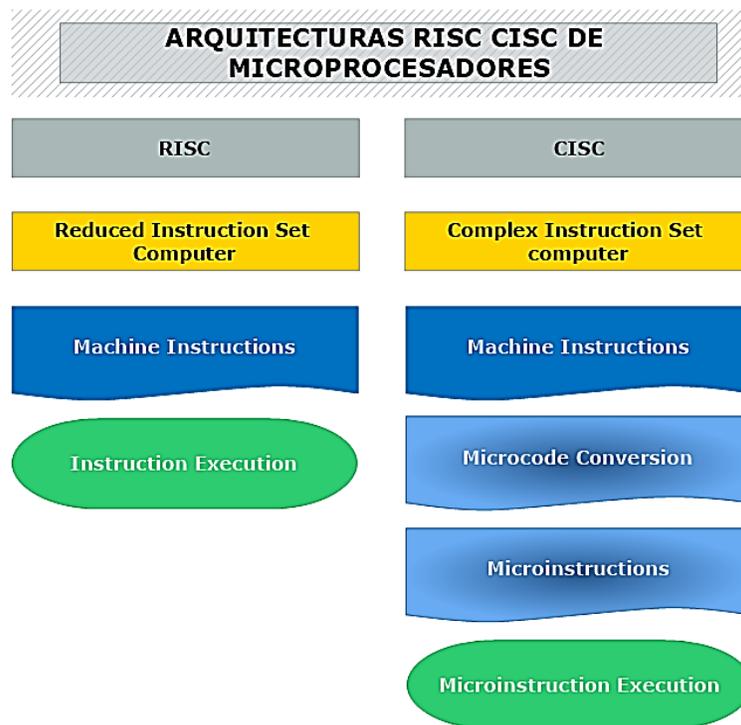


Figura 2-9. Esquema de ejecución de las instrucciones para Arquitecturas RISC y CISC

Una comparación de las características de las dos arquitecturas se da en la Tabla 2-5. Los microprocesadores basados en RISC tienen como propósito que la mayoría de las instrucciones simples para que la computadora decodifique y ejecute, optimizadas y muy rápidamente (generalmente en un solo ciclo de reloj). Para ello la arquitectura RISC limita el número de instrucciones incorporadas en el microprocesador, utilizando menos ciclos de procesador y aportando un rendimiento mucho más alto, haciendo que sean dispositivos más simples en software y hardware y por tanto más económicos, acorde a los criterios del proyecto, por lo cual es escogida.

En la Tabla 2-5 se resaltan las características que la hacen preferible la arquitectura RISC ante la arquitectura CISC.

Tabla 2-5. comparación de las arquitecturas RISC y CISC

	RISC	CISC
	Reduced Instruction Set Computer	Complex Instruction Set Computer
<b>Tipos de Instrucciones</b>	Instrucciones simples (una por ciclo)	Instrucciones complejas
	Pocas instrucciones y modos	Muchas instrucciones y modos
	Instrucciones de longitud fija	Instrucciones de longitud variable
<b>Tipo de formato</b>	Formato de las instrucciones fija	Formato de las instrucciones variable
	Ejecución rápida de instrucciones	Ejecución lenta de instrucciones
	Usa registros de 32 y 64 bits	Usa muy pocos registros
<b>Complejidad</b>	Complejidad en el compilador	Complejidad en el microprograma
	Instrucciones implementadas por hardware	Instrucciones implementadas por software

Se hace la aclaración que no es un criterio general que la arquitectura RISC sea mejor que la CISC, depende siempre de la aplicación a la que se oriente y las características que se especifiquen y por tanto son las condiciones del instrumento donde se desea aplicar las que darán cual arquitectura es la más adecuada.

Existen varios dispositivos con la tecnología RISC como los Atmel AVR, alcanzando los dispositivos móviles de varias marcas, dispositivos de red y aplicativos de IoT (Internet of Things).

De las plataformas disponibles la que sobresale para la adquisición de señales son los módulos Arduino, que presentan las ventajas de su flexibilidad, ser una plataforma de código abierto bajo licencia Creative Commons y ser de amplia distribución, permitiendo el desarrollo y actualización constante, lo que lo hace equiparable a muchas otras plataformas existentes en el mercado. En este proyecto se utilizará un Arduino DUE al poseer una mayor resolución. En la tabla del Anexo 0 se resaltan las características que hacen que se priorice este módulo para la adquisición y tratamiento de la señal.

El Arduino Due posee un microcontrolador Atmel SAM3X8E, basado en el núcleo Cortex-M3 de 32-bit, que da una diferencia ostensible en el rendimiento sobre las unidades MCU de 8-bit que tienen otras placas similares, opera a una velocidad de reloj de 84 MHz, posee una tasa de muestreo de

1000 ksps (kilomuestras por segundo), en comparación con Arduino UNO que trabaja a una tasa de muestreo de 15 ksps. Incluye 54 pines digitales de E/S, de los cuales 12 son salidas PWM. También incluye 12 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), etc. Así mismo, a diferencia de otras placas Arduino, la Arduino Due funciona a 3.3v en vez de los 5v de otras placas, ofreciendo mayor eficiencia energética. El chip ARM consume mucha menos energía que un procesador x86 y el alto rendimiento se ve equiparada en los chips ARM por las altas capacidades computacionales actuales. En el Anexo 0. se da una descripción detallada de las diferentes placas Arduino.

## 2.5 RESUMEN

La electroquímica es una ciencia tecnológica y que presenta las siguientes ventajas con respecto a tecnologías similares:

- Versatilidad
- Eficiencia energética
- Facilidad de automatización
- Rentabilidad

Para el diseño de una celda se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Costos de capital construcción y funcionamiento moderados
- Las disposiciones para el futuro
- Conveniencia y fiabilidad en el funcionamiento
- Concentración controlada (uniforme)
- Elección adecuada de los componentes de la celda
- Simplicidad y la versatilidad

Dado que la investigación se ha dado en el desarrollo de celdas electrolíticas industriales, se elaboró una metodología en busca de satisfacer todas las necesidades de diseño para una celda electrolítica para análisis de laboratorio, teniendo como criterios, en el orden, los siguiente:

1. El tipo de análisis
2. Geometría
3. Operatividad
4. Costos

Las variables del proceso son: corriente (I), voltaje (V) y temperatura (T), que vienen definidas por dos factores intrínsecos al diseño de las celdas, la Hidrodinámica, que analiza el flujo de materia y energía térmica, y la Electrodinámica que se utiliza para conocer la relación eléctrica con el flujo másico del sistema y los niveles de eficiencia de la celda.

Teniendo en cuenta los factores anteriores se establece el diseño de una celda electroanalítica para **coulombimetría amperostática**, la cual opera a corriente constante, con un tratamiento de la señal con un filtro basado en un amplificador. Se utiliza un módulo Arduino Due como medio de adquisición de la señal para luego ser presentada en una interfaz gráfica basada en lenguaje Python.

Los parámetros a optimizar son transporte de materia ( $k_m$ ) y/o el área específica en los electrodos ( $A_e$ ), buscando disminuir el factor de potencia de la celda.

Para futuras aplicaciones se puede tener en cuenta los análisis en no electrolitos, en los cuales se debe tener en cuenta, además de los factores anteriores, la toxicidad de la sustancia [80]

A escala de laboratorio la resistencia mecánica a la deformación no es un factor relevante por los pequeños volúmenes de trabajo, razón por la cual no se escogen materiales metálicos en la construcción de la celda, por tanto, se establece cuerpo de celda de un material polimérico aislante con resistencia a la corrosión, para evitar las fugas de corriente [81], por ser un material de baja constante dieléctrica.

Como el nivel de influencia de la temperatura en los factores de operación es bajo [73], en el dispositivo se opta por la medida de la temperatura con un aislamiento térmico para evitar las interferencias externas, garantizando la estabilidad térmica.

Se toma una geometría rectangular para la celda y electrodos laminares en disposición paralela para garantizar la homogeneidad y el control del flujo de corriente. El material de la celda es, o polímeros como el politetrafluoroetileno o vidrio Pyrex<sup>®</sup> con bajo contenido de boro, para disminuir las fugas de corriente al haber transmisión de corriente por la celda. El material de la celda poco conductor evita interferencias en los procesos de medida, con el flujo de corriente entre los electrodos de trabajo y el contador habrá una caída potencial a través del electrolito y no por la celda.

Se tendrán dos electrodos, y se propone la implementación de un sistema de tres electrodos para un estudio posterior.

Para futuras aplicaciones se puede tener en cuenta los análisis en no electrolitos, en los cuales se debe tener en cuenta, además de los factores anteriores, la toxicidad de las sustancias.

un análisis de Costo Inicial – Costo de Operación, los polímeros serían los apropiados para la celda y los metales como el cobre para los electrodos, serían los indicados por su por alta disponibilidad y bajo costo.

Se prefiere la arquitectura RISC Arduino DUE al permitir una mayor flexibilidad, asequible mantenimiento y la modularidad del proyecto, permitiendo la ampliación y mejoras sin incluir un rediseño total.

## CAPÍTULO 3. INSTRUMENTACIÓN

### 3.1 BLOQUE ELÉCTRICO

#### 3.1.1 Fuente de alimentación

Es indispensable el uso de una fuente de alimentación estable en cualquier sistema eléctrico, para no ocasionar detrimento en los aparatos o se incurra en imprecisión en el flujo de alimentación.

En la Figura 3-1 se da una clasificación de los tipos de fuentes de alimentación. Existen principalmente dos tipos de fuentes, lineales y conmutadas, según su uso y los requerimientos de cada proyecto se hace la selección del diseño a utilizar, las fuentes lineales generan bajo ruido de salida y se utilizan siempre con una reducción del voltaje de entrada, por tanto son menos eficientes que una fuente conmutada pero de mayor estabilidad.

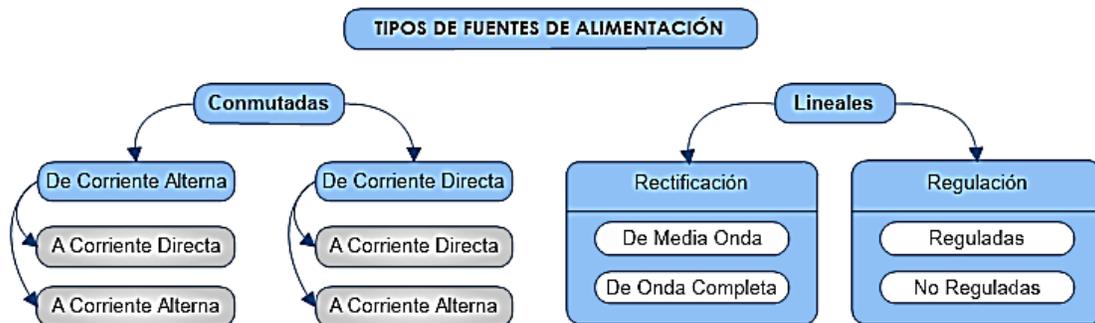


Figura 3-1. Tipos de Fuentes de alimentación.

Los dos tipos se componen de las siguientes etapas:

- Rectificación
- Filtrado
- Estabilización

Según su tipo son los componentes electrónicos a utilizar, así como sus características y requerimientos de rendimiento, una descripción de las ventajas y desventajas entre los tipos de fuentes de alimentación se da en la tabla 3-1.

La Tabla 3-1 nos permite escoger según las características requeridas la que se acople al proyecto. El diseño que se requiere para una celda electrolítica requiere de una fuente de alimentación al circuito que presente una variación muy pequeña en voltaje y corriente en tiempos cortos así como disminuir el ruido, dado que uno de los requerimientos para la experimentación es la precisión en el flujo de corriente que llegue a la celda, por tanto de la Tabla 3-1 el tipo de fuente preferible para

el trabajo en una celda electrolítica es una fuente lineal regulada, dado que permite variar y/o mantener la precisión en el voltaje y la corriente en el tiempo o a un tiempo determinado. Esto debido al efecto capacitivo que se presenta en la celda por deposición.

Tabla 3-1. Comparativa de los Tipos de Fuentes de Alimentación

		Ventajas	Desventajas
<b>CONMUTADAS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño pequeño.</li> <li>Bajo peso.</li> <li>Voltaje de entrada amplio.</li> <li>De fácil regulación.</li> <li>Alto rendimiento.</li> <li>Alimentación de CC.</li> <li>Versátiles en el voltaje de alimentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precio elevado.</li> <li>Circuitos complejos.</li> <li>Contaminación de red.</li> <li>Requiere supresión de interferencias por las altas frecuencias.</li> <li>Requiere filtro para el ruido eléctrico a la entrada.</li> </ul>
<b>LINEALES</b>	<b>Reguladas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Regulación a tiempos cortos.</u></li> <li><u>Bajo rizado residual.</u></li> <li>Circuitos sencillos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran tamaño.</li> <li>Bajo rendimiento.</li> <li>Gran tamaño.</li> <li>Ausencia de alimentación de CC.</li> </ul>
	<b>No Reguladas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto rendimiento.</li> <li>Durabilidad.</li> <li>Rentabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran tamaño.</li> <li>Alto rizado residual.</li> <li>Ausencia de alimentación de CC.</li> </ul>

Se puede decir que una fuente regulada es “la que puede mantener un voltaje estable en su salida, a pesar de las variaciones del voltaje en la entrada y la carga a la que es expuesta”[85].

### 3.1.2 Etapas para una fuente regulada

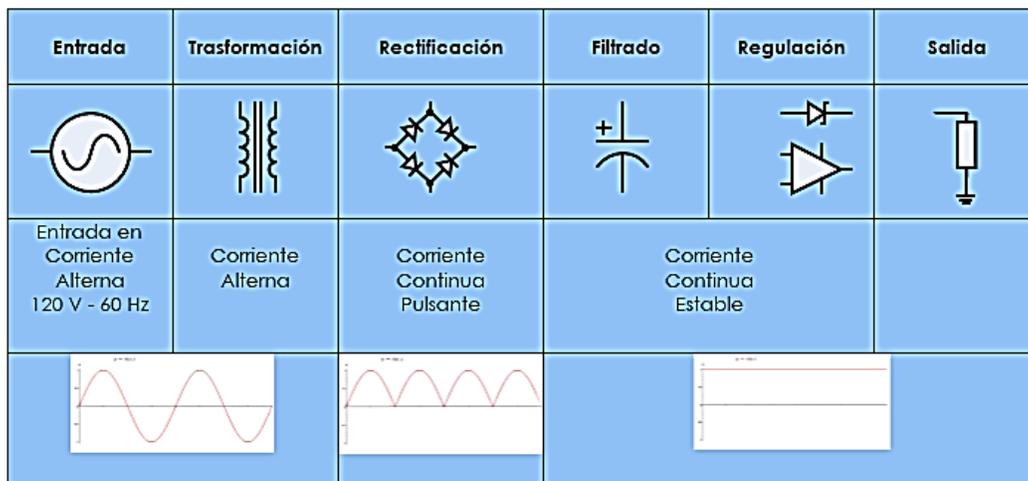


Figura 3-2. Etapas de una Fuente Lineal Regulada.

En las primeras tres etapas, Figura 3-2, se realiza la conversión de corriente alterna a corriente continua y en la última se establece una regulación, la cual consiste en una variación o escalado de la señal, pero ya continua y estable. La función del transformador es aumentar o disminuir el voltaje en corriente alterna manteniendo la potencia y ofrece aislamiento eléctrico. La segunda etapa es la rectificación, compuesta por diodos, que puede ser de media onda o de onda completa. Consiste en el proceso de convertir una señal alterna (CA) en otra que se restringe a una sola dirección (CD). En la rectificación de media onda se utiliza solo la parte positiva o negativa de una onda de corriente alterna y la rectificación de onda completa se utiliza para convertir una señal de corriente alterna de entrada a una señal de corriente pulsante de salida. En el segundo caso se tienen menos pérdidas, al utilizar la onda completa, por lo tanto, será la que se utilizará para el presente diseño.

En el filtrado, que consiste en uno o varios condensadores, se busca convertir la corriente continua pulsante en una corriente continua estable, pero que contiene un pequeño rizado, dependiente de las condiciones establecidas en el diseño como porcentaje o un valor definido o establecido del total de la señal. En la realidad en paralelo con el condensador existe una resistencia  $R_L$ , correspondiente al dispositivo que se desea alimentar, y para que el voltaje sea lo más uniforme posible es necesario que el producto de la resistencia por el capacitor sea grande (un condensador de alta capacidad).

A continuación, se establecen unos parámetros de diseño y se realizará los cálculos necesarios para garantizar estabilidad y resistencia a las diferentes contingencias, según las diferentes etapas.

### 3.1.3 Parámetros de diseño

Fuente regulada de 5 V y 3 A con una frecuencia de 60 Hz. Voltaje de rizado de 0,5 V.

$$\text{Potencia: } P = V_{Req} * I = (5V) * (3A) = 15W$$

### 3.1.4 Cálculos

### 3.1.5 Fuente de Alimentación no Estabilizada

#### 3.1.5.1 El transformador

Son instrumentos electrónicos capaces de disminuir o aumentar el voltaje en un circuito de corriente alterna, manteniendo la potencia y la frecuencia de la señal de entrada. En la Figura 3-3 se detalla su estructura y convenciones. Se basa en el principio de inducción electromagnética, lo cual otorga al circuito aislamiento y protección, consiste de dos embobinados de material conductor, aislados uno del otro, alrededor de un núcleo de un material ferromagnético. Se denominan primario (subíndice **p**) y secundario (subíndice **s**) a las bobinas de entrada y salida

respectivamente. La relación entre los embobinados y el voltaje y la corriente viene dada por la expresión:

$$a = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p}$$

Donde N: número de vueltas en la bobina

La relación  $N_s/N_p$  se conoce como relación de transformación.

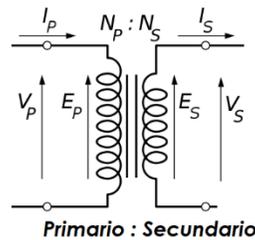


Figura 3-3. Estructura de un Transformador.

Para su diseño existe un desarrollo matemático e instrumental, el cual está fuera del alcance de esta investigación. Para el caso presente se utilizará un transformador para disminuir el voltaje, el cual ya viene diseñado con las siguientes especificaciones:

Tabla 3-2. condiciones de Entrada-Salida al Transformador.

Entrada:		Salida:	
<b>Voltaje</b>	127 V	<b>Voltaje</b>	12,7 V
<b>Potencia</b>	120 W	<b>Corriente</b>	5 A
<b>Corriente</b>	0,94 A	<b>Potencia</b>	60 W

Como los parámetros de salida del transformador se encuentran muy sobre los requerimientos de los parámetros de diseño, se considera como adecuado para el diseño.

Se busca evitar la saturación en la corriente necesaria (en tránsito en el circuito) para evitar discontinuidades en suministro de energía [86].

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se dan a conocer los tipos de voltajes que se obtienen en corriente saliente del transformador.

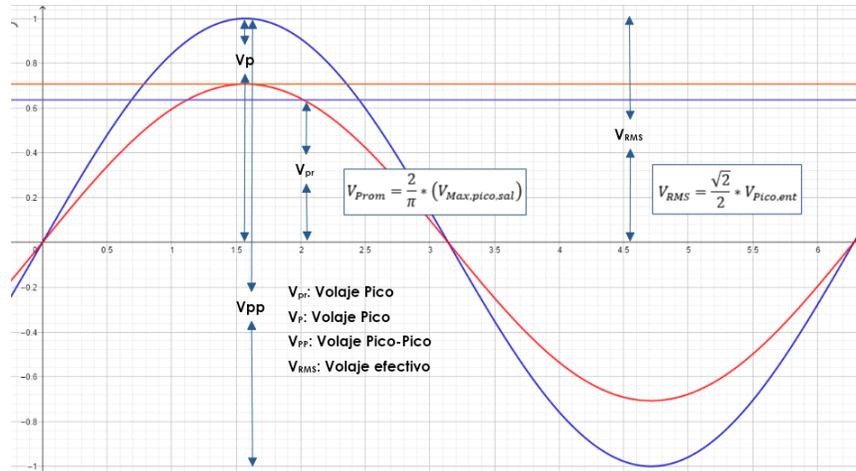


Figura 3-4. Voltaje en onda senoidal luego del transformador.

### 3.1.5.2 Rectificación (Puente de diodos)

En la rectificación de onda completa por cada ciclo de onda entrante se obtienen sus dos partes, la del semiciclo positivo y el semiciclo negativo, aumentando su eficiencia de conversión, Figura 3-5. Se realiza también una rectificación de onda completa para disminuir el rizado. Por cada diodo se consumen entre 0,7 a 1,0 V, pues en la rectificación en puente conducen siempre dos diodos, por lo tanto, la tensión de pico de la salida  $V_{Max,pico,sal}$  será dos (2) voltios menor al  $V_{Max,pico,ent}$ . Como el transformador ofrece 12 V ( $V_{Max,pico,ent}$ ), de salida con un puente de rectificación, el voltaje de salida de pico  $V_{max}$  será la siguiente:

$$V_{RMS} = \frac{\sqrt{2}}{2} * V_{Max,pico,ent} = 1,4142 * V_{Max,pico,ent}$$

$$V_{Max,pico,sal} = 12 * 1,4142 - 2 = 14,97 V \approx 15 V$$

El voltaje promedio que se obtiene a la salida del puente rectificador está dado por la ecuación:

$$V_{Prom} = \frac{2}{\pi} * (V_{Max,pico,sal}) = 0,635 * (14,97 V) = 9,51 V$$

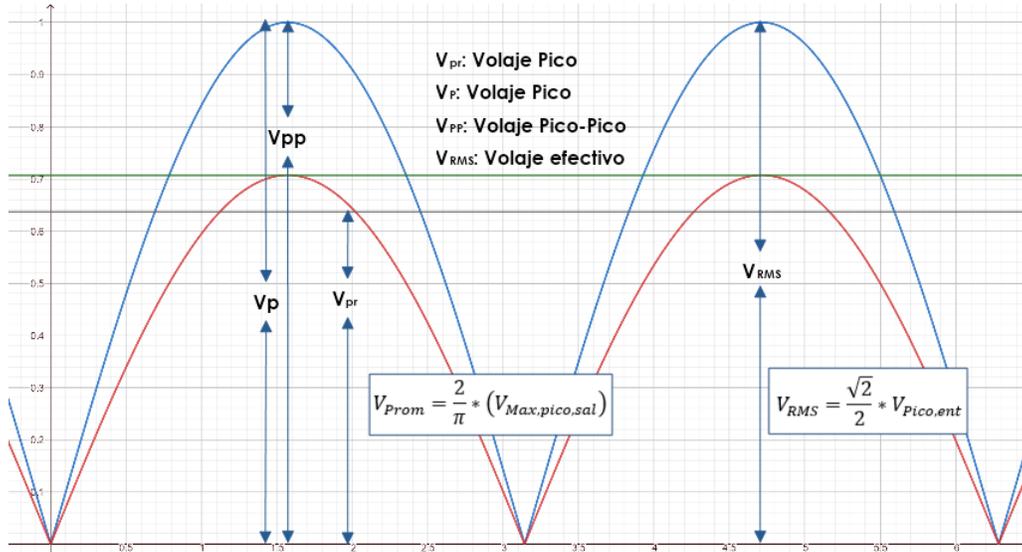


Figura 3-5. Voltaje en onda senoidal luego de la rectificación.

### 3.1.5.3 Filtrado por capacitor

Para la selección del capacitor es importante tener en cuenta que, a mayor capacitancia, mayor control del rizado, “la capacitancia del capacitor se selecciona suficientemente grande con respecto a la resistencia de la carga. Un voltaje más estable requiere un mayor valor de capacitancia” [87]. Una regla empírica que se suele aplicar es:

$$2000\mu F / A \text{ de salida}$$

$$V_{Opt} = 2 * V_{Req} + \text{Factor de seguridad}$$

Para el presente diseño de una fuente de 5 V a 3 A, el condensador electrolítico debe ser al menos de 6.000  $\mu F/35V$ .

Para reducir el calentamiento, daño y malfuncionamiento de los capacitores con altas capacidades, es conveniente dividir los condensadores de filtrado en la resistencia serie equivalente, por ejemplo, es mejor usar dos de 4.300  $\mu F$  que uno de 8.600  $\mu F$ . [88]

Un estudio más estricto se presenta a continuación: [89]

$V_{dc} = 0,636 * V_{Max}$	$V_{rp} = V_m - V_{dc}$
$V_r = \frac{I_{dc}}{4 * \sqrt{3} * f * C} = \frac{2,4 * I_{dc}}{C}$	$V_{rp-p} = 2 * V_{rp}$

$V_r = \frac{2,4 * V_{dc}}{R_L * C}$ $V_m = V_{dc} + \frac{4,171 * I_{dc}}{C}$	$C = \frac{2,4 * I_{dc}}{V_r}$ $r = \frac{V_r}{V_{dc}} * 100$
<p><b>C:</b> Capacidad necesaria en <math>\mu\text{F}</math>.</p> <p><b>I<sub>dc</sub>:</b> Intensidad que consume la carga en mA.</p> <p><b>R<sub>L</sub>:</b> Resistencia de la carga en <math>k\Omega</math>.</p> <p><b>f:</b> Frecuencia de alimentación en Hertz. (60 Hz para México).</p> <p><b>V<sub>dc</sub>:</b> Voltaje DC de salida en V.</p> <p><b>V<sub>r</sub>:</b> Voltaje de rizado admisible a la salida del filtrado en V.</p> <p><b>V<sub>rp</sub>:</b> Voltaje de pico en V.</p> <p><b>V<sub>rp-p</sub>:</b> Voltaje de rizado pico a pico en V.</p> <p><b>V<sub>m</sub>:</b> Voltaje medio en V.</p> <p><b>r:</b> Porcentaje de rizo.</p> <p>Como se desea un valor de rizado mínimo se establece el valor del voltaje de rizado de 0,1 V, por lo que el valor del capacitor sería de:</p> $C = \frac{2,4 * 3000}{0,1} = 72000\mu\text{F}$ <p>Teniendo en cuenta las recomendaciones de García [88], se pueden utilizar dos condensadores de 36000 <math>\mu\text{F}</math>.</p>	<p>En la celda no se llegan a utilizar los 5A en corriente, por tanto, se toma como parámetro de diseño un capacitor de 3300<math>\mu\text{F}</math>, para cual le corresponde un voltaje de rizado de:</p> $V_r = \frac{2,4 * I_{dc}}{C} = \frac{2,4 * 3000}{3300} = 2,2\text{V}$ <p>La resistencia de carga correspondiente sería:</p> $R_L = \frac{2,4 * V_{dc}}{V_r * C} = \frac{2,4 * 5}{2,2 * 3300} = 0,00165k\Omega = 1,65\Omega$ <p>y con</p> $r = \frac{V_r}{V_{dc}} * 100 = \frac{2,2}{5} * 100 = 44\%$ $V_m = 5 + \frac{4,171 * 3000}{3300} = 8,79\text{V}$ $V_{rp} = 8,79 - 5 = 3,79\text{V}$ $V_{rp-p} = 2 * 3,79\text{V}$

Estos cálculos son los requeridos para una fuente no estabilizada y sirve como alimentación a las pruebas, para el proyecto se toma una fuente estabilizada, para garantizar la estabilidad del proceso.

### 3.1.6 Regulado y Estabilización

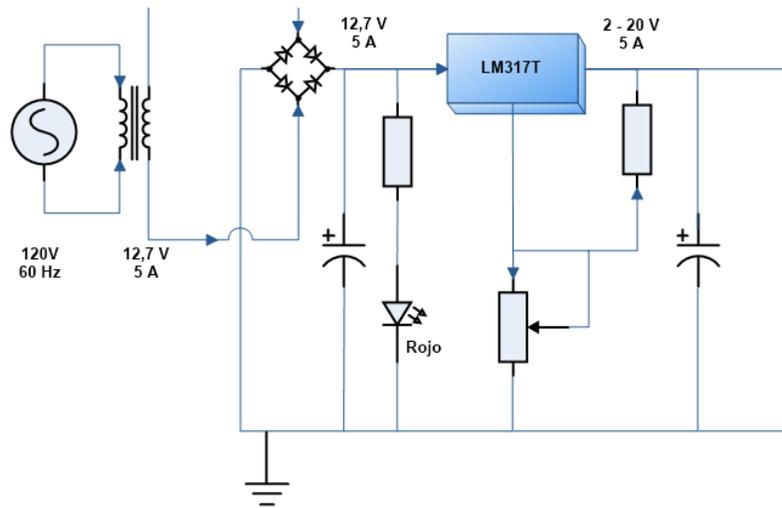


Figura 3-6. Esquema de Fuente regulable estabilizada

Según Boylestad y Nashelsky [90], [91] se puede realizar la regulación de voltaje con transistores discretos o con reguladores de circuito integrado (CI), Figura 3-6. Los circuitos integrados poseen la ventaja que incorporan amplificador, comparador y los dispositivos de control y de protección contra sobrecarga, se basan en la estabilidad de tensión que proporciona el diodo Zener y la amplificación que proporcionan los transistores con funcionamiento igual, además de su simplicidad, poseen baja impedancia de salida y alta impedancia de entrada, mejorando su respuesta.

Los CI permiten regular voltajes positivos, negativos o de forma variable. El proyecto requiere, acorde a la Tabla 1-3, un voltaje variable positivo en diferentes tipos de señal, según el tipo de ensayo que se requiera realizar.

Basado en estos criterios y la bibliografía [90]–[95], se realizó un diseño en el software Multisim© [96]–[99] de una fuente lineal estabilizada y regulable para una salida de 2 – 18 V y 5 A, el cual se presenta en el DISEÑOS DE FUENTES, donde se detallan las placas PBC de los diseños.

El proceso electrolítico genera intrínsecamente una variación en la carga, por deposición de material en los electrodos, por lo que se requiere una estabilización del voltaje suministrado, utilizándose diversos dispositivos para ello, como potenciómetros, galvanostatos, que dan una alimentación constante en voltaje y corriente respectivamente. Otra alternativa es la “dummy load”.

Una carga activa, ficticia o “dummy load” es un dispositivo que se utiliza para simular una carga eléctrica, generalmente con fines de prueba y se utiliza como sustituto de una resistencia de carga óhmica convencional, tal como la que se presenta en una celda electrolítica. Una carga electrónica es un dispositivo o conjunto que simula la carga en un circuito electrónico.

Como contraparte de una fuente de corriente, una carga electrónica es un sumidero de corriente. Cuando se carga una fuente de corriente con una resistencia fija, se puede establecer una determinada corriente de carga mediante la resistencia de carga conectada.

La carga electrónica permite configurar la corriente de carga pudiéndose variar en un rango definido. La corriente de carga se puede regular electrónicamente.

Las cargas electrónicas más desarrolladas suministran varios modos de funcionamiento, en la mayoría de los casos corriente, voltaje, potencia y resistencia constantes.

La utilidad de las dummy load permite establecer una carga de alimentación constante a la celda, pudiéndose incluir en la fuente de alimentación a la celda. El circuito de una carga activa se presenta en la Figura 3-7 y consta de un amplificador operación conectado a un mosfet y una resistencia, el operacional busca mantener la relación entre voltaje a la entrada en el pin positivo y la corriente que circula entre el mosfet y la resistencia. La relación viene dada por el valor de la resistencia R1, dado que R1 tiene un valor de  $1\Omega$ , por cada voltio que entre al pin positivo circula 1A por el mosfet y la resistencia R1. Para variar la corriente a la salida se conecta un potenciómetro al pin positivo de entrada del amplificador en paralelo con diodo Zener el cual especifica la corriente máxima que se puede obtener a la salida de la carga activa.

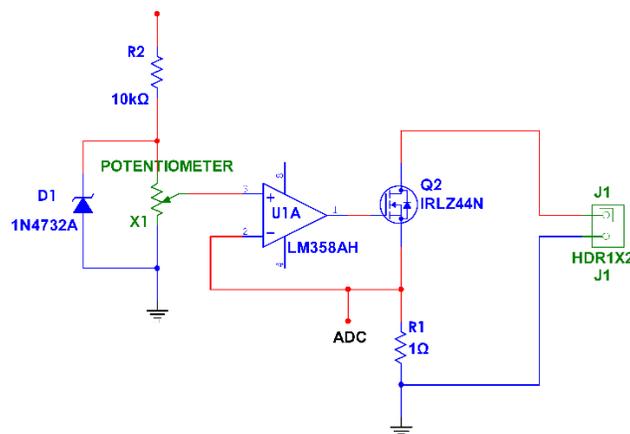


Figura 3-7. Circuito de la carga activa (Dummy Load)

Acorde a lo expuesto por Lefrou [52] existen varias configuraciones que nos permiten alimentar a una celda con estabilidad durante el proceso, tal como se muestra en la Figura 3-8.

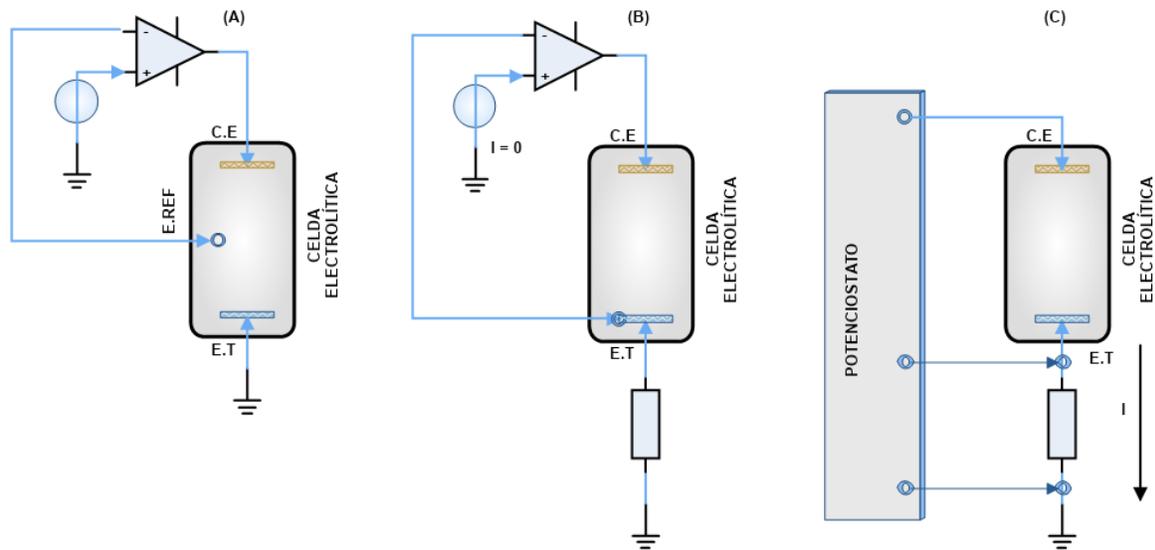


Figura 3-8. Diagrama de una celda electrolítica. (A) Potenciostato. (B) Galvanostato. (C) Uso de un Potenciostato como Galvanostato.

Según Lefrou [52], con la última configuración solo es requerido una fuente estabilizada con la capacidad de alimentación según el tipo de análisis (Tabla 1-3), voltaje constante, corriente constante, onda triangular, etc.

### 3.1.7 Fuentes de alimentación con módulos Arduino

Existen aplicaciones con módulos Arduino de fuentes de alimentación [100]–[102]. Son proyectos electrónicos que buscan incorporar el módulo Arduino para permitir el control y la operatividad computacional al permitir su programación y modularidad.

Un proyecto [103] incorporó una carga activa dentro del diseño de una fuente de alimentación regulable y controlada en voltaje y corriente, con los respectivos ajustes en potencia además de permitir una alimentación a la celda en señal de onda triangular y cuadrada, siendo homogénea con los criterios del proyecto. En el DISEÑOS DE FUENTES se dan las características del diseño.

Se requiere que la fuente garantice una corriente constante debido a la polarización del electrodo de trabajo, lo que genera un cambio en la corriente que pasa a través de él, para ello el circuito de la carga activa nos permite seleccionar cuánta corriente se suministra por la fuente de voltaje.

## 3.2 BLOQUE DE MEDICIÓN

Para la medición de la corriente que proviene del electrodo de trabajo la forma práctica, con resultados confiables y ampliamente utilizada es la de un amplificador operacional en modo conversor I/V [104]–[110].

### 3.2.1 El Amplificador Operacional Ideal (OPAM)

El amplificador operacional está compuesto de una salida y dos líneas de entrada, que dan como resultado una pequeña diferencia de voltaje en la entrada E- y E +, Figura 3-9, que hará que la salida Eo alcance el límite que puede proporcionar la fuente de alimentación simétrica del dispositivo. Por tanto, si la tensión de salida proporcionada por la operación está dentro de los límites de la fuente de alimentación del dispositivo los dos terminales de entrada estarán al mismo potencial.

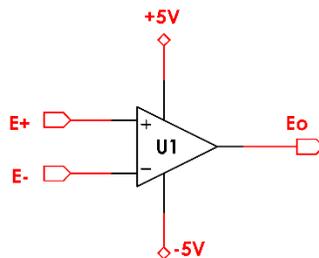


Figura 3-9. Esquema de un Amplificador Operacional (OPAM)

La alimentación de un OPAM es simétrica en valores de +15V y -15V a +5V y -5V generalmente respecto a un terminal común y algunos aún en valores menores.

El amplificador operacional ideal posee varias propiedades.

- La ganancia en lazo abierto  $A$  es infinita. Esto da como resultado que una pequeña diferencia de voltaje entre las entradas hace que la salida  $E_o$  alcance el límite que puede proporcionar la fuente de alimentación simétrica del dispositivo. Por tanto, si el voltaje de salida proporcionado por la operación está dentro del límite de potencia del dispositivo, entonces, en este caso, los dos terminales de entrada estarán al mismo potencial.
- La impedancia de entrada infinita, lo que les permite aceptar tensiones de entrada absorbiendo una cantidad mínima de corriente de la fuente de voltaje, permitiendo medir voltajes sin modificarlos. También, un OPAM ideal puede proporcionar la cantidad de corriente deseada a su carga, idealmente tiene impedancia de salida nula.
- Ancho de banda infinito, lo que le permite responder totalmente a una señal a cualquier frecuencia.

Para la elección de los componentes de los componentes [110] del dispositivo se tendrá en cuenta los criterios de baja corriente de bias a la entrada, alto CMRR y alta impedancia de entrada

escogiendo el OPAM . Se toma una resistencia de película metálica para tener una buena precisión en la medida de la corriente [105].

El diagrama del instrumento para la adquisición de señal que está conectado al electrodo de trabajo se presenta en la Figura 3-10.

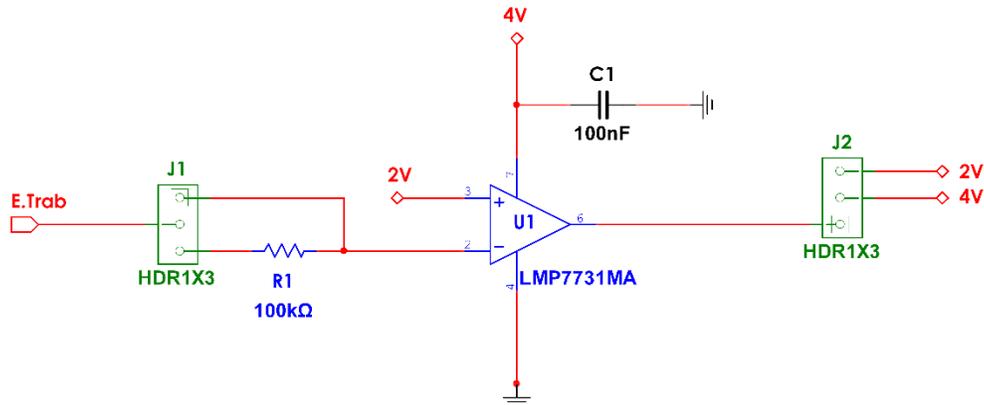


Figura 3-10. Diagrama del Instrumento de Adquisición de señal del Electrodo de Trabajo

Se incluye una conexión por medio de un pin para el electrodo de trabajo al OPAM de forma directa o con una resistencia acorde a lo recomendado por [52], [110]–[112] y se dejan como opción para el trabajo dentro de la operación y la verificación de la configuración óptima, dado que se encuentran dentro de las configuraciones recomendadas. También se añadió un capacitor a la entrada de la alimentación para alcanzar la estabilidad del dispositivo.

El OPAM también opera en varias configuraciones con retroalimentación para controlar su ganancia (G) y por tanto el voltaje de salida del OPAM estará dando por:

$$V_o = I * R * G$$

Este es el valor de señal a representar en la interfaz de cómputo.

### 3.2.2 COMUNICACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS

Los módulos de los bloques Eléctrico y De Medición se enlazan por medio de una interfaz I2C (Inter-Circuitos Integrados) que utiliza dos líneas para la transmisión la información: una para datos (SDA) y otra para señal de reloj (SCL) y una tercera línea sólo como referencia (masa).

### 3.3 BLOQUE TÉRMICO

#### 3.3.1 Control de la Temperatura

Como se expuso en la sección 2.3.3 y acorde a la bibliografía [72]–[75] a escala de laboratorio el proceso electrolítico es estable térmicamente y depende mayormente de las sustancias a analizar y su concentración pudiendo generar complejos estructurales dentro de la solución, pero no genera grandes cambios de temperatura. Para una variación de 40°C se puede tener una variación en el potencial de celda con la temperatura de 0,006 V [73], demostrando su estabilidad, dado que en el presente proyecto se busca generar un modelo inicial se hará un registro de la temperatura de la celda, a través de un sensor de temperatura. Las sustancias con alta dependencia conformacional y estructural de la temperatura [74], [75] han permitido aplicaciones en las ciencias biológicas, más no son las que se utilizarán en este estudio.

Para evitar la interacción directa con el medio y sus posibles alteraciones se hará un aislamiento térmico por medio de poliestireno expandido (EPS) que posee una baja conductividad térmica ( $\lambda$ ) y estable químicamente [113], lo que lo hace adecuado previendo accidentes o derrames involuntarios.

En trabajo posterior se puede incluir el control de la temperatura por medio de un baño inmersivo de la celda en un líquido de alta conductividad térmica, para garantizar una temperatura constante durante el proceso.

#### 3.3.2 Sensor de Temperatura

El registro de la temperatura se hará por medio del sensor TMP75, que ofrece buenas características de sensibilidad y resolución, acordes a los niveles de variación dentro de la celda. Las principales características se resumen en la Tabla 3-3:

Tabla 3-3. Parámetros del sensor TMP75

<b>Precisión del sensor local (Máx) (+/- C)</b>	1,5
<b>Tipo</b>	Local
<b>Rango de temperatura de funcionamiento (C)</b>	-40 a 125
<b>Tensión de alimentación (Mín) (V) 2.7</b>	
<b>Tipo de interfaz</b>	I2C, SMBus, 2 Cables
<b>Tensión de alimentación (Máx) (V)</b>	5.5
<b>Corriente de alimentación (Máx) (uA)</b>	85

<b>Resolución de temperatura (Máx) (bits)</b>	12
<b>Características</b>	ALERT, NIST trazable

Los sensores TMP75, Figura 3-11, se pueden utilizar en reemplazo de termistores de coeficiente de temperatura negativo (NTC) y positivo (PTC). Poseen una precisión de  $\pm 1$  °C sin necesidad de calibración o acondicionamiento de señal de componentes externos y son lineales en un amplio rango de temperatura, posee un convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits en el chip que permite resoluciones de hasta 0,0625 °C. bajo los estándares LM75 SOIC-8 y la huella MSOP-8.

Son compatibles con interfaces SMBus, de dos cables e I2C y permite hasta ocho dispositivos en un solo bus y una función de alerta SMBus, operando en un rango de temperatura de -40 °C a +125 °C.

Al ser un sensor analógico facilita la comunicación con la placa de Arduino que es el módulo central de intercomunicación de la celda, al permitir su conexión directa.



Figura 3-11. Sensor TMP75

Su ubicación es en la base, en el centro de la celda, para evitar las variaciones espaciales y por la configuración rectangular de la celda.

### 3.3.3 Agitador

Acorde a las condiciones teóricas anteriormente expuestas se incluye la agitación para mejorar la transferencia de carga y másica, así como también generar homogeneidad en el electrolito.

El agitador es de PTFE [70], el cual garantiza la estabilidad química, evitando la contaminación directa o cruzada por arrastre, ubicado en el centro desde la parte superior, de diámetro 4 mm y paletas verticales ya que lo que se desea promover es el desplazamiento paralelo entre los electrodos, el cual se puede utilizar para velocidades medias y altas, y puede operar en temperaturas de -200 °C a 200°C.

El control de la velocidad de agitación se hará por medio de un motor DC, acoplado con un potenciómetro.

### 3.4 RESUMEN

Se incluyó dentro del proyecto una fuente que incluye una carga activa y que permite una señal en forma de onda cuadrada o triangular [103], acorde a las necesidades dadas en la Tabla 1-3, permitiendo que a futuro se puedan implementar otro tipo de técnicas.

Este tipo de fuentes de alimentación se presentan como alternativa a otras alternativas utilizadas para el trabajo con celdas electrolíticas, teniendo en cuenta que es factible por medio de este tipo de fuentes trabajar con dos o tres electrodos, donde el tercer electrodo servirá para comprobar el flujo eléctrico que alimenta a la celda.

Se puede implementar para el control de la temperatura una celda inmersa en un líquido circulante de alta conductividad térmica, para garantizar una temperatura constante durante el proceso.

Los materiales de las celdas se escogieron adaptando las técnicas actuales de medición a las condiciones descritas dentro del diseño.

El material de los electrodos se escoge previendo que sea un elemento consumible y descartable, para evitar la contaminación cruzada dado que existe una reacción entre los electrodos y el material presente en el electrolito, afectando su composición, estructura y sus propiedades eléctricas por lo cual no es viable su reutilización.

El material de la celda y el agitador garantizan inocuidad y alta estabilidad térmica y química, así como su casi nula conductividad para evitar el flujo lateral de la corriente, aspecto importante cuando se desea realizar un análisis cuantitativo.

El instrumento de medición es acorde a lo expuesto en la bibliografía y es susceptible de mejorarse y admite el acople con módulos posteriores que puedan mejorar la adquisición de la señal proveniente del electrodo de trabajo.

Se incluye la agitación en el electrolito para lograr la homogeneidad en la transferencia eléctrica de carga y así simplificar el modelo de análisis.

## CAPÍTULO 4. SISTEMATIZACIÓN Y CONTROL

En concordancia con los parámetros de diseño, para el bloque de Sistematización y Control se analizaron varias de las opciones disponibles, entre ellas Matlab, LabView y Python. Se busca que el entorno gráfico sea compatible y se ajuste a la placa Arduino, que es el centro de adquisición de los datos.

Los criterios más relevantes que se tuvieron en cuenta se resumen en la Tabla 4-1, siendo fácilmente deducible que el lenguaje Python es la más acorde a las necesidades del proyecto, por su flexibilidad en el manejo del software, el amplio soporte basada en la amplia comunidad de desarrollo y al ser software libre permite su ampliación y el trabajo futuro sin que con ello se genere una obsolescencia no programada debido a la vigencia limitada de las licencias de los software propietario, este último aspecto es muy relevante dado que haría que los diseños sean inoperantes o que requerirán una gran inversión económica y en programación al momento de actualizarse. Los criterios se establecieron en una comparación interna entre ellos.

Tabla 4-1. Comparativa entre los Software para Manipulación de Datos

	Python	Matlab	LabView
Curva de aprendizaje	Corta	Media	Alta
Facilidad de programación	Muy fácil	Medio	Medio
Comunidad de programación y Soporte	Muy Grande	Grande	Grande
Complejidad	Menor	Mayor	Mayor
Tipo de software	Libre	Propietario	Propietario
Paquetes disponibles para el Análisis de Datos	Si	Si	Si
Interfaz Gráfica (GUI)	Si	Si	Si
Escalabilidad	Mayor	Media	Media
Velocidad de Procesamiento de Datos	Alta	Media	Media

### 4.1 Interfaz Arduino – Python

El software es una plataforma ideal para desarrollos de bajo costo, posee una interfaz GUI completa y ofrece accesibilidad de hardware, aunque requiere la verificación de las bibliotecas, ya que existe una comunidad de desarrollo y soporte, una vez se realiza la verificación se logra la estabilidad y escalabilidad del software.

En el presente proyecto se utiliza la interfaz Arduino – Python [114], que utiliza la librería Matplotlib de Python para monitorear múltiples sensores utilizando Arduino.



Tabla 4-3. Código Python de la Interfaz

```

import serial
import time
import collections
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.animation as animation
from matplotlib.lines import Line2D
import numpy as np

def getSerialData(self, Samples, numData, serialConnection, lines):
    for i in range(numData):
        value = float(serialConnection.readline().strip()) #Leer sensor / Read
        sensor
        data[i].append(value) #Guarda lectura en la última posición / #Save
        reading in the end position
        lines[i].set_data(range(Samples), data[i]) # Dibujar nueva línea / Drawn
        new line

serialPort = 'COM19' # Puerto serial arduino / Arduino serial port
baudRate = 9600 # Baudios

try:
    serialConnection = serial.Serial(serialPort, baudRate) # Instanciar objeto
    Serial / Instance Serial Object
except:
    print('Cannot conect to the port')

Samples = 50 #Muestras / Samples
sampleTime = 150 #Tiempo de muestreo / Sample Time
numData = 4

# Limites de los ejes / Axis limit
xmin = 0
xmax = Samples
ymin = [0, 0, -50, 0]
ymax = [6, 6, 50, 100]
lines = []
data = []

for i in range(numData):
    data.append(collections.deque([0] * Samples, maxlen=Samples))
    lines.append(Line2D([], [], color='blue'))

fig = plt.figure() # Crea una nueva figura #Create a new figure.
ax1 = fig.add_subplot(2, 2, 1, xlim=(xmin, xmax), ylim=(ymin[0], ymax[0]))
ax1.title.set_text('First Plot')
ax1.set_xlabel("Samples")
ax1.set_ylabel("Volts")
ax1.add_line(lines[0])

ax2 = fig.add_subplot(2, 2, 2, xlim=(xmin, xmax), ylim=(ymin[1], ymax[1]))
ax2.title.set_text('Second Plot')
ax2.set_xlabel("Samples")
ax2.set_ylabel("Volts")
ax2.add_line(lines[1])

ax3 = fig.add_subplot(2, 2, 3, xlim=(xmin, xmax), ylim=(ymin[2], ymax[2]))
#ax3.title.set_text('Third Plot')
ax3.set_xlabel("Samples")

```

```

ax3.set_ylabel("Temperature")
ax3.add_line(lines[2])

ax4 = fig.add_subplot(2, 2, 4,xlim=(xmin, xmax), ylim=(ymin[3] , ymax[3]))
#ax4.title.set_text('Fourth Plot')
ax4.set_xlabel("Samples")
ax4.set_ylabel("Humidity")
ax4.add_line(lines[3])

anim = animation.FuncAnimation(fig,getSerialData,
fargs=(Samples,numData,serialConnection,lines), interval=sampleTime)
plt.show()

serialConnection.close() # cerrar puerto serial/ close serial port

```

Estas dos cadenas nos generan un gráfico de las variables que se muestrean conectados a los pines de conexión de los sensores a graficar, en este caso 2, que están definidas en la cadena de código Arduino como A0 y A1, que en nuestro caso son Voltaje obtenido del Electrodo de Trabajo y Temperatura a la cual se lleva el proceso electrolítico, obtenido del sensor TMP75. Un esquema se muestra en la Figura 4-1.

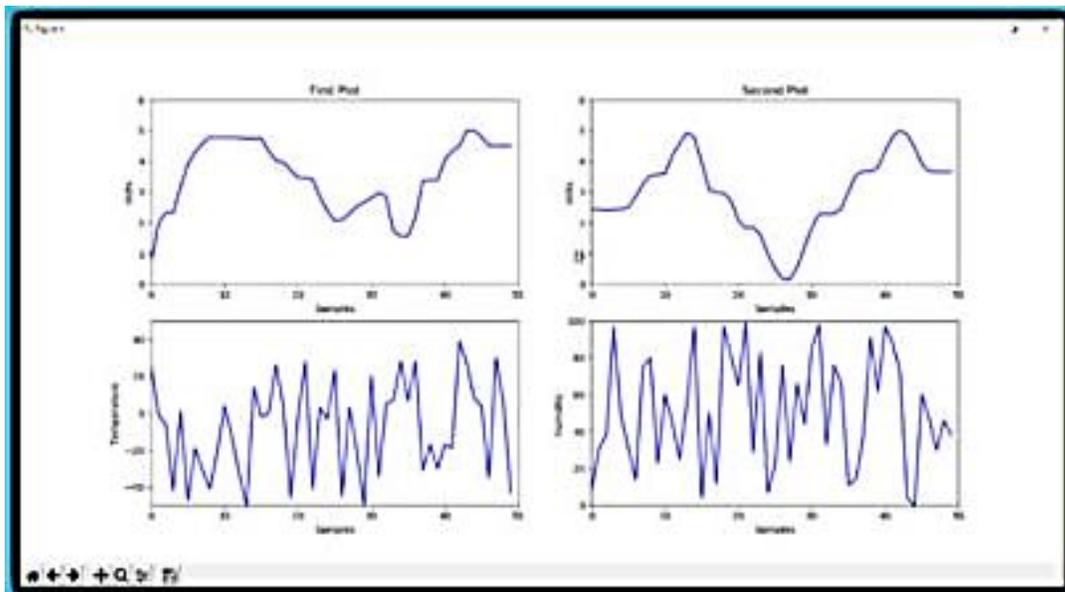


Figura 4-1. Esquema de la interfaz Gráfica Arduino-Python

## 4.2 RESUMEN

La interfaz permite la conexión de múltiples sensores, además al ser de código abierto es permite la inclusión de nuevas funcionalidades, así como la articulación de otras características como el control de flujo para el fluido de control de la temperatura en futuras aplicaciones. La sensibilidad del muestreo está acorde a los niveles de control deseados.

Entornos de manejo como LabView y Matlab son muy asequibles y permiten un control grafico adecuado, el mayor impedimento para la incorporación dentro de este estudio es el ser un software propietario con un alto costo de adquisición de licencias y de vigencia limitada, esto generan una obsolescencia no deseada del proyecto.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 5.1 RESULTADOS

El diseño se realizó teniendo en cuenta la visión de las Normas ISO 55000 y 50001: Etapas en la Gestión de un Activo de la Vida de un Equipo y la energía, buscado la estabilidad en el tiempo, durabilidad, modularidad para que sea fácilmente acoplable a futuras mejoras o estudios.

Es importante hacer hincapié en este enfoque, pues al tener estándares certificados, garantizan mayor estabilidad y genera mayores ventajas en el diseño. Otros enfoques satisfacen las necesidades del usuario, pero tienen menor estabilidad en el tiempo. La estructura de la celda basada en este enfoque simplifica el análisis, mejorando el rendimiento del instrumento.

La geometría de la celda da estabilidad al proceso electrolítico, que aunado a la homogeneidad que se obtiene al añadir el agitador da como resultado un análisis más fiable. También se logra simplicidad en el análisis matemático facilitando estudios de simulación posteriores del sistema. El flujo eléctrico en paralelo es más deseable pues también da menor consumo de potencia y por tanto mejor estabilidad.

El diseño está orientado a ser un instrumental de bajo costo, acorde a la tendencia de las investigaciones actuales, que tienden a incorporar los dispositivos RISC, como las placas Arduino por su baja inversión inicial, el bajo costo y alta disponibilidad de los módulos para ampliar su funcionalidad.

Lo mismo se obtuvo al establecer los materiales del sistema de análisis, teniendo en cuenta el criterio de las Normas ISO 55000 y 50001, pues se tomaron los electrodos como consumibles descartables y la celda y el agitador de un material con alta estabilidad térmica, química y de baja conductividad para evitar la presencia de corrientes paralelas entre los electrodos.

Los sistemas electrónicos utilizados siguen estos mismos criterios y son módulos que se pueden acoplar con otros que mejoren su funcionalidad. Se escogieron los componentes buscando que sean asequibles por si fuera necesario un mantenimiento y que cumplan el parámetro de precisión necesario dentro de los análisis cuantitativos.

Para obtener el diseño se pasaron varias etapas de análisis y diseño, revisando las alternativas disponibles en la bibliografía y se logró acoplar el concepto de tener una fuente no solo estable y regulable, sino que también sea lo suficientemente flexible que permita adecuación modular a

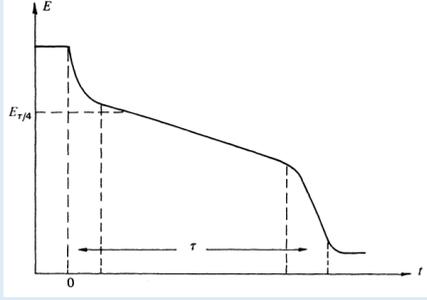
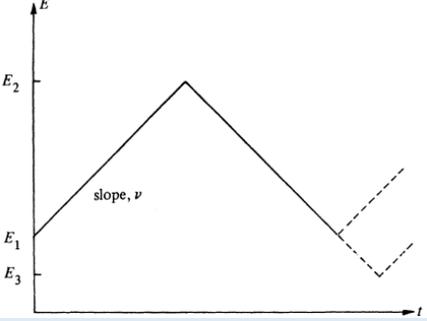
futuros estudios, para ello se incorporó una placa Arduino y el circuito de una carga activa, logrando así satisfacer los objetivos del estudio.

El sistema consta de dos módulos con un sistema de agitación y una fuente de alimentación anexas:

- Una fuente regulada y estabilizada, que permite una alimentación constante a la celda en voltaje y corriente, así como también con señales en forma de onda cuadrada o triangular, que es deseable para otros tipos de análisis. La fuente incorpora el circuito de una carga activa para lograr este objetivo.
- Una fuente regulada anexa, para la alimentación de los sistemas que lo requieran basada en el CI LM317T que nos otorga un voltaje de salida de 1,5 – 15 V.
- Un módulo de adquisición de señal con dos medios de comunicación con el electrodo de trabajo por medio de un pin, compuesto por un OPAM y una comunicación en paralelo hacia el electrodo. El OPAM se opera en modo convertor I/V.

Tabla 5-1. Algunos Tipos de Análisis más comunes, Tipos de fuente de Alimentación y Tipo de señal de excitación

Tipo de análisis	Tipo de Fuente de Alimentación	Tipo de señal
<b>Técnicas de paso de potencial y estado estacionario</b>		
<b>Cronocoulombimetría</b>	DC	
<b>Cronoamperometría</b>	DC	
<b>Voltimetría de pulso (Utiliza un electrodo de Gota de Mercurio)</b>	AC	

Cronopotenciometría	AC	
<b>Técnicas de barrido y voltamperometría cíclica</b>		
Voltamperometría de barrido	de AC	

De la Tabla 5-1 se puede extraer que existen diferentes tipos de señal que permiten realizar diferentes tipos de análisis, por tanto, es importante el criterio de modularidad dentro del diseño de un instrumento de análisis para electroquímica. Con la fuente lineal estabilizada se puede realizar la coulombimetría, y con la fuente con circuito de carga activa se podrían realizar otros tipos de análisis como aquellos que requieren señales de excitación en forma de onda cuadrada o triangular.

## 5.2 DISEÑOS DE FUENTES

### 5.2.1 FUENTE LINEAL ESTABILIZADA UTILIZANDO LM317T

Esta fuente también sirve para realizar este tipo de análisis y puede ser utilizada para comparar la variación del flujo de alimentación con el tiempo. El proceso de elaboración se muestra en las Figuras 5-1 y 5-2, pasando por el diseño y comprobación en el software Multisim (Figuras 5-3) y luego el diseño en placa PCB.

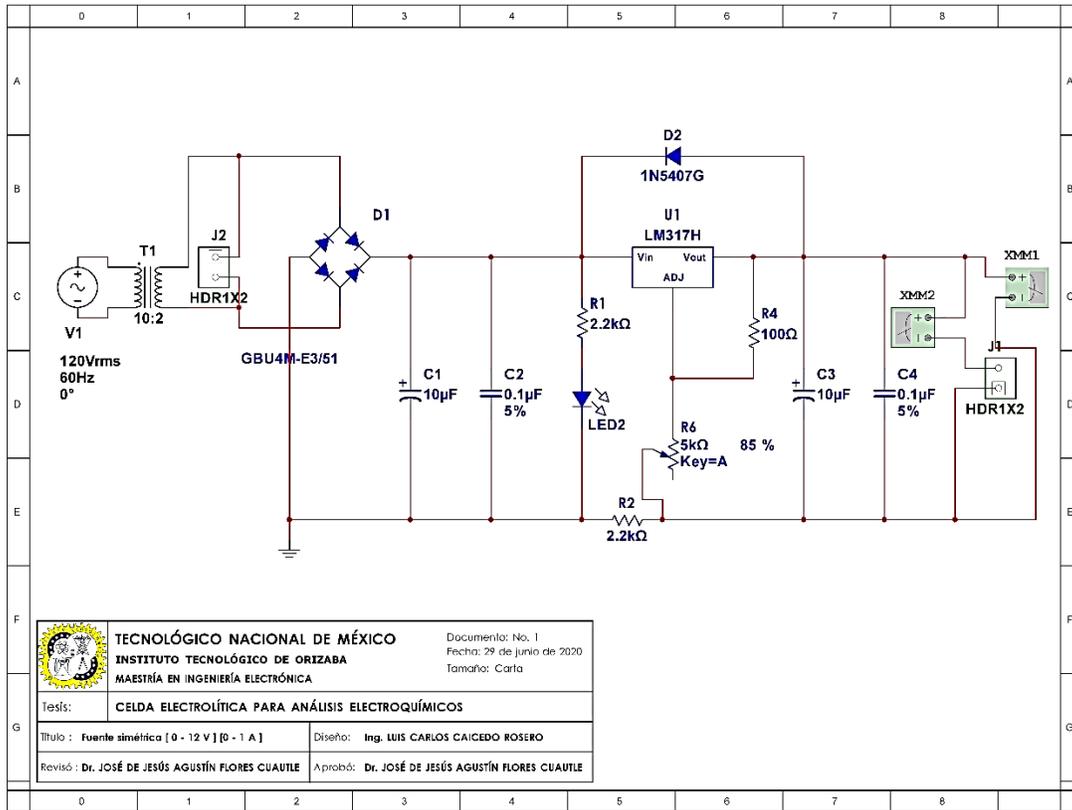


Figura 5-1. Diseño de Fuente Estabilizada con CI LM317T en Multisim

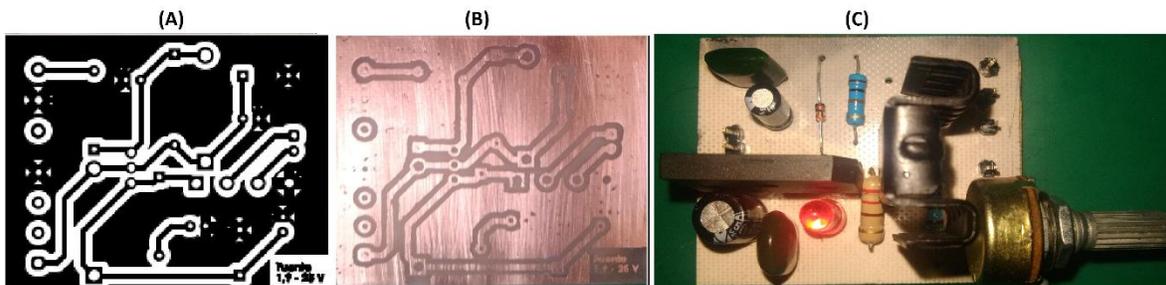


Figura 5-2. Proceso de Elaboración de la Fuente Estabilizada con CI.  
 (A) Circuito impreso (B) Placa PCB. (C) Fuente armada con los componentes

### 5.2.2 FUENTE CON CIRCUITO DE CARGA ACTIVA (DUMMY LOAD)

El sistema diseñado dado la presencia de la fuente de alimentación que incorpora el circuito de la carga activa, permite que luego de una calibración se puedan realizar otros tipos de análisis, esta es la ventaja de su diseño modular, dado que se cuenta con la asequibilidad de la placa Arduino.

Las conexiones entre los componentes y el proceso de elaboración de la fuente se presentan en las Figura 5-3 y 5-4.

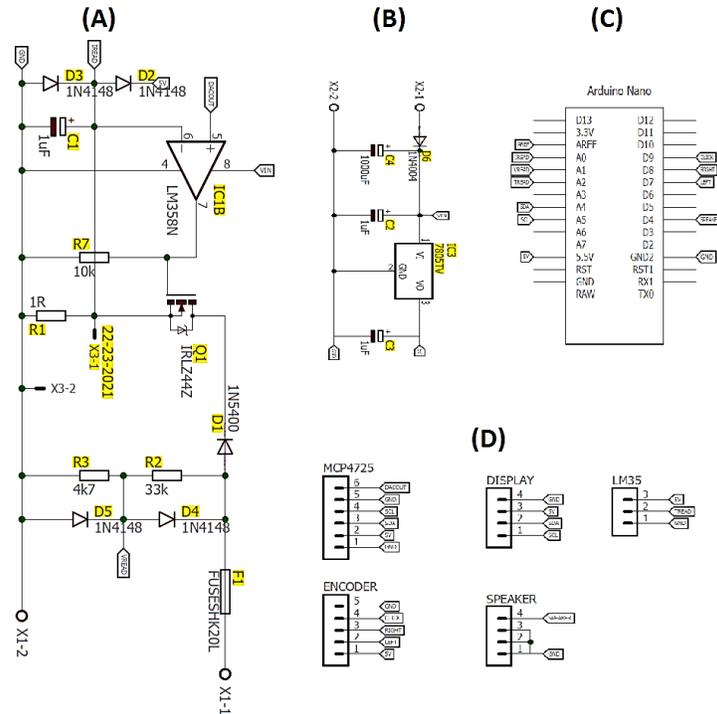


Figura 5-3. Circuito y Componentes de la Fuente con Carga Activa.

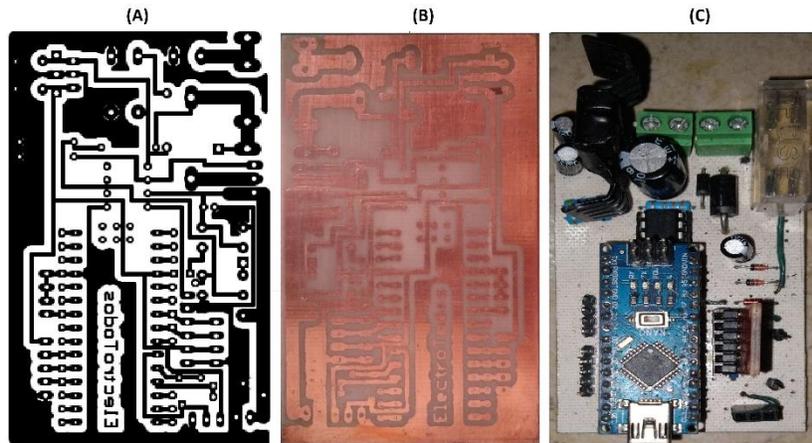


Figura 5-4. Proceso de Elaboración de la Fuente de Alimentación con Carga Activa.  
(A) Circuito impreso (B) Placa PCB. (C) Fuente armada con los componentes.

### 5.3 CONCLUSIONES

El objetivo del proyecto era lograr un prototipo que permita el análisis de procesos electroquímicos, para ello se establecieron unos criterios de diseño, los cuales no se encontraron presentes en la bibliografía, dado que la ingeniería electroquímica se orienta principalmente al análisis y diseño de

celdas a escala industrial, por tanto, se establecieron un orden y criterios propios, Tipo de Análisis, Geometría, Operatividad y Costos, acordes a la visión de las Normas ISO 55000 y 50001 que nos garantiza una mayor vida útil, confiabilidad y estabilidad del diseño.

Para la sistematización y control del sistema se tomó una interfaz Arduino – Python que nos representa los datos de Voltaje y Temperatura en la celda por medio de la librería Matplotlib. Al ser todo el sistema de software libre y sin derechos comerciales, permite su escalabilidad y mejora, añadiendo nuevos módulos electrónicos y de programación.

### TRABAJO FUTURO

La celda electrolítica diseñada permite la ampliación en sus alcances y se puede incorporar varias adaptaciones:

- **Tipos de análisis:** Un tercer electrodo permitirá la práctica de otros tipos de análisis, para ello se requiere también acoplar un módulo de adquisición de señal que incorpore este electrodo.
- **Software:** se puede añadir código tanto a la fuente con la carga activa como a la interfaz según las necesidades de los análisis. En la fuente para obtener otro tipo de señal de alimentación y en la interfaz para el almacenamiento de los datos.
- **Control de la temperatura y agitación:** para estos se puede incorporar un control digital que facilite su manipulación y que otorgue más estabilidad térmica al electrolito.

Se aconseja para un control de la temperatura en reacciones electrolíticas exo o endotérmicas un control de temperatura por encamisado o inmersión de la celda en un líquido de alta conductividad térmica movido a flujo constante, a altas velocidades de agitación para homogeneizar más rápidamente la temperatura y/o mantenerla constante.

Si se requiere realizar ensayos con sustancias corrosivas o tóxicas se recomienda la dilución y la adquisición de los medios físicos para la disposición de los residuos, ya que actualmente no se cuenta con ellos.

Para la utilización de la celda en los análisis se recomienda la calibración del equipo, para conocer los valores permitidos y de linealidad del sistema, acorde a un análisis cuantitativo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Lefrou, P. Fabry, y J.-C. Poignet, *Electrochemistry: The Basics, With Examples*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [2] Rojas Castellanos, Juan Manuel, «Diseño de un sistema automatizado de extracción de hidrógeno mediante pulsos eléctricos por la alimentación e una celda combustible», Sin publicar, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba.
- [3] «WIPO - Search International and National Patent Collections», *Búsqueda electrolítica cell*. <https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf> (accedido jun. 19, 2019).
- [4] B. M. Ruiz López, Vianey Germán, «Producción de biohidrógeno por medio de celdas de electrólisis», *Gaceta Electrónica - Instituto de Ingeniería UNAM, Junio-Julio 2013*. [http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/GacetaJunio\\_Julio2013/Paginas/Producciondebiohidrogenopormediodeceldasdeelectrolisis.aspx](http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/GacetaJunio_Julio2013/Paginas/Producciondebiohidrogenopormediodeceldasdeelectrolisis.aspx) (accedido jun. 20, 2019).
- [5] López, Patricia, «Usan electroquímica para tratar aguas residuales | gaceta Digital UNAM», *Gaceta Digital UNAM*. <http://www.gaceta.unam.mx/20161201/usan-electroquimica-para-tratar-aguas-residuales/> (accedido jun. 20, 2019).
- [6] «WIPO - Search International and National Patent Collections», *Búsqueda celda electrolítica*. <https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf> (accedido jun. 19, 2019).
- [7] J. M. P. Carrazón y P. S. Batanero, *Química electroanalítica: fundamentos y aplicaciones*. Síntesis, 1999.
- [8] D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch, y D. A. Skoog, *Principios de análisis instrumental. 6e*. Mexico, México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2008.
- [9] N. Alonso-Vante, *Electroquímica y electrocatalisis: materiales: aspectos fundamentales y aplicaciones*, vol. 1A. Santa Fe: El Cid Editor, 2003.
- [10] Wikipedia, «Método electroanalítico», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. dic. 13, 2017, Accedido: jun. 26, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9todo\\_electroanal%C3%ADtico&oldid=104128154](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9todo_electroanal%C3%ADtico&oldid=104128154).
- [11] Holguin Quinones, Saul, Montoya Vega, Feliciano, y Flores Valverde, Erasmo, *Fundamentos de electroquímica*. Instituto Politécnico Nacional, 1988.
- [12] F. E. Hartman, «Electrolytic cell», US1541947A, jun. 16, 1925.
- [13] T. Itakura, «Electrolytic cell for electrolysis of sea water», US3766045A, oct. 16, 1973.
- [14] R. J. Stephenson, «Electrochemical cell for removing contaminants from a wastewater stream», US6663783B2, dic. 16, 2003.
- [15] B. A. Simmons, «Electrolytic cell and system for treating water», EP2383231B1, may 17, 2017.
- [16] W. Herbert, «Electrolytic cell», US2299667A, oct. 20, 1942.
- [17] N. Georg, «Electrolytic cell and in particular, alkaline cell», US2571927A, oct. 16, 1951.
- [18] R. A. A. Jeannin, «Electrolytic cell and battery», US2646455A, jul. 21, 1953.
- [19] J. C. C. Silsby, «Feed device for electrolytic cells», US2673232A, mar. 23, 1954.
- [20] E. G. Ernest, «Multi-electrolytic cells», US3222270A, dic. 07, 1965.
- [21] D. E. Danly, «Electrolytic cell», US3649511A, mar. 14, 1972.
- [22] B. C. Campbell, «Solid polymer electrolyte cell construction», US4057479A, nov. 08, 1977.
- [23] W. E. M. Jr, «Electric power plant using electrolytic cell-fuel cell combination», US4087976A, may 09, 1978.
- [24] M. Watanabe, «Fuel cell, electrolytic cell and process of cooling and/or dehumidifying same», US5846668A, dic. 08, 1998.
- [25] G. Böhm, «Separator for electrolytic cells and fuel cells», DE10015360B4, nov. 23, 2006.

- [26] 川角昌弥, «Membrane electrode assembly and a fuel cell and electrolysis cell having the &hellip;», JP3894002B2, mar. 14, 2007.
- [27] S. Yoshida, «Diamond electrode, method for producing same, and electrolytic cell», US7951274B2, may 31, 2011.
- [28] W. Hänni, «Electrolytic cell with bipolar electrode including diamond», US6306270B1, oct. 23, 2001.
- [29] M. Inoue, «Electrode material for flow-through type electrolytic cell, wherein the &hellip;», US5648184A, jul. 15, 1997.
- [30] J. Daly, «End cap for an electrolytic cell», EP1538128B1, jul. 26, 2017.
- [31] J. W. Graydon, «Electrochemical cell stacks», EP1356134B1, sep. 28, 2005.
- [32] T. M. Molter, «Electrochemical cell design using a bipolar plate», US6706436B2, mar. 16, 2004.
- [33] O. Sumita, «Electrolytic cell for producing charged anode water suitable for surface &hellip;», US7442288B2, oct. 28, 2008.
- [34] 刑部次功, «Ion exchange membrane-type electrolytic cell», JP4834329B2, dic. 14, 2011.
- [35] Y. Oda, «Ion exchange membrane type electrolytic cell», CA1147291A, may 31, 1983.
- [36] P. J. A. Kenis, «Membraneless electrochemical cell and microfluidic device without pH constraint», US7635530B2, dic. 22, 2009.
- [37] N. A. Fleischer, «Electrochemical cell with a non-liquid electrolyte», US6225009B1, may 01, 2001.
- [38] T. c/o S. C. Horie, «Non-aqueous electrolytic solution, and non-aqueous electrolyte cell comprising &hellip;», EP0932215B1, may 16, 2001.
- [39] Y. Fukuda, «Non-aqueous electrolyte cell», US6004693A, dic. 21, 1999.
- [40] G. Li, «Positive electrode active material and non-aqueous electrolyte cell», US6749967B2, jun. 15, 2004.
- [41] 구야마준지, «Non-aqueous electrolyte cell», KR100865242B1, oct. 28, 2008.
- [42] M. Shibuya, «Gel electrolyte and gel electrolyte cell», EP1089371B1, nov. 08, 2017.
- [43] M. Hosoya, «Cathode active material, method for preparation thereof, non-aqueous &hellip;», EP1184920B1, dic. 05, 2012.
- [44] R. E. McAlister, «Electrolytic cell and method of use thereof», US8075748B2, dic. 13, 2011.
- [45] M. J. Orella, Y. Román-Leshkov, y F. R. Brushett, «Emerging opportunities for electrochemical processing to enable sustainable chemical manufacturing», *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 20, pp. 159-167, jun. 2018, doi: 10.1016/j.coche.2018.05.002.
- [46] K. Scott, «Process intensification: An electrochemical perspective», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1406-1426, ene. 2018, doi: 10/gf322g.
- [47] H. Yang y H. C. Zeng, «Editorial overview: Nanotechnology: Nanocatalysts and nanomaterials in chemical conversion for sustainability», *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 20, pp. A1-A3, jun. 2018, doi: 10/gf32zg.
- [48] M. Zhou, Y. Xu, y Y. Lei, «Heterogeneous nanostructure array for electrochemical energy conversion and storage», *Nano Today*, vol. 20, pp. 33-57, jun. 2018, doi: 10.1016/j.nantod.2018.04.002.
- [49] A. Waheed, M. Mansha, y N. Ullah, «Nanomaterials-based electrochemical detection of heavy metals in water: Current status, challenges and future direction», *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 105, pp. 37-51, ago. 2018, doi: 10.1016/j.trac.2018.04.012.
- [50] Y. He *et al.*, «Porous carbon nanosheets: Synthetic strategies and electrochemical energy related applications», *Nano Today*, vol. 24, pp. 103-119, feb. 2019, doi: 10/gf32zr.
- [51] Y. Song *et al.*, «Three-dimensional carbon architectures for electrochemical capacitors», *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 509, pp. 529-545, ene. 2018, doi: 10.1016/j.jcis.2017.07.081.

- [52] C. Lefrou, P. Fabry, y J.-C. Poignet, *Electrochemistry: the basics, with examples*. Berlin: Springer, 2012.
- [53] J. Newman y K. E. Tomas-Alyea, *Electrochemical Systems*. .
- [54] T. F. Fuller y J. N. Harb, *Electrochemical engineering*, First edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [55] G. Kreysa, K. Ota, y R. F. Savinell, Eds., *Encyclopedia of Applied Electrochemistry*. New York, NY: Springer New York, 2014.
- [56] C. L. Mantrell, *Electrochemical Engineering*. New York, United States: McGraw Hill, 1960.
- [57] P. Pedeferra, *Corrosion Science and Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [58] D. Pletcher, Z.-Q. Tian, y D. E. Williams, *Developments in Electrochemistry : Science Inspired by Martin Fleischmann*. Wiley, 2014.
- [59] D. Pletcher, Ed., *Instrumental methods in electrochemistry*, Repr. Oxford: Woodhead Publ, 2011.
- [60] F. Cardarelli, *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [61] P. Cañizares, J. García-Gómez, I. Fernández de Marcos, M. A. Rodrigo, y J. Lobato, «Measurement of Mass-Transfer Coefficients by an Electrochemical Technique», *J. Chem. Educ.*, vol. 83, n.º 8, p. 1204, ago. 2006, doi: 10/dz33mh.
- [62] N. Aguiló-Aguayo, T. Drozdik, y T. Bechtold, «The role of electrode orientation to enhance mass transport in redox flow batteries», *Electrochem. Commun.*, vol. 111, p. 106650, feb. 2020, doi: 10/ghdn6c.
- [63] M. A. Pérez García, J. C. Álvares Antón, J. C. Campo Rodríguez, F. J. Ferrero Martín, y G. J. Grillo Ortega, *Instrumentacion electronica*. Thompson.
- [64] A. J. Bard, M. Stratmann, D. Macdonald, y P. Schmuki, Eds., *Encyclopedia of Electrochemistry: Online*, 1.ª ed. Wiley, 2007.
- [65] S. J. C. Weusten, «Mass transfer in parallel plate electrolyzers», Master, Eindhoven University of Technology research portal, Eindhoven, 2017.
- [66] F. Coeuret, *Introducción a la ingeniería electroquímica*. Reverte, 1992.
- [67] H. Wendt y G. Kreysa, *Electrochemical Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999.
- [68] N. Perez, *Electrochemistry and Corrosion Science*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [69] Brunssen de Occidente, «Propiedades y beneficios del PTFE: Datos tecnicos del PTFE con sus diferencias por tipo.», *Propiedades y beneficios del PTFE: Datos tecnicos del PTFE con sus diferencias por tipo*. <http://www.comercioindustrial.net/productos.php?id=tprop&mt=ptfe> (accedido oct. 08, 2020).
- [70] QUANDA Plastic, «Saferlon(R) PTFE propiedades de datos - QUANDA Especificaciones tecnicas», *Saferlon(R) PTFE propiedades de datos - QUANDA Especificaciones tecnicas*. <http://www.quandaes.com/saferlon-ptfe-data-sheet.html> (accedido oct. 08, 2020).
- [71] SCHOOT, «Technical Glasses. Physical and Technical Properties», *Technical Glasses. Physical and Technical Properties*. [https://www.schott.com/d/epackaging/2fbc7180-e37c-4209-9eec-617ad9208e51/1.4/final\\_schott\\_technical\\_glasses\\_row.pdf](https://www.schott.com/d/epackaging/2fbc7180-e37c-4209-9eec-617ad9208e51/1.4/final_schott_technical_glasses_row.pdf) (accedido oct. 08, 2020).
- [72] D. S. Silvester y R. G. Compton, «Electrochemistry in Room Temperature Ionic Liquids: A Review and Some Possible Applications», *Z. Für Phys. Chem.*, vol. 220, n.º 10, pp. 1247-1274, oct. 2006, doi: 10.1524/zpch.2006.220.10.1247.
- [73] G. D. Peckham y I. J. McNaught, «The Variation of Electrochemical Cell Potentials with Temperature», *J. Chem. Educ.*, vol. 88, n.º 6, pp. 782-783, jun. 2011, doi: 10/dg4xrg.
- [74] C. Schulzke, «Temperature dependent electrochemistry—a versatile tool for investigations of biology related topics», *Dalton Trans.*, n.º 34, p. 6683, 2009, doi: 10/fmwxd.

- [75] F.-M. Matysik, Ed., *Trends in Bioelectroanalysis*, vol. 6. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [76] C. Dichtl, P. Sippel, y S. Krohns, «Dielectric Properties of 3D Printed Polylactic Acid», *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, pp. 1-10, 2017, doi: 10/gbrrmk.
- [77] SD3D Printing, «PLA (Polylactic Acid). Technical Data Sheet», *PLA (Polylactic Acid). Technical Data Sheet*. [https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA\\_01.pdf](https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf) (accedido oct. 09, 2020).
- [78] Massachusetts Institute of Technology, «Pyrex. Material Property Database», *Pyrex. Material Property Database*. <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pyrex.htm> (accedido oct. 08, 2020).
- [79] Thermtest Instrument, «Thermal Conductivity of Pyrex Glass», *Thermtest Inc.*, feb. 22, 2015. <https://thermtest.com/thermal-conductivity-of-pyrex-glass-using-the-tps-m1-portable-thermal-conductivity-meter> (accedido oct. 09, 2020).
- [80] K. Izutsu, *Electrochemistry in nonaqueous solutions*, 2nd., rev.Enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [81] D. Pletcher y F. C. Walsh, *Industrial Electrochemistry*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [82] D. A. C. Brownson y C. E. Banks, *The Handbook of Graphene Electrochemistry*. London: Springer London, 2014.
- [83] E. Fuenmayor, «ANÁLISIS DE REEMPLAZODE UN ACTIVO FÍSICO. Caso de estudio basado en Métodos y Normas Vigentes», *Predictiva21*, vol. 22, n.º 4, p. 16, sep. 2017.
- [84] P. Silvera, «Estrategia para Optimizar el uso de los Activos y Maximizar su Aprovechamiento: Ciclo de vida / Vida Remanente de un Activo», *Predictiva21*, vol. 29, n.º 6, p. 66, abr. 2020.
- [85] C. E. Quinde Chamaidán, «Implementación de una fuente regulada variable de 0 a 15 voltios (cc) para el laboratorio de electrónica de la carrera de ingeniería en teleinformática», UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [86] A. Rodríguez Molina, «Diseño, fabricación y validación de fuentes de alimentación», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Madrid, España, 2018.
- [87] S. Parler, *Electrochemistry Encyclopedia*, vol. Electrolytic capacitors, Uses and applications of electrolytic capacitor. Power supply output filter. Cleveland, Ohio: Case Western Reserve University.
- [88] V. García, «Fuentes de Alimentación y Laboratorio», *Electrónica práctica aplicada*, nov. 03, 2010. <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/electronica-practica>.
- [89] C. D. R. Moromenacho Guayasamin, «Diseño y construcción de una fuente de voltaje regulada DC, para la polarización de un equalizador - mezclador», ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, Ecuador, 2004.
- [90] R. L. Boylestad y L. Nashelsky, *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Pearson Educación, 2009.
- [91] A. Hermosa Donate, *Electrónica aplicada: CF instalaciones de telecomunicaciones*. México: Alfaomega : Marcombo, 2013.
- [92] M. Brown, *Power supply cookbook*, 2nd ed. Boston: Newnes, 2001.
- [93] M. Brown, *Power Sources and Supplies*. Newnes/Elsevier, 2008.
- [94] A. Rodríguez Molina, «Diseño, fabricación y validación de fuentes de alimentación», Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [95] B. Sánchez Viteri, «Diseño de un panel instrumental para aplicaciones electroquímicas», mar. 1981, Accedido: dic. 02, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9155>.
- [96] D. Báez López y F. E. Guerrero Castro, *Circuit analysis with Multisim*. Morgan & Claypool Publishers, 2011.

- [97] D. Báez López, F. E. Guerrero Castro, y O. Cervantes Villagómez, *Advanced Circuit Simulation Using Multisim Workbench*. Morgan & Claypool Publishers, 2012.
- [98] Y. Tividis, *A First Lab in Circuits and Electronics*. Jhon Wiley & Sons Inc., 2002.
- [99] Á. Bueno Martín y A. I. de Soto Gorroño, *Desarrollo y construcción de prototipos electrónicos: tutoriales OrCAD 10 y LPKF 5 de ayuda al diseño*. Barcelona: Marcombo, 2005.
- [100] Š. Kubínová y J. Šlégr, «ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory», *J. Chem. Educ.*, vol. 92, n.º 10, pp. 1751-1753, oct. 2015, doi: 10.1021/ed5008102.
- [101] D. Patel, «How to Build an Arduino Switched-Mode Power Supply (SMPS) | Arduino», *Maker Pro*, ago. 21, 2019. <https://maker.pro/arduino/tutorial/how-to-build-an-arduino-switched-mode-power-supply-smps> (accedido dic. 13, 2020).
- [102] Milen, «Arduino Controlled Power Supply Source», *Instructables*. <https://www.instructables.com/Arduino-Controlled-Power-Supply-Source/> (accedido dic. 13, 2020).
- [103] ElectroTodos, *Carga Electrónica o Electronic Load*. 2017.
- [104] W. S. Pérez, «Diseño e implementación de un potencióstato para uso en sala limpia.», 2012.
- [105] J. G. B. Pérez, J. A. A. Palacio, A. R. A. Picón, J. J. A. Rueda, G. E. G. Sua, y L. C. M. Suarez, «Diseño y construcción de un prototipo de potencióstato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica», *Rev. UIS Ing.*, vol. 3, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2004, Accedido: dic. 30, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/2273>.
- [106] Y. K. González Rodríguez, «Implementación de un prototipo para la realización de la técnica de voltametría cíclica para aplicaciones biológicas o ambientales», Grado Académico de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica, 2018.
- [107] J. L. Calabozo Sánchez y X. Vilanova Salas, «Realización de un Potencióstato», Ingeniería Técnica Industrial. Especialidad en Electrónica Industrial, Universitat Rovira i Virgil, 2004.
- [108] B. Segura, F. N. Jiménez, y L. R. Giraldo, «Potentiostat prototype with applications in electrochemical processes», *Entre Cienc. E Ing.*, vol. 10, n.º 19, pp. 61-69, jun. 2016, Accedido: dic. 28, 2020. [En línea]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1909-83672016000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-83672016000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es).
- [109] M. Alfaro y I. Alfaro, «Construcción de un potencióstato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas», *Educ. Quím.*, vol. 28, n.º 4, pp. 269-274, oct. 2017, doi: 10.1016/j.eq.2017.05.006.
- [110] L. Ortiz Fuentes, «Desarrollo de un potencióstato para la adquisición y tratamiento de la señal de biosensores enzimáticos», Trabajo Fin de Master, Universidad Autónoma de Madrid, 2013.
- [111] P. Vanýsek, *Impedance in Electrochemistry — From Analytical Applications to Mechanistic Speculation 2*. The Electrochemical Society, 2009.
- [112] Bank, «Potentiostats and Galvanostats». [https://www.bank-ic.de/encms/produkte/1\\_potentiostaten.html](https://www.bank-ic.de/encms/produkte/1_potentiostaten.html) (accedido ene. 06, 2021).
- [113] KNAUF Miret, «Propiedades del Poliestireno Expandido (EPS)», 2005. <http://www.davsa.com/infoWeb/Grup/Subgrups/caracteristiques/040101D-20.pdf> (accedido dic. 14, 2020).
- [114] E. Sásig, «Python y Arduino Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) Lectura de múltiples sensores – Roboticos». <https://roboticoss.com/product/python-y-arduino-interfaz-grafica-de-usuario-gui-lectura-de-multiples-sensores/> (accedido ene. 09, 2021).

## **ANEXOS**

**ANEXO 1. TABLA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS DE PLACAS ARDUINO**

	<b>Arduino Uno Rev 3</b>	<b>Arduino Leonardo</b>	<b>Arduino 101</b>	<b>Arduino Mega 2560 Rev 3</b>
				
<b>Microcontrolador</b>	ATmega328P	ATmega32u4	Intel Curie	ATmega2560
<b>Voltaje</b>	5 V	5 V	3.3 V (5 V tolerancia I/O)	5 V
<b>Input Voltaje (Recomendado)</b>	7-12 V	7-12 V	7-12 V	7-12 V
<b>Input Voltaje (Límite)</b>	6-20 V	6-20 V	7-17 V	6-20 V
<b>Input Voltaje Plug (Límites)</b>				
<b>Input VoltajePoE (Límites)</b>				
<b>Digital (I/O) Pins</b>	14 (4 para salida PWM)	20	14 (4 para salida PWM)	54 (15 para salida PWM)
<b>PWM Digital (I/O) Pins</b>	6	7	4	6
<b>Input Pins Analógicos</b>	6	12	6	
<b>Analog Input Pins</b>				
<b>Analog Output Pins</b>				
<b>Canales Entrada analógica</b>			4 of the Digital I/O pins	6
<b>Canales Entrada analógica (multiplex)</b>			8	
<b>DC Current por I/O Pin</b>	20 mA	40 mA	20 mA	20 mA
<b>DC Current Por 3.3 V Pin</b>	50 mA	50 mA		50 mA
<b>DC Corriente para 5 V</b>				
<b>Absorption</b>				
<b>Memoria Flash</b>	32 KB (0.5 KB para bootloader)	32 KB (4 KB para bootloader)	196 KB	256 KB (8 KB para bootloader)

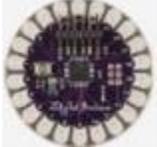
<b>SRAM</b>	2 KB	2.5 KB	24 KB	8 KB
<b>EEPROM</b>	1 KB	1 KB		4 KB
<b>Velocidad de Reloj</b>	16 MHz	16 MHz	32 MHz	16 MHz
<b>LED BUILTIN</b>		13		13
<b>Bluetooth</b>			Bluetooth LE	
<b>Características adicionales</b>			Acelerometro(6 ejes) / giro	
<b>Diametro</b>				
<b>Longitud</b>	68.6 mm	68.6 mm	68.6 mm	101.52 mm
<b>Anchura</b>	53.4 mm	53.3 mm	53.4 mm	53.3 mm
<b>Peso</b>	25 g	20 g	34 g	37 g
<b>RED</b>				
<b>Procesador</b>				
<b>Arquitectura</b>				
<b>Voltaje</b>				
<b>Ethernet</b>				
<b>WiFi</b>				
<b>Tipo USB</b>				
<b>Lector de Tarjetas</b>				
<b>RAM</b>				
<b>Memoria Flash</b>				
<b>SRAM</b>				
<b>EEPROM</b>				
<b>Clock Speed</b>				

Continuación Tabla 1.

	Arduino Zero	Arduino Due	Arduino YUN	Arduino Ethernet
				
<b>Microcontrolador</b>	ATSAMD21G18, 32-Bit ARM Cortex MO+	AT91SAM3X8E	AVR Microcontroller ATmega32U4	ATMega328
<b>Voltaje</b>	3.3 V	3.3 V	5 V	5 V
<b>Input Voltaje (Recomendado)</b>		7-12 V	5 V	7 -12 V
<b>Input Voltaje (Límite)</b>		6-16 V		7 -12 V
<b>Input Voltaje Plug (Límites)</b>				6 – 20 V
<b>Input Voltaje PoE (Límites)</b>				36 – 57 V
<b>Digital (I/O) Pins</b>	20	54 (12 para salida PWM)	20	14 (4 para salida PWM)
<b>PWM Digital (I/O) Pins</b>	Todos excepto Pines 2 y 7		7	
<b>Input Pins Analógicos</b>	Todos excepto Pin 4		12	
<b>Analog Input Pins</b>				6
<b>Analog Output Pins</b>				1, 10-bit DAC
<b>Canales Entrada analógica</b>	6, 12-bit ADC channels	12		
<b>Canales Entrada analógica (multiplex)</b>	1, 10-bit DAC	2 (DAC)		
<b>DC Current por I/O Pin</b>	7 mA	130 mA (Total en todas las líneas I/O)	40 mA on I/O Pins; 50 mA on 3.3 Pin	40 mA
<b>DC Current Por 3.3 V Pin</b>		800 mA		50 mA
<b>DC Corriente para 5 V</b>		800 mA		
<b>Absorption</b>				
<b>Memoria Flash</b>	256 KB	512 KB para aplicaciones de usuario	32 KB (4 KB para bootloader)	32 KB (0.5 para bootloader)

<b>SRAM</b>	32 KB	96 KB (two banks: 64 KB and 32 KB)	2.5 KB	2 KB
<b>EEPROM</b>	None		1 KB	1 KB
<b>Velocidad de Reloj</b>	48 MHz	84 MHz	16 MHz	16 MHz
<b>LED BUILTIN</b>		13		13
<b>Bluetooth</b>				
<b>Características adicionales</b>				
<b>Diametro</b>				
<b>Longitud</b>	68 mm	101.52 mm	101.52 mm	68.6 mm
<b>Anchura</b>	30 mm	53.3 mm	53.3 mm	53.3 mm
<b>Peso</b>	12 g	36 g	37 g	28 g
<b>RED</b>				
<b>Procesador</b>			Atheros AR9331	
<b>Arquitectura</b>			MiPS	
<b>Voltaje</b>			3.3 V	
<b>Ethernet</b>			802.3 10/100 Mbit/s	
<b>WiFi</b>			802.11b/g/n 2.4 GHz	
<b>Tipo USB</b>			2.0 Host	
<b>Lector de Tarjetas</b>			Micro-SD	
<b>RAM</b>			64 MB DDR2	
<b>Memoria Flash</b>			16 MB	
<b>SRAM</b>			2.5 KB	
<b>EEPROM</b>			1 KB	
<b>Clock Speed</b>			400 Mhz	

Continuación Tabla 1.

	<b>Arduino TIAN</b>	<b>Arduino Gemma</b>	<b>Lilypad Arduino</b>
			
<b>Microcontrolador</b>	ARM Microcontroller SAMD21G18, ARM Cortex-M0+	ATtiny85	ATmega168 or ATmega328V
<b>Voltaje</b>	3.3 V	3.3 V	2.7 V – 5.5 V
<b>Input Voltaje (Recomendado)</b>		4 V – 16 V	2.7 V – 5.5 V
<b>Input Voltaje (Límite)</b>			
<b>Input Voltaje Plug (Límites)</b>			
<b>Input Voltaje PoE (Límites)</b>			
<b>Digital (I/O) Pins</b>			3 14
<b>PWM Digital (I/O) Pins</b>			2 6
<b>Input Pins Analógicos</b>	6	1	6
<b>Analog Input Pins</b>			
<b>Analog Output Pins</b>			
<b>Canales Entrada analógica</b>			
<b>Canales Entrada analógica (multiplex)</b>			
<b>DC Current por I/O Pin</b>	7 mA (I/O pins)	20 mA	40 mA
<b>DC Current Por 3.3 V Pin</b>			
<b>DC Corriente para 5 V</b>			
<b>Absorption</b>		9 mA activo	
<b>Memoria Flash</b>		8 KB (2.75 KB para bootloader)	16 KB (2 KB para bootloader)
<b>SRAM</b>		512 KB	1 KB
<b>EEPROM</b>		512 KB	512 KB
<b>Velocidad de Reloj</b>	48 MHz	8 MHz	8 MHz
<b>LED BUILTIN</b>		1	
<b>Bluetooth</b>	CSR8510, Bluetooth with EDR / BLE 4.0		

<b>Características adicionales</b>			
<b>Diametro</b>		27.94 mm	
<b>Longitud</b>	68.5 mm		
<b>Anchura</b>	53 mm		
<b>Peso</b>	36 g		
<b>RED</b>			
<b>Procesador</b>	Atheros AR9342		
<b>Arquitectura</b>	MiPS		
<b>Voltaje</b>	3.3 V		
<b>Ethernet</b>	802.3 10/100/1000 Mbps/s		
<b>WiFi</b>	802.11 b/g/n 2.4 GHz dual-band		
<b>Tipo USB</b>	2.0 Host		
<b>Lector de Tarjetas</b>			
<b>RAM</b>	64 MB DDR2		
<b>Memoria Flash</b>	16 MB + 4 GB eMMC		
<b>SRAM</b>			
<b>EEPROM</b>			
<b>Clock Speed</b>	560 MHz		



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA

**UTP**  
COORDINACIÓN GENERAL DE UNIVERSIDADES  
TECNOLÓGICAS Y POLITÉCNICAS



Universidad Politécnica  
de Lázaro Cárdenas, Michoacán

## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE LÁZARO CÁRDENAS MICHOACÁN

Otorga la presente

### CONSTANCIA A:

## MTRO. LUIS CARLOS CAICEDO ROSERO

Por su participación como ponente en la conferencia de título:

**La Electroquímica y la Ingeniería Ambiental. Una Visión a la Electrocoagulación como alternativa sustentable.**

Presentada a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Tecnología Ambiental.

Lázaro Cárdenas, Michoacán 29 Octubre del 2020

Lic. América Agustina Solís Sánchez  
Rectora

