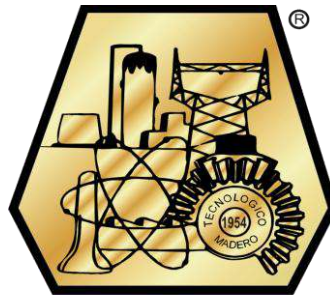




INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE UN REACTOR ANAEROBIO ELECTROQUÍMICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Presenta:

Ing, Carlos Alberto Cruz Nieto

G07070687

No. CVU 1324635

Director de Tesis:

Dr. Rubén Salas Cabrera

No. CVU 60076

Co-Director de Tesis:

Dr. Edson Baltazar Estrada Arriaga



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **10/Diciembre/2025**

Oficio No. U11.127/25

ASUNTO: Autorización de Impresión

C. CARLOS ALBERTO CRUZ NIETO
No. DE CONTROL G07070687
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. RUBÉN SALAS CABRERA
SECRETARIO:	DR. GABRIEL CALDERÓN ZAVALA
VOCAL :	DR. ULISES PÁRAMO GARCÍA
SUPLENTE:	DR. NELSON RANGEL VALDEZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE UN REACTOR ANAEROBIO ELECTROQUÍMICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por Mi Patria y Por Mi Bien" ®


RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
RCG/NRV/jar



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx



Agradecimientos

Agradezco a la SECITHI por el apoyo brindado a través de la beca 4013106 para la realización del trabajo "Diseño y desarrollo de un sistema electrónico para el control y monitoreo de un reactor anaerobio electroquímico para el tratamiento de aguas residuales".

Al Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Madero por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Agradezco también a las siguientes personas: Dr. Rubén Salas Cabrera, Dr. Edson Baltazar Estrada Arriaga, Dr. Ulises Páramo García, Dr. Nelson Rangel Valdez, Dra. Nohra Violeta Gallardo Rivas, Dr. Ricardo García Alamilla, Mtro. Aaron González Rodríguez, Mtro. Nacú Salas, Ing. Juan Manuel Valle, Mtro. Mario Gómez, Ing. Javier León, Dr. Gabriel Calderón, Dr. Juan Frausto, Dra. Silvia Brachetti, Dra. Guadalupe Castilla, Dr. Miguel Ángel García, Mtra. Bárbara María Esther García, Ing. Rodolfo Ortega, Dra. Liliana García, Dr. Luciano Aguilera, Dr. Luciano Sandoval, Mtro. Wilver Montes, Ing. Wendy Buendía, Ing. Ana Hernández, Alfredo Mar, Dra. Marcela Castillo, Mtro. Roberto Galindo, Roberto Martínez, Dr. Pedro Martín García, Dra. María Lucila Morales, Mtro. Gustavo Rábago, Ing. Christian Vicencio, Ing. Juan Manuel del Ángel, Lic. Ramón Téllez, Ing. Irving Aguilar, Lic. Samuel Hernández, Lic. Abraham Hernández, Lic. Eduardo de la Torre, Lic. Adrián Vázquez, Mtro. Manuel Chang, Dra. Sugey Osorio, Dra. Sarah García, Dra. Estrella Garcés, Mtro. Abel Salas, Dra. Carolina Rojas, Mtra. Guillermina Castillo, Dra. Lluvia Venegas, Mtro. Silvestre González, Dr. Miguel Cabrales,

Dr. Joel Rodríguez, Mtro. Domingo Lacorte, Dr. Ulises Orozco, Mtra. Elsa Boer, Ing. Juan Rojas, Mtra. Marisol García, Mtro. Christian Villanueva, Ing. Saulo Chávez, Ing. Luis Gael Castillo, Ing. Carlos Arguello, Ing. Marco Kulasic, Ing. Max Martínez, Dr. Genaro González, Dr. Alberto Esquivel, Dra. Tania Gutiérrez, Dra. Dana Hernández, Mtra. María de Jesús Turriza, Ing. Néstor Torres, Mtro. Fausto Virgen, Dr. Armando Rivas, Ing. Héctor Hugo González, Dr. Gabriel Ruiz, Mtro. Refugio Hernández, Lic. Gabriela Reyna, Ing. Marisela Ochoa, Ing. Ismael Álvarez, Dr. Alfredo Castillo, Ing. Patricio Acevedo, Mtra. Diana López, Ing. Gregorio Palmer Ing. Adriana Aldape, Mtra. Elvia Carolina Hernández, Ing. Eduardo Abid, Ing. Juan Demetrio Hilario, a mis compañeros de generación de maestría en ciencias de la ingeniería (Ing. Stephanie Salas, Ing. Alma González, Ing. Roberto Vázquez, Ing. Allan Jiménez) y maestría en ingeniería eléctrica, a mis alumnos y a todas esas personas que faltan, sin embargo, la lista nunca acabaría, gracias a todos ustedes se logró concluir el presente trabajo.

A todos ustedes les ofrezco un agradecimiento infinito.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios; a mis papás, primeros y mejores maestros que he tenido y que son mi ejemplo a seguir; a mi hermano y hermanas, quienes siempre me apoyaron incondicionalmente en los peores momentos; a mis sobrinos y sobrinas, que son mi inspiración, pero especialmente a mi sobrina, quien durante mis momentos más difíciles, sobre todo de salud, estuvo siempre al pendiente hasta que me recuperé por completo y pude continuar con este proyecto; a todos mis amigos, que me apoyaron con sus consejos y me alentaron a superarme; a todo el equipo del IMTA, que demostró que se puede aprender en un ambiente de cordialidad donde uno se siente como en familia; a Jocelin, por todos esos momentos en los que me motivaste a seguir adelante a pesar de las dificultades; y, finalmente, a mis alumnos, quienes han sido una gran fuente de motivación para seguir aprendiendo y poder transmitir ese conocimiento, con el firme objetivo de formar a los mejores profesionistas y de mejorar constantemente como profesor.

A todos y todas ustedes, les dedico este trabajo.

Índice general

Índice de Tablas	VIII
Índice de Figuras	XI
Nomenclatura	XII
Resumen	XIII
Abstract	XV
1 Introducción	XVI
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Alcances y limitaciones	2
1.4 Objetivo general	3
1.5 Objetivos específicos	3
2 Fundamento Teórico	4
2.1 Control a través de modelado en espacio – estado	5
2.1.1 Descripción de estado y variables de estado	5
2.1.2 Ecuación dinámica	6
2.1.3 Matriz de funciones de transferencia	7
2.1.4 Sistemas no lineales	8
2.1.5 Puntos de equilibrio	9
2.2 Mezcal y vinazas mezcaleras	10
2.3 Digestión anaerobia	12
2.3.1 Condiciones ambientales	15

2.3.2	Reactor anaerobio de flujo ascendente	15
2.3.3	Reactores electroquímicos	17
2.3.4	Biorreactores	18
2.3.5	Biorreactores electroquímicos	19
2.3.6	Lodo granular	22
2.3.7	Parámetros que afectan la digestión anaerobia	23
2.3.8	pH	23
2.3.9	Temperatura	24
2.3.10	Carga orgánica volumétrica	24
2.3.11	Tiempo de Retención Hidráulico	25
2.3.12	Demanda Química de Oxígeno	26
2.3.13	Biogás de reactores anaerobios	26
2.3.14	Producción de biogás	26
3	Estado del Arte	27
3.1	Arranque y monitoreo de un reactor UASB	29
3.2	Monitoreo de un reactor anaerobio	30
3.3	Estabilidad de los procesos de tratamiento de aguas residuales	30
3.4	Eficiencia energética de los procesos anaerobios	31
3.5	Sensores de bajo costo	31
3.6	Utilización de Arduino® en procesos anaerobios	32
3.7	Variaciones de corriente y voltaje en procesos anaerobios electroquímicos	32
3.8	Sensor de pH	33
3.9	Control de las bombas peristálticas	33
3.10	LabVIEW® como herramienta para la adquisición de datos en tiempo real	34
4	Metodología propuesta	35
4.1	Descripción de las partes del reactor	36
4.2	Armado del reactor	38
4.2.1	Inoculación del reactor	40

4.3	Arranque del reactor	41
4.3.1	Preparación del sustrato de vinaza mezcalera y llenado del reactor	41
4.3.2	Conexiones con la bomba peristáltica	42
4.3.3	Aforo del caudal	43
4.4	Operación del reactor	45
4.5	Diseño electrónico de los circuitos para la fuente de corriente constante, sensores y actuadores	46
4.5.1	Selección del sensor de microflujo Honeywell® AWM 3150V	47
4.5.2	Selección del sensor de PH 4502 C con electrodo 201	48
4.5.3	Selección de las bombas peristálticas Kamoer® NKP-DCL-S10Y	49
4.5.4	Selección del resistor calentador con control de temperatura Oceanaqua® OCT - 25	50
4.5.5	Diseño para la fuente de alimentación de los electrodos	51
4.5.6	Diseño electrónico para la fuente de alimentación y acondicionamiento de señales para el sensor de flujo	54
4.5.7	Conexiones del sensor de pH con el microcontrolador Arduino®	58
4.5.8	Diseño electrónico para el control de la velocidad de un motor mediante modulación por ancho de pulso (PWM)	60
5	Resultados	63
5.1	Resultados de los circuitos diseñados y caracterización de los sensores	63
5.1.1	Fuente de alimentación para los electrodos	63
5.1.2	Caracterización del sensor de flujo	65
5.1.3	Caracterización preliminar del resistor calentador	71
5.1.4	Validación del sensor de pH con el microcontrolador Arduino®	73
5.1.5	Control de la velocidad y caudal mediante modulación por ancho de pulso (PWM)	76
6	Conclusiones y trabajos futuros	78
6.1	Discusión	78

6.2	Estado del Proyecto y Perspectivas Futuras	81
6.3	Conclusión y Recomendaciones	81
Bibliografía		82

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Parámetros fisicoquímicos de distintas vinazas	11
Tabla 5.1	Datos del sensor AWM 3150V proporcionados por el fabricante	66
Tabla 5.2	Caracterización preliminar del sensor AWM 3150V	67
Tabla 5.3	Calibración: Sensor de Flujo AWM 3150V	70
Tabla 5.4	Lecturas de temperatura del resistor calentador en un intervalo de tiempo . . .	72
Tabla 5.5	Valores de voltaje vs pH	73
Tabla 6.1	Análisis Comparativo Costo - Beneficio para el sensor de flujo	79
Tabla 6.2	Análisis Costo - Beneficio para el sensor de pH	80
Tabla 6.3	Análisis Costo - Beneficio para la bomba peristáltica	80

Índice de Figuras

Figura 2.1	Vinaza cruda de mezcal	10
Figura 2.2	Etapas de la digestión anaerobia	14
Figura 2.3	Esquema de un reactor UASB	16
Figura 2.4	Celda de combustible microbiana	20
Figura 2.5	Celda de electrólisis microbiana	21
Figura 2.6	Estructura del lodo granular	22
Figura 2.7	Lodo granular anaerobio	23
Figura 4.1	Esquema de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente electroquímico	37
Figura 4.2	Fotografía de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente electroquímico	37
Figura 4.3	Sección de neopreno	38
Figura 4.4	Sección de fibra de vidrio	38
Figura 4.5	Electrodos de grafito tipo escobillón	39
Figura 4.6	Conexión de válvulas y mangueras de entrada y recirculación	39
Figura 4.7	Inoculación del reactor	40
Figura 4.9	Reactor UASB electroquímico inoculado y cerrado	41
Figura 4.8	Reactor antes del sellado	41
Figura 4.10	Vinaza de mezcal	42
Figura 4.11	Llenado del reactor UASB electroquímico con vinaza	42
Figura 4.12	Conexiones del reactor UASB electroquímico	43
Figura 4.13	Aforo del caudal del reactor	44
Figura 4.14	Nivel del agua residual dentro a la salida del efluente del reactor	45
Figura 4.15	Sensor de microflujo de biogás AWM 3150V	47

Figura 4.16	Sensor de PH-4502 C con electrodo 201	49
Figura 4.17	Bomba peristáltica Kamoer® NKP-DCL-S10Y	50
Figura 4.18	Resistor calentador Oceanaqua® OCT - 25	50
Figura 4.19	Simulación de la fuente de corriente propuesta en Multisim®	51
Figura 4.20	Armado de la fuente de corriente propuesta en protoboard	52
Figura 4.21	Simulación de la segunda fuente de corriente propuesta en Multisim®	53
Figura 4.22	Tarjeta electrónica para la fuente de corriente constante diseñada en Altium Designer®	54
Figura 4.23	Diseño de fuente de alimentación de corriente para el sensor de biogás realizado en Multisim®	55
Figura 4.24	Fuente de alimentación para el sensor de biogás realizada en protoboard	55
Figura 4.25	Señal de salida del sensor de caudal de gas a flujo cero	56
Figura 4.26	Diseño del circuito para acondicionamiento de señales para el sensor de biogás realizado en Multisim®	56
Figura 4.27	Armado del circuito para acondicionamiento de señales y fuente de alimentación para el sensor de biogás	57
Figura 4.28	Integración del sensor de flujo de biogás al circuito de alimentación y acondicionamiento de señales	57
Figura 4.29	Obtención de señal de salida del circuito para el sensor de gas	58
Figura 4.30	Conexiones del sensor PH4502C con el microcontrolador tipo Arduino®	59
Figura 4.31	Soluciones buffer para la calibración del sensor de pH	59
Figura 4.32	Circuito controlador para la bomba peristáltica mediante modulación por ancho de pulso simulado en Multisim®	61
Figura 4.33	Circuito controlador para la bomba peristáltica armado en protoboard	62
Figura 5.1	Fuente de corriente constante armada con sus componentes electrónicos	64
Figura 5.2	Fuente de corriente constante manteniendo 4 mA de salida	65
Figura 5.3	Gráfico de salida de voltaje del sensor vs flujo creado a partir de los datos proporcionados por el fabricante	66

Figura 5.4	Prueba de desplazamiento de gas durante un minuto	67
Figura 5.5	Gráfico comparativo del comportamiento nominal del sensor contra los datos experimentales	68
Figura 5.6	Análisis de regresión lineal para los datos del sensor AWM 3150V	69
Figura 5.7	Análisis de regresión lineal para los datos experimentales del sensor AWM 3150V	70
Figura 5.8	Mediciones de temperatura para la caracterización preliminar del resistor calen- tador	71
Figura 5.9	Registro de la temperatura respecto del tiempo del resistor calentador	72
Figura 5.10	Gráfico de dispersión para los datos del sensor de pH	73
Figura 5.11	Comparación de las mediciones del sensor de pH con el potenciómetro Thermo Scientific® y el sensor PH 4502C	74
Figura 5.12	Lecturas de pH mostradas en el monitor serial de la placa Arduino®	75
Figura 5.13	Lectura de pH mostrada en software LabVIEW®	75
Figura 5.14	Prueba para verificar la correspondencia de la velocidad de la bomba con el caudal	76
Figura 5.15	Control del motor mediante modulación de ancho de pulso	77

Nomenclatura

ATC: Compensación Automática de Temperatura (por sus siglas en inglés).

IWA: Asociación Internacional del Agua (por sus siglas en inglés).

AGV: Ácidos Grasos Volátiles.

MEMS: Sistema Micro Electro Mecánico (por sus siglas en inglés).

BNR: Remoción Biológica de Nutrientes (por sus siglas en inglés).

MIMO: Múltiples Entradas - Múltiples Salidas (por sus siglas en inglés).

CCM: Celda de Combustible Microbiana.

N: Nitrógeno.

CEM: Celda de Electrólisis Microbiana.

NOM: Norma Oficial Mexicana.

COV: Carga Orgánica Volátil.

P: Fósforo.

DAQ: Tarjeta de Adquisición de Datos (por sus siglas en inglés).

pH: Potencial de Hidrógeno.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

PLC: Controlador Lógico Programable (por sus siglas en inglés).

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

PWM: Modulación por Ancho de pulso (por sus siglas en inglés).

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

SCCM: Centímetros Cúbicos Estándar por Minuto (por sus siglas en inglés).

SISO: Entrada Simple - Salida Simple (por sus siglas en inglés).

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

TRH: Tiempo de Residencia Hidráulico.

UASB: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE UN REACTOR ANAEROBIO ELECTROQUÍMICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Resumen

La creciente crisis hídrica global intensifica la necesidad de estrategias sostenibles para el tratamiento y reutilización del agua residual. En este contexto, los reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) se posicionan como una tecnología eficiente y de bajo consumo energético en comparación con los procesos de lodos activados. Los reactores UASB permiten una significativa reducción de la carga orgánica contaminante, generando biogás como subproducto aprovechable. Este trabajo se centra en el diseño de la instrumentación electrónica de un reactor UASB electroquímico. Se desarrollaron circuitos de acondicionamiento de señales y fuentes de alimentación para sensores de parámetros críticos (pH y flujo de biogás) que permiten conocer el estado del reactor, utilizando componentes de bajo costo y alta disponibilidad. Esto reduce las barreras económicas para la investigación aplicada y facilita la replicabilidad del sistema de instrumentación aplicado a los reactores bioelectroquímicos en entornos académicos, lo que representa una contribución significativa al desarrollo de tecnología con potencial de escalabilidad y aplicación en contextos de alta vulnerabilidad hídrica.

Design and development of an electronic system for the control and monitoring of an electrochemical anaerobic reactor for wastewater treatment

Abstract

The growing global water crisis intensifies the need for sustainable strategies for wastewater treatment and reuse. In this context, Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors are positioned as an efficient, low-energy-consumption technology compared to activated sludge processes. UASB reactors allow for a significant reduction in organic pollutant load, generating biogas as a usable by-product. This work focuses on the design of electronic instrumentation for an electrochemical UASB reactor. Signal conditioning circuits and power supplies were developed for critical parameter sensors (pH and biogas flow) that allow the status of the reactor to be monitored, using low-cost and readily available components. This reduces the economic barriers to applied research and facilitates the replicability of the instrumentation system applied to bioelectrochemical reactors in academic environments, representing a significant contribution to the development of technology with potential for scalability and application in contexts of high-water vulnerability.

Introducción

México enfrenta actualmente graves consecuencias por el uso indiscriminado del agua debido al incumplimiento de las políticas hídricas, sumado a su insuficiencia, lo cual ha generado estrés hídrico en numerosas cuencas del país. Según datos del INEGI, solo el 40 % de las aguas residuales recibe tratamiento [1].

Los procesos industriales generan compuestos recalcitrantes que requieren tecnologías avanzadas de tratamiento, esta situación demanda infraestructura robusta para tratar la mayor cantidad de aguas residuales, reduciendo la contaminación de cuerpos receptores y aumentando la disponibilidad de agua utilizable.

El agua residual debe concebirse como un recurso valioso. Puede reutilizarse en riego agrícola, procesos industriales o, tras tratamiento adecuado, incluso para consumo humano. Además, permite obtener subproductos como fertilizantes y biogás.

En este trabajo se desarrollarán los circuitos electrónicos para los sensores que instrumentarán un reactor anaerobio electroquímico. Este sistema servirá como base para trabajos futuros realizar un prototipo de control automático que optimice las condiciones operativas, reduzca la carga contaminante y maximice la producción de biogás utilizando vinazas mezcaleras como sustrato.

La elección de este sustrato responde a la problemática observada en regiones productoras de mezcal o tequila, donde los residuos de destilación (vinazas) suelen verterse sin tratamiento a cuerpos de agua, generando contaminación significativa.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Estudios previos han establecido las condiciones operativas óptimas para reactores UASB electroquímicos. Este proyecto se enfoca en el diseño de circuitos electrónicos que permitirán, en etapas posteriores, la medición de señales para implementar un sistema de control automático. Dicho sistema optimizará las condiciones operativas, manteniendo estables las variables de proceso ante perturbaciones externas, con el objetivo de maximizar la producción de biogás (metano) y la remoción de materia orgánica contaminante.

Este diseño busca reducir los costos de instrumentación en comparación con equipos comerciales existentes, de alto valor económico. La implementación de estos circuitos facilitará, en investigaciones futuras, el control de variables como voltaje, corriente, temperatura, caudal de entrada, tiempo de retención hidráulica, pH y recirculación del sistema.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La variabilidad de ciertos parámetros puede afectar significativamente el proceso de reacción en reactores anaerobios bioelectroquímicos. La instrumentación propuesta permitirá mantener estos parámetros controlados, mejorando el rendimiento de los productos de reacción y optimizando el proceso.

Esta investigación sienta las bases para futuras propuestas de escalamiento del proceso, orientadas a la obtención de recursos energéticos aplicables a generación eléctrica. Esto abordaría uno de los principales desafíos en el tratamiento de aguas: su alta demanda energética. La implementación de esta tecnología contribuiría a reducir la contaminación de cuerpos de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

Debido a la complejidad del sistema, este trabajo se limitó al diseño electrónico de fuentes de alimentación y circuitos de acondicionamiento de señales para los sensores, el cual se orienta a la futura adquisición de datos a través de una tarjeta de adquisición de datos National Instruments®. Estos diseños permitirán, en investigaciones posteriores, la instrumentación preliminar para medir pH, controlar la temperatura del proceso, regular la velocidad de la bomba peristáltica que opere el caudal del influente y operar una fuente de corriente especializada para los electrodos de grafito del reactor bioelectroquímico.

Dada la cantidad de variables involucradas, desarrollar un sistema de control completo que mantenga los parámetros en sus puntos de operación no es viable en el corto plazo, de la misma manera, una etapa para la desulfuración y el análisis del biogás generado tampoco es viable en el corto plazo. Por lo

tanto, se propone continuar este desarrollo en un proyecto futuro.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un dispositivo electrónico de bajo costo para el control de la alimentación y monitoreo de la producción de biogas y pH de un reactor anaerobio electroquímico.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el armado, arranque y operación del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente electroquímico para el tratamiento de vinazas mezcaleras.
- Determinar la importancia de cada una de las variables de proceso (desde la perspectiva de control) del reactor anaerobio de flujo ascendente electroquímico.
- Seleccionar los sensores y actuadores necesarios para realizar el control del reactor bioelectroquímico.
- Diseñar los circuitos para el acondicionamiento de señales y fuentes de alimentación de cada sensor y actuador del reactor.

Fundamento Teórico

La implementación de sistemas de control y automatización en el tratamiento de aguas residuales no constituye una innovación reciente. Estudios previos reportan que estas estrategias incrementan la capacidad de eliminación de materia orgánica y la remoción biológica de nutrientes (BNR) en un rango de 10% a 30%.

Los avances tecnológicos y las contribuciones de investigación han permitido comprender mejor los mecanismos involucrados en la eliminación de materia orgánica y nutrientes en aguas residuales. Este conocimiento ha facilitado el desarrollo de modelos matemáticos para el control de dichos procesos [2].

2.1. CONTROL A TRAVÉS DE MODELADO EN ESPACIO – ESTADO

La elaboración de un modelo matemático para el control de un proceso físico puede estructurarse en las siguientes etapas:

- Obtener el modelo matemático que proporcione un comportamiento lo más parecido posible al proceso a controlar.
- Analizar las propiedades más importantes del proceso, utilizando el modelo que se acaba de obtener.
- Calcular un esquema de control que proporcione unas determinadas especificaciones de diseño.

Un modelo matemático adecuado puede emplear técnicas de control basadas en representación externa o en representación interna [3].

Las técnicas basadas en representación interna, como el modelado de sistemas en espacio de estado, son las más utilizadas en sistemas complejos con múltiples entradas y salidas (MIMO). Estas constituyen métodos algebraicos en el dominio temporal que facilitan el abordaje de sistemas multivariables de alta complejidad, gracias a la aplicación de álgebra lineal. Estos procesos de modelado pueden ser apoyados mediante herramientas computacionales como MATLAB.

2.1.1. Descripción de estado y variables de estado

El estado de un sistema en un tiempo t_0 es la cantidad de información en t_0 que, junto con $u_{[0,\infty)}$ determina de forma única el comportamiento del sistema para todos $t \geq t_0$ [4].

El comportamiento del sistema se refiere a todas las respuestas incluido el estado del sistema y el estado de un sistema normalmente consta de un conjunto finito de variables, las cuales se conocen como variables de estado, en la cual cada variable toma un valor del conjunto de los números reales, y el estado se puede definir como un vector que es un elemento de un espacio vectorial n dimensional real [5].

En general, una ecuación de estado n -dimensional tiene una solución numérica para cada tiempo particular t_1 . Esa solución numérica contiene n números reales que se pueden ordenar en un vector que es el elemento de un vector de espacio n dimensional real que se denomina espacio – estado [5].

2.1.2. Ecuación dinámica

El conjunto de ecuaciones que describe las relaciones únicas entre la entrada, la salida y el estado, se llama ecuación dinámica, la cual puede tener la siguiente forma [4]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= h(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= g(x(t), u(t), t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

La ecuación anterior, también se puede representar de una manera explícita:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= h_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ x_2(t) &= h_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ &\vdots \\ x_n(t) &= h_n(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ y_1(t) &= g_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ y_2(t) &= g_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ &\vdots \\ y_n(t) &= g_n(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t)\end{aligned}\tag{2.2}$$

Donde $x = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$ es el estado, $y = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_q]^T$ es la salida y $u = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_p]^T$ es la entrada. La entrada u , el estado x y la salida y , son funciones vectoriales de valor real de t definida sobre $(-\infty, +\infty)$. El espacio estado de las ecuaciones (2.1) es un espacio vectorial real n -dimensional, por lo tanto, el conjunto de ecuaciones (2.1) es llamada ecuación dinámica n -dimensional [5].

Si el sistema es lineal, h y g en las ecuaciones (2.1) se convierten en funciones lineales de x y u como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} h(x(t), u_1(t), t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ g(x(t), u_1(t), t) &= C(t)x(t) + E(t)u(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde A , B , C y E son, respectivamente, las matrices $n \times n$, $n \times p$, $q \times n$ y $q \times p$. Los valores de A , B , C y E cambian con el tiempo, por lo tanto, una ecuación dinámica continua lineal n -dimensional variante en el tiempo, tiene la forma siguiente:

$$E : \begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + E(t)u(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

En algunos casos, A , B , C y E son independientes del tiempo, por lo tanto, es una ecuación dinámica continua lineal n -dimensional invariante en el tiempo, la cual se escribe de la siguiente manera:

$$FE : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Eu(t) \end{cases} \quad (2.5)$$

2.1.3. Matriz de funciones de transferencia

Dentro del estudio de las ecuaciones dinámicas lineales n -dimensionales invariantes en el tiempo, se puede aplicar la transformada de Laplace [4]. Aplicando la transformada de Laplace en FE y

considerando que $x(0) = x_0$, obtenemos:

$$\begin{aligned} s\hat{x}(s) - x_0 &= A\hat{x}(s) + B\hat{u}(s) \\ \hat{y}(s) &= C\hat{x}(s) + E\hat{u}(s) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Donde el circunflejo sobre una variable denota la transformada de Laplace de la misma variable, por ejemplo:

$$x(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt \quad (2.7)$$

De la ecuación número (2.6) se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \hat{x}(s) &= (sI - A)^{-1}x_0 + (sI - A)^{-1}Bu(s) \\ \hat{y}(s) &= C(sI - A)^{-1}x_0 + C(sI - A)^{-1}Bu(s) + E\hat{u}(s) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Las cuales son ecuaciones algebraicas. Si el estado inicial x es 0, es decir, que el sistema se encuentra relajado en un tiempo igual a cero entonces la ecuación de la salida (2.8) anterior se reduce a lo siguiente:

$$\hat{y}(s) = [C(sI - A)^{-1}B + E]u(s) = \hat{G}(s)\hat{u}(s) \quad (2.9)$$

Donde $\hat{G}(s)$ es llamada matriz de transferencia:

$$\hat{G}(s) = C(sI - A)^{-1}B + E \quad (2.10)$$

2.1.4. Sistemas no lineales

Aunque se pueden desarrollar muchas leyes de control poderosas para sistemas lineales, la gran mayoría de los sistemas que se presentan en el mundo físico no tienen un comportamiento lineal [6]. Cualquier modelo diferencial que no se ajuste a las ecuaciones (2.4) y (2.5), se les conoce como sistemas no lineales.

2.1.5. Puntos de equilibrio

En la mayoría de los casos, la ecuación de estado está sin la presencia explícita de una entrada u , la cual es llamada ecuación de estado no forzado:

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (2.11)$$

Trabajar con una ecuación de estado forzada, no significa necesariamente que la entrada al sistema sea cero. Podría ser que la entrada se haya especificado como una función dada del tiempo $u = \psi(t)$, dada una función de retroalimentación del estado $u = \psi(x)$, o ambas $u = \psi(t, x)$. En la sustitución de $u = \psi$ se elimina u y se produce una ecuación de estado no forzado. Un caso especial de la ecuación (2.11) surge cuando la función f no depende explícitamente del tiempo t , esto es:

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.12)$$

En cuyo caso se dice que el sistema es autónomo invariante en el tiempo. En caso contrario, si el sistema no es autónomo, a éste se le denomina sistema no autónomo variante en el tiempo [4].

Un concepto importante al tratar con la ecuación de estado es el concepto de punto de equilibrio, también llamado punto fijo [4].

Un punto $x = x^*$ el espacio estado, se dice que es un punto de equilibrio de la ecuación (2.11) si tiene la propiedad de que siempre que el estado del sistema comienza en x^* este permanecerá en x^* para todo el tiempo futuro. Para el sistema autónomo (2.13), los puntos de equilibrio son las raíces reales de la ecuación:

$$f(x) = 0 \quad (2.13)$$

un punto de equilibrio puede ser aislado; es decir, no hay otros puntos de equilibrio en sus proximidades o podría haber un conjunto continuo de puntos de equilibrio [5].

2.2. MEZCAL Y VINAZAS MEZCALERAS

De acuerdo con la NOM-070-SCFI-2016, el mezcal es una bebida alcohólica destilada mexicana, elaborada con 100% de maguey o agave, obtenida mediante la destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos de cabezas maduras de magueyes o agaves previamente cocidos y cosechados en el territorio nacional [7].

Como resultado de este proceso de destilación, se genera un residuo líquido denominado vinaza, de color marrón, con olor característico a caramelo-alcohol, pH ácido y alta carga orgánica, la cual se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1: *Vinaza cruda de mezcal*

Las vinazas son un subproducto líquido de la destilación del alcohol, principalmente de la producción de etanol a partir de caña de azúcar (en la industria de biocombustibles y bebidas alcohólicas). También se generan en la destilación de vino, cerveza y otros fermentados. Su composición está entre 93-97% de agua, materia orgánica, sólidos suspendidos y algunos compuestos inorgánicos. Las vinazas suelen ser ácidas (pH entre 3 y 5) con una alta carga contaminante (DQO entre 40,000 – 100,000 mg/L) [8].

Se considera un problema de importancia, ya que, por cada litro de mezcal producido, se generan de 10 a 15 L de vinaza, la cual, en algunos casos es desechada sin ningún tratamiento directamente a cuerpos de agua o suelo. Debido a la alta DQO, se produce eutrofización, lo cual provoca una alta mortandad de

la vida acuática en ríos, acuíferos y lagunas; por otra parte, en suelos, la acidez y alta carga orgánica contaminante, provoca la erosión y degradación del suelo, por lo cual es un problema ambiental que requiere atención inmediata [9].

La mayoría de los casos donde se descarga directamente, corresponden a mezcaleras artesanales, por lo cual no existe un monitoreo adecuado de las descargas, derivando en que se agrave más el problema.

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestran las características fisicoquímicas de distintos tipos de vinazas:

Tabla 2.1: *Parámetros fisicoquímicos de distintas vinazas*

Parámetro	Tequila	Etanol	Cerveza	Vino	Mezcal
pH	3.9	4.83	6.0	3.76	3.78 ± 0.17
Alcalinidad (mg $CaCO_3/L$)	510	-	2,450	-	-
Ácidos grasos volátiles (mg/L)	-	1360	-	-	9,615
DQO (mg/L)	37,000	65,180	5,340	15,000 – 16,500	$61,169 \pm 12,091$
Nitrógeno Kjeldahl (mg NH_3/L)	243	-	-	-	-
Nitritos (mg/L)	-	-	0.37	-	70
Nitratos (mg/L)	-	-	4.30	-	90
Sólidos totales (mg/L)	16,920	56,230	5,698	-	$265,726 \pm 454,346$
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	338	3,240	-	-	$41,106 \pm 38,226$
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	297	43,330	1,090	-	$2,966 \pm 3,364$
Ortofosfatos (mg/L)	-	-	23	-	-
Conductividad (mS/cm)	4.1	-	1.52	-	4.2 ± 1.6

[8]

2.3. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La eliminación de materia orgánica puede realizarse mediante diversos métodos, entre los que destacan la digestión anaerobia y los procesos aerobios. Los primeros se desarrollan en ausencia total de oxígeno, permitiendo que los microorganismos obtengan energía para su crecimiento mediante la descomposición de la materia orgánica, sin embargo, estos requieren tener un flujo constante de aire, lo cual propicia que los costos operativos se eleven, además de generar una gran cantidad de lodo residual.

Entre las ventajas de los procesos anaerobios se encuentra la menor producción de biomasa residual y su conversión en biogás, compuesto principalmente por dióxido de carbono, metano, ácido sulfhídrico y trazas de hidrógeno [10].

La descomposición anaerobia es aplicable a compuestos orgánicos que contienen oxígeno en sus moléculas, mediante reacciones como desnitrificación de nitratos, hidrólisis, fermentación acetogénica y fermentación metanogénica [10].

Este proceso comprende reacciones bioquímicas interconectadas, mostrando alta complejidad y sensibilidad a las condiciones ambientales del reactor. De forma general, la descomposición anaerobia puede dividirse en dos etapas:

- Fermentación de ácidos
- Fermentación de metano

La fermentación metanogénica es realizada por microorganismos que requieren condiciones estrictamente anaerobias. En esta etapa, los productos de la fermentación ácida se convierten principalmente en una mezcla de metano ($2/3$ partes) y dióxido de carbono ($1/3$ parte). Dado que estos productos no pueden ser utilizados por otras bacterias, los gases resultantes pueden separarse para su aprovechamiento o

tratamiento posterior [10].

Entre las principales bacterias metanogénicas se encuentran:

- *Methanobacterium*
- *Methanococcus*
- *Methanosarcina*
- *Methanobacillus*

En esta segunda etapa del proceso anaerobio, se produce la estabilización y remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), ya que las bacterias metanogénicas utilizan productos de la fermentación ácida (ácido acético, fórmico, propiónico y metanol) como fuente de energía para su mantenimiento y desarrollo. Como resultado de este proceso se genera biogás, cuyo esquema de producción se presenta en la Figura 2.2 [11].

La operación adecuada de este tipo de reactores requiere considerar todas las características y parámetros relevantes, ya que una mínima perturbación puede causar la muerte de los microorganismos. Esto puede derivar en la detención completa de la reacción (inhibición), generando productos indeseables y un tratamiento de aguas residuales ineficaz.

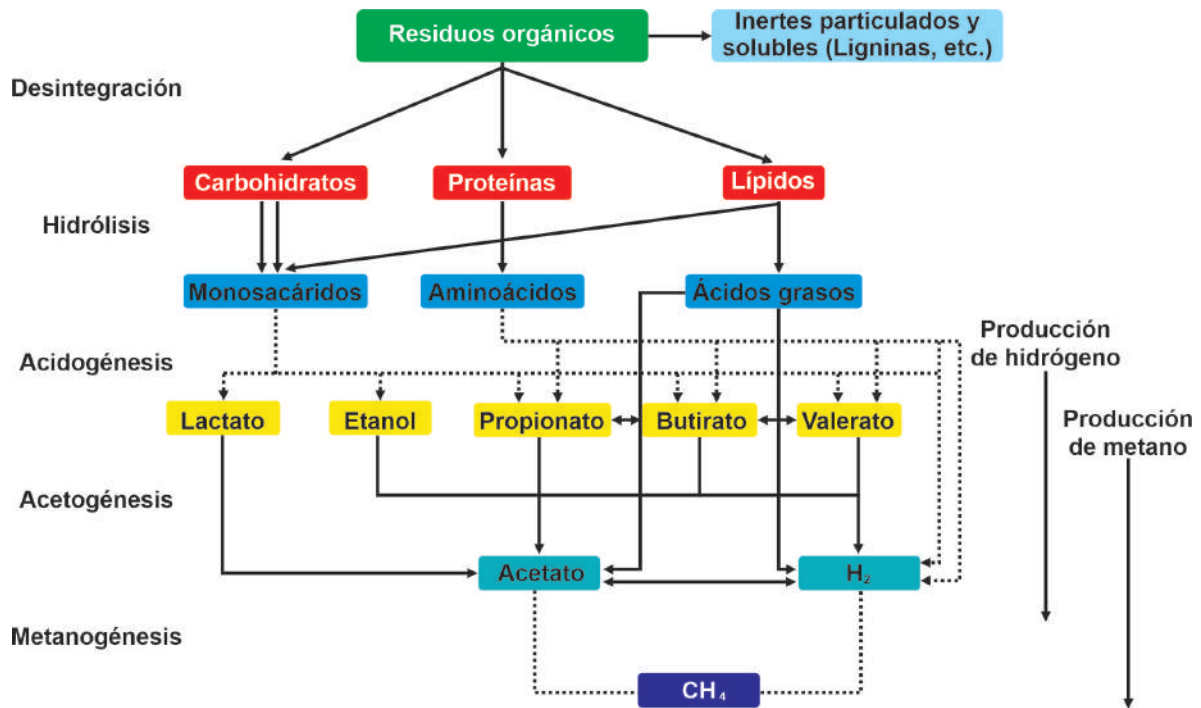
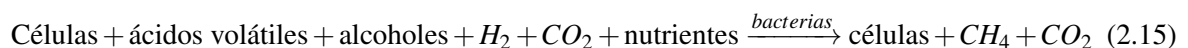
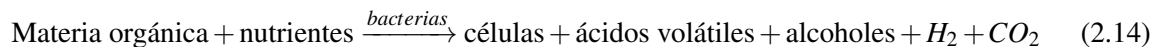


Figura 2.2: Etapas de la digestión anaerobia

La literatura especializada identifica parámetros críticos para el control de estos procesos. Dado el lento crecimiento de las bacterias metanogénicas, se requiere un tiempo de retención hidráulica entre 2 y 20 días para asegurar su desarrollo y evitar su lavado del sistema. Adicionalmente, deben controlarse los siguientes parámetros: pH (6.5 - 7.5), temperatura (32 - 38 °C) y una relación DBO/N/P de 100/5/1 para el desarrollo bacteriano adecuado [10].

Las ecuaciones químicas que resumen el proceso anaerobio se presentan a continuación:



2.3.1. Condiciones ambientales

Para un desarrollo microbiano adecuado en procesos biológicos, es esencial proporcionar las siguientes condiciones óptimas:

- Nutrientes suficientes
- Condiciones ambientales apropiadas
- Ausencia de compuestos tóxicos

Las bacterias requieren principalmente carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno; en menor medida fósforo, azufre, potasio, calcio, hierro y magnesio; y trazas de zinc y molibdeno. Las aguas residuales municipales generalmente contienen estos nutrientes, pero las industriales suelen presentar compuestos recalcitrantes que dificultan su degradación biológica. Para estos casos, se requiere un pretratamiento fisicoquímico que elimine estas sustancias, ya que pueden resultar tóxicas e inhibir los procesos de tratamiento [10].

En los procesos anaerobios, los parámetros operativos deben controlarse según los microorganismos presentes. Factores ambientales como temperatura, grado de mezcla y ausencia total de oxígeno son cruciales para mantener condiciones óptimas que permitan la metabolización de contaminantes y la reducción de la carga orgánica [10].

2.3.2. Reactor anaerobio de flujo ascendente

El reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) fue desarrollado en los Países Bajos por Lettinga y colaboradores. Este diseño no requiere soportes para la biomasa ni consumo de oxígeno, lo que representa importantes ahorros en costos operativos y de diseño [12].

Los reactores UASB presentan amplia aplicabilidad en tratamiento de aguas residuales, aunque requieren un acondicionamiento previo del afluente para ajustar los parámetros operativos. Esta preparación permite la conversión de materia orgánica biodegradable en biogás y la reducción de contaminantes [13].

Estos reactores constan de tres zonas principales, como se ilustra en la Figura 2.3 [14]:

- Cama de lodos
- Manto de lodos
- Separador de fases sólido gas líquido

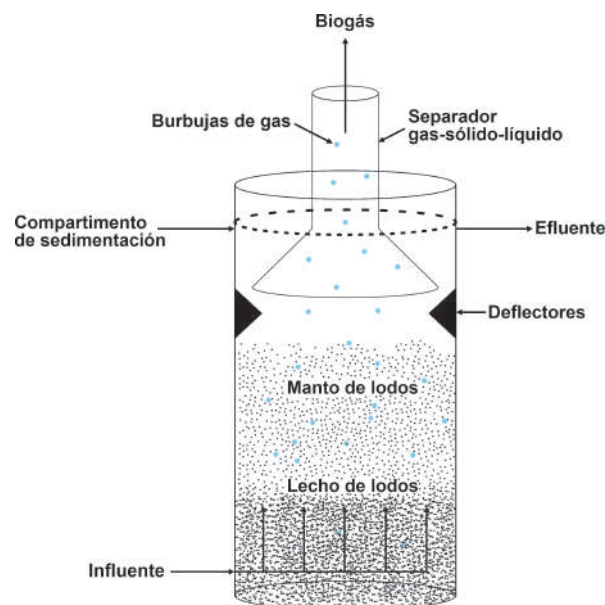


Figura 2.3: Esquema de un reactor UASB

El proceso de degradación anaerobia comprende cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [15]. En esta última, la materia orgánica se convierte en biogás, aprovechable para generación energética mediante cogeneración.

El reactor UASB consiste en un tanque rectangular o circular donde el agua residual ingresa por la base y fluye ascendiendo a través de un lecho de lodos anaerobios, el cual ocupa aproximadamente la mitad

del volumen del reactor. Este lecho está compuesto por flóculos altamente sedimentables donde ocurre la conversión de materia orgánica en biogás. Las burbujas de gas ascienden hacia la parte superior, separándose del líquido, y son recolectadas en un domo cónico invertido para su extracción [16].

Aunque el mecanismo de formación de lodo no se comprende completamente, se ha observado que aguas residuales diluidas (SST menor que 1000 - 2000 mg/L) favorecen el desarrollo de un lecho de lodos de mejor calidad. Según Lettinga y Hulshoff, la eficiencia del sistema UASB no depende de si el lodo es granular o floculento [12].

Una ventaja significativa de los reactores UASB es la producción de lodo granular que se retiene eficientemente en el sistema, permitiendo mayores tiempos de retención de biomasa. Esto mejora la degradación de materia orgánica y la producción de metano [10].

La estructura granular depende de la naturaleza del sustrato. La bacteria acetoclástica *Methanotrix* destaca por su capacidad para formar gránulos de alta calidad donde ocurren las reacciones microbiológicas, favoreciendo la sedimentación del lodo, mejorando la retención hidráulica y reduciendo costos operativos. Estos reactores son particularmente efectivos para aguas residuales ricas en carbohidratos, como las provenientes de industrias de almidón, azúcar, papa, cervecerías y papel [10].

2.3.3. Reactores electroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos emplean microorganismos para catalizar reacciones de óxido - reducción mediante electrodos (ánodo y cátodo) conectados por un circuito eléctrico. Cuando el sistema genera energía eléctrica, se denomina celda de combustible microbiana; cuando requiere energía eléctrica externa, se designa celda de electrólisis microbiana [17].

La función principal de los reactores electrolíticos en el tratamiento de aguas residuales es la oxidación

de materia contaminante mediante reacciones de óxido-reducción, generando productos de menor impacto ambiental [18].

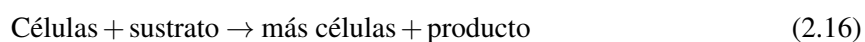
Los parámetros críticos para la selección de materiales de electrodos incluyen estabilidad físico - química, conductividad, capacidad catalítica y, especialmente, altos sobrepotenciales para la oxidación del agua [18].

2.3.4. Biorreactores

Un biorreactor es un sistema que mantiene condiciones para el desarrollo de células. Las reacciones bioquímicas celulares son catalizadas por enzimas que intervienen en el metabolismo, permitiendo la obtención de energía, la síntesis de compuestos esenciales y la degradación de componentes celulares. Dado el papel central de las reacciones enzimáticas en sistemas biológicos, es fundamental considerar la ecuación de Monod, que describe la cinética de crecimiento bacteriano de manera análoga a la ecuación de Michaelis - Menten [19].

Durante la biosíntesis, los microorganismos (biomasa) utilizan nutrientes para proliferar y generar productos metabólicos mediante reacciones enzimáticas secuenciales. Estos metabolitos pueden permanecer intracelulares o secretarse al medio. En el primer caso, es necesario provocar la lisis celular y purificar el producto a partir del medio de reacción [19].

Entre los modelos cinéticos para el crecimiento celular se encuentran:



sin embargo, la expresión más utilizada es la ecuación de Monod para el crecimiento exponencial:

$$\mu = \mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s} \quad (2.17)$$

Donde:

μ = velocidad de crecimiento específico

μ_{max} = velocidad de reacción específica de crecimiento máxima

K_s = constante de Monod

C_s = concentración de sustrato

2.3.5. Biorreactores electroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos utilizan microorganismos para catalizar reacciones de óxido-reducción mediante electrodos, clasificándose en dos tipos: las Celdas de Combustible Microbianas (CCM), que generan energía eléctrica, y las Celdas de Electrólisis Microbiana (CEM), que requieren un suministro externo de energía [17].

La aplicación de procesos electrolíticos en el tratamiento de aguas residuales permite la oxidación o reducción de contaminantes hacia formas menos peligrosas. Se recomienda que los efluentes industriales presenten concentraciones de DQO entre 0.01 - 0.1 kg/m^3 y 10-20 kg/m^3 para un tratamiento eficiente [12].

Las CCM emplean microorganismos viables como biocatalizadores que metabolizan diversas fuentes orgánicas. Estos organismos transforman la energía de los enlaces químicos en corriente eléctrica, simultáneamente degradando contaminantes en sustratos como aguas residuales [20].

La actividad metabólica bacteriana en el ánodo genera un biopotencial que produce electricidad y los microorganismos electroquímicamente activos oxidan residuos orgánicos, liberando electrones hacia el

ánodo y creando una fuente de energía [20].

Los microorganismos exoelectrogénicos donan electrones, mientras que los exoelectrotróficos los aceptan [20].

Las CCM constan de dos cámaras (anódica y catódica) separadas por una membrana de intercambio protónico (mostrada en la Figura 2.4 [21]). En el ánodo, microorganismos electroactivos degradan materia orgánica, generando electrones que fluyen al cátodo a través de un circuito externo. Simultáneamente, los protones migran hacia el cátodo donde, combinados con oxígeno y electrones, producen agua [22].

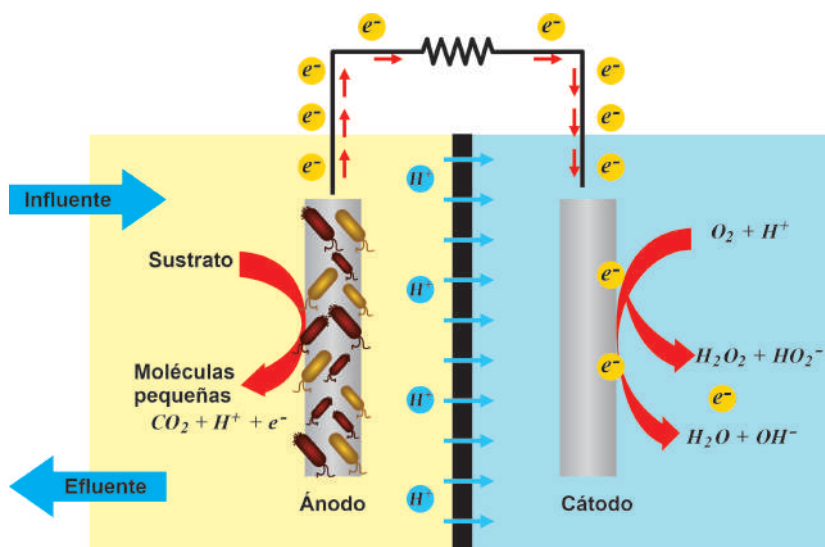


Figura 2.4: Celda de combustible microbiana

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) presentan limitaciones importantes para su implementación comercial. La primera consiste en el agotamiento del sustrato por parte de las bacterias, lo que interrumpe la generación de energía después de un tiempo determinado. La segunda se refiere al bajo voltaje generado, insuficiente para aplicaciones a escala industrial [23].

La Celda de Electrólisis Microbiana (CEM) es una tecnología derivada de las CCM que permite producir biocombustibles y energía a partir de materia orgánica, como aguas residuales [24].

Una CEM de dos cámaras consta de los compartimentos anódico y catódico, separados por una membrana de intercambio iónico (aniónico o catiónico) y requiere una fuente de alimentación externa (mostrada en la Figura 2.5 [25]). En el ánodo, cepas exoelectrogénicas forman biopelículas electroactivas que producen electrones, protones y dióxido de carbono. Los electrones fluyen al cátodo a través de un circuito externo, mientras los protones migran mediante la solución. En el cátodo, estos componentes se recombinan para generar hidrógeno, o bien, el dióxido de carbono y protones forman metano y agua [24].

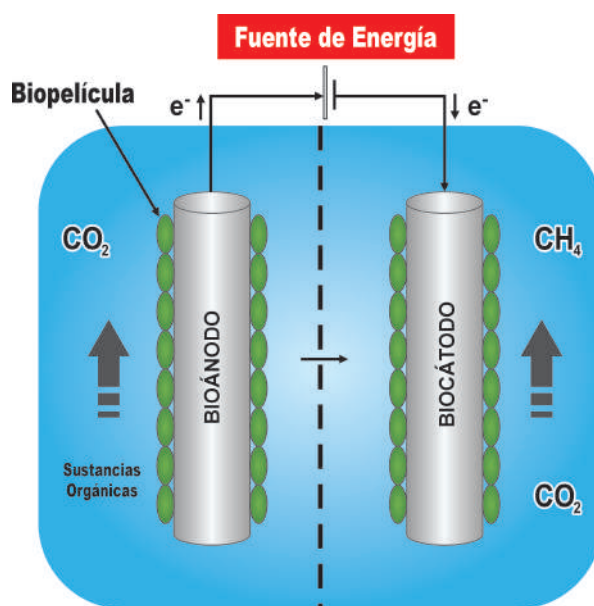


Figura 2.5: Celda de electrólisis microbiana

Sin embargo, las CEM presentan una limitación fundamental: el potencial catódico superior al anódico impide el flujo espontáneo de electrones hacia el cátodo. Para superar esta barrera, es necesario aplicar un voltaje externo de 0.2 - 0.8 V que favorezca la migración electrónica [24].

En síntesis, las CEM constituyen una adaptación de las CCM donde se emplea un voltaje externo (0.2 - 0.8 V) para superar la barrera termodinámica de las reacciones bioquímicas. Es crucial que este voltaje no exceda 1.23 V, umbral en el que ocurre la electrólisis del agua [26, 27].

2.3.6. Lodo granular

Los reactores anaerobios de flujo ascendente generan lodo granular con características distintivas respecto a los lodos floculantes de sistemas aerobios. Este lodo presenta alta sedimentabilidad, facilidad de manejo y capacidad para remover aproximadamente 80 % de la DQO en aguas residuales [28].

Ante condiciones variables en el reactor, los microorganismos forman gránulos como estrategia de supervivencia. Estos constituyen microecosistemas simbióticos con resistencia a condiciones adversas [29]. Los factores que regulan su selección y formación son los siguientes:

- Características del sustrato
- Compresión gravitacional del lodo
- Tasa superficial de liberación del biogás
- Condiciones para el crecimiento de bacterias metanogénicas
- Velocidad del flujo ascendente

La compresión gravitacional promueve la agregación microbiana en gránulos de 2 a 8 mm de diámetro, como se ilustra en las Figuras 2.6 [30] y 2.7 [28, 30].

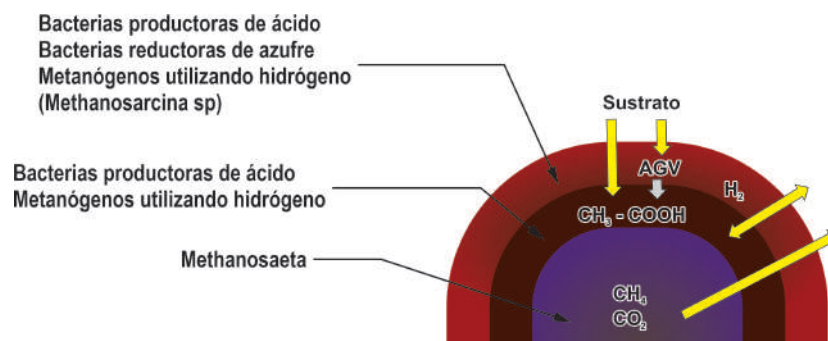


Figura 2.6: Estructura del lodo granular



Figura 2.7: *Lodo granular anaerobio*

La Carga Orgánica Volumétrica (COV) es otro parámetro crucial para la formación de gránulos. Según Rojas [31] y Tay [32], estos se desarrollan con COV entre $2.5 - 15 \text{ kgDQO}/\text{m}^3 \text{ día}$. No obstante, valores superiores incrementan el crecimiento de biomasa, lo que puede debilitar la estructura granular [31,32].

2.3.7. Parámetros que afectan la digestión anaerobia

De acuerdo con el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, los parámetros de control operativo en procesos anaerobios se clasifican en físicos y químicos, siendo los más relevantes: pH, temperatura, carga orgánica volumétrica, tiempo de residencia hidráulica y producción de biogás [30].

2.3.8. pH

El pH es un parámetro crítico que determina el tipo de bacterias predominantes en el sistema. En un rango de 5.0 a 6.5 se desarrollan bacterias productoras de hidrógeno, mientras que entre 6.5 y 7.5 proliferan las metanogénicas. El control del pH es esencial para la metanogénesis, ya que la acumulación

de ácidos grasos volátiles (AGV) y CO_2 puede acidificar el reactor, inhibiendo el proceso [12, 30].

El pH puede regularse mediante la adición de sustancias alcalinas o mediante recirculación del efluente neutralizado, lo que alcaliniza el influente [12].

2.3.9. Temperatura

La temperatura es un parámetro fundamental que regula la actividad de los microorganismos anaerobios. Estos se clasifican en tres categorías según su rango de temperatura óptimo:

- Psicrófilos (15 a 25 °C)
- Mesófilos (25 a 45 °C)
- Termófilos (45 a 65 °C)

El rango mesófilo favorece una mayor población de microorganismos metanogénicos y reduce la proporción de dióxido de carbono en el biogás.

No se recomienda incrementar la temperatura en procesos mesofílicos establecidos, ya que este cambio deteriora los microorganismos y aumenta la concentración de amoníaco, compuesto que inhibe la actividad microbiana [30, 33].

2.3.10. Carga orgánica volumétrica

La carga orgánica volumétrica (COV) representa la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen del reactor. En ausencia de inhibidores, valores elevados de COV incrementan la

producción de metano, pero también elevan el riesgo de sobrecargas que pueden acidificar el sistema, inhibiendo el proceso biológico [34]. Este parámetro se calcula mediante la ecuación 2.18.

$$COV = \frac{Q * S_o}{V_r} \quad (2.18)$$

Donde:

COV = carga orgánica volumétrica

S_o = concentración de DQO a la entrada del reactor

V_r = volumen del reactor

2.3.11. Tiempo de Retención Hidráulico

El tiempo de retención hidráulico (TRH) corresponde al período que el agua residual permanece en el reactor. Este parámetro debe ser suficiente para garantizar un tratamiento adecuado y puede calcularse mediante la ecuación 2.19.

$$TRH = \frac{V_r}{Q} \quad (2.19)$$

Donde:

TRH = tiempo de retención hidráulico

Q = caudal

V_r = volumen del reactor

2.3.12. Demanda Química de Oxígeno

Este parámetro analítico de contaminación cuantifica el oxígeno consumido durante la oxidación de materia orgánica e inorgánica mediante un agente oxidante fuerte en medio ácido, presente en una muestra de agua. Indica el potencial contaminante de un efluente. A mayor DQO, mayor es el impacto sobre los cuerpos de agua por consumo de oxígeno disuelto (OD). Además, las vinazas mezcaleras tienen una de las DQO más altas entre los residuos agroindustriales [10].

2.3.13. Biogás de reactores anaerobios

El biogás producido en los reactores anaerobios es una mezcla mayormente de CH_4 y CO_2 , además de gases traza de H_2 y H_2S , este último es corrosivo, por lo cual se requerirá de una etapa de desulfuración del biogás para eliminar este gas indeseable, ya que puede dañar algunos instrumentos del reactor, incluso, si hay una cantidad elevada de este, indica que existen problemas en la operación del reactor o una probable inhibición [30].

2.3.14. Producción de biogás

La producción de biogás es un parámetro fundamental para monitorear la estabilidad operativa del reactor anaerobio. Una disminución en su volumen puede indicar problemas como exceso de ácidos grasos volátiles (AGV) o la presencia de inhibidores que afectan el metabolismo de las bacterias metanogénicas [30].

Estado del Arte

El modelado de sistemas anaerobios presenta una complejidad significativa debido a la multiplicidad de variables involucradas en los procesos microbiológicos. Entre estos factores se incluyen fenómenos de transferencia de fase, equilibrio iónico, el estado fisiológico de las bacterias, entre otros parámetros de relevancia. Según la International Water Association (IWA, por sus siglas en inglés), el modelado de tales sistemas requiere considerar numerosas variables de estado. El modelo desarrollado por esta institución incorpora 26 variables de estado y 8 variables algebraicas implícitas, totalizando un sistema de 32 variables [35]. No obstante, esta complejidad resulta excesiva para implementar esquemas de control automático, por lo que se requieren modelos simplificados que capturen adecuadamente la dinámica del sistema y permitan aplicar técnicas de control que mantengan su estabilidad operativa.

Con base en lo anterior, se propone un modelo matemático fundamentado en una reacción global donde las bacterias se representan como sólidos suspendidos volátiles (SSV), responsables de degradar la materia orgánica caracterizada como demanda química de oxígeno (DQO) [36].

Las ecuaciones dinámicas de las variables de estado del sistema son:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) - Y\mu X \quad (3.1)$$

$$\frac{dX}{dt} = D(X_0 - (1 - \eta)X) + \mu X \quad (3.2)$$

Donde:

S = concentración de DQO a la salida del reactor.

S_0 = concentración de DQO a la entrada del reactor

X = concentración de SSV en el reactor

X_0 = concentración de SSV a la entrada del reactor

D = factor de dilución

Y = factor de rendimiento del sustrato

μ = velocidad de crecimiento microbiano

η = eficiencia de sedimentación del separador

El modelo matemático se desarrolló mediante balances de materia, definiendo tres variables de estado: biomasa (SSV), sustrato (DQO) y ácidos grasos volátiles (AGV).

Cabe destacar que los procesos biológicos presentan inherentemente un alto grado de incertidumbre, lo que exige implementar estrategias alternativas para determinar las variables de estado del sistema. Cuando existe cierto conocimiento sobre la cinética del proceso, pueden aplicarse técnicas de identificación de parámetros cinéticos o realizarse estimaciones de estado sin requerir dichos parámetros [37].

Entre las técnicas de estimación más utilizadas se encuentran los observadores de estado, que determinan el estado del sistema a partir de sus entradas y salidas. Cuando las condiciones iniciales son

desconocidas, pueden emplearse el observador de Luenberger o el filtro de Kalman extendido para la estimación [36].

No obstante, la incertidumbre no se limita a las condiciones iniciales. Los procesos biológicos presentan además un grado significativo de incertidumbre en la cinética de reacción y en las variables de entrada, lo que genera dificultades persistentes para la medición de parámetros confiables [38].

3.1. ARRANQUE Y MONITOREO DE UN REACTOR UASB

El arranque de un reactor anaerobio requiere llenar el sistema con agua residual y mantener condiciones adecuadas para el desarrollo de microorganismos anaerobios, los cuales experimentan un período de transición inicial caracterizado por diversas inestabilidades operacionales.

Para que un reactor anaerobio de flujo ascendente alcance un estado estable, es necesario controlar las condiciones internas que favorezcan la actividad microbiana y mantener un tiempo de retención hidráulica adecuado. Un parámetro fundamental es la producción de metano, dado su vínculo con la estabilidad del reactor [12]. Una producción elevada de metano con baja generación de dióxido de carbono indica condiciones estables, mientras que un aumento en la concentración de dióxido de carbono evidencia un estado de inestabilidad.

La producción de biogás es crucial para garantizar una mezcla efectiva en el lecho de lodos del reactor anaerobio [39].

3.2. MONITOREO DE UN REACTOR ANAEROBIO

La operación adecuada de un reactor anaerobio requiere del monitoreo constante de la estabilidad del proceso y de la eficiencia en la remoción de materia orgánica. La primera garantiza una producción óptima de metano, mientras que la segunda asegura la eliminación efectiva de contaminantes en el agua residual.

El tiempo requerido para alcanzar la estabilidad operacional depende del uso de inóculo durante el arranque. Según Alayón [30,40], los reactores que emplean inóculo se estabilizan en uno a dos meses, mientras que aquellos que operan sin él requieren de cuatro a seis meses.

De acuerdo con Reynoso [12], se determinó que el tiempo de retención hidráulica óptimo para la remoción de materia orgánica y producción de metano es de 3 días, con un voltaje aplicado a los electrodos de 0.5 V. Bajo estas condiciones, se logra una eliminación del 90 - 94 % de DQO y una producción de 18.6 L de biogás con 69 % de metano.

3.3. ESTABILIDAD DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fonseca y Zaiat [41] mencionan que es de vital importancia de mantener estables los procesos de tratamiento de agua residual, a través de un monitoreo adecuado para maximizar los rendimientos, sin embargo, los equipos para lograrlo son de un costo elevado, lo cual es un obstáculo para que nuevos investigadores con presupuestos reducidos, realicen nuevas aportaciones a la investigación.

3.4. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS

De acuerdo con Tice [42] y Gao [43] mencionan que este tipo de procesos se proyecta que en un futuro puedan ser un método prometedor de alta recuperación energética lo que los convierte en un proceso sostenible y de autosuficiencia energética. Shinde [44], explica que la digestión anaerobia es una tecnología de suma importancia para la producción de energía obtenida a partir del biogás, pero aún se requiere de mayor investigación para lograr la rentabilidad de este tipo de tecnología. Un factor poco mencionado es que las plantas de tratamiento de aguas residuales contribuyen al cambio climático al emitir gases de efecto invernadero, por lo cual, según explica Milani [45], los sistemas anaerobios permiten aumentar la recuperación energética y disminuyen a su vez en la emisión de gases de efecto invernadero.

3.5. SENSORES DE BAJO COSTO

Autores como Mahmed [46], Navoneel [47] y Desteffani [48], utilizan sensores de mucha precisión, sin embargo, todos estos son de un costo bastante elevado, por ejemplo, Küçükağa [49], menciona que existen diversos reactores y tecnología en el mercado lista para usarse, pero, tienen un elevado costo, lo que provoca que no exista un acceso para muchos estudiantes o investigadores, entonces es necesario generar proyectos para abrir el panorama de la investigación proporcionando instrumentos de bajo costo que permitan crear nuevas investigaciones. Theodosi [50], implementó un sistema de control utilizando un controlador lógico programable (PLC) conectándolo con los sensores de pH, nivel y ORP, utilizando también un analizador de biogás (todos de marca reconocida, tales como Hanna Instruments), lo que muestra a su vez que estos instrumentos son de un costo elevado. D' Ausilio [51], menciona que la mayoría de los equipos de medición suelen ser muy caros, por lo cual es útil generar proyectos con instrumentos accesibles y de bajo costo garantizando que se pueda generar más investigación y de

mayor calidad.

3.6. UTILIZACIÓN DE ARDUINO® EN PROCESOS ANAEROBIOS

Robles [52], presenta el control del proceso para un reactor anaerobio de flujo ascendente controlando solo dos variables (TRH y temperatura) mediante la utilización de una placa Arduino® además de utilizar actuadores de bajo costo. Por otra parte, Ahmed [53], utiliza el microcontrolador Arduino® para controlar la producción de metano en un reactor anaerobio de flujo ascendente, utilizando también un sensor de bajo costo (sensor de metano MQ-2).

Gómez [54], a su vez, implementó un sistema de control automático utilizando también la placa Arduino® aplicando energías renovables en el control de un reactor anaerobio de flujo ascendente.

Flores [55], utilizó la placa Arduino® para desarrollar un dispositivo de bajo costo que permite a los investigadores con presupuestos limitados, lograr investigaciones eficientes y precisas, lo cual fomenta la investigación multidisciplinaria.

3.7. VARIACIONES DE CORRIENTE Y VOLTAJE EN PROCESOS ANAEROBIOS ELECTROQUÍMICOS

Ya que el rango de operación para los electrodos donde se evita la lisis celular que desencadene la inhibición de la reacción está entre 0.2 a 0.8 V y 0.2 a 10 mA según Ding [56].

Según Baek [57], existen estudios donde se aplican voltajes mayores del rango mencionado por Ding [56] en las celdas de electrólisis microbianas, los cuales provocan la inhibición de los microorganismos

metanogénicos. Ndayisenga [58] menciona que la eficiencia de remoción de DQO aumenta con el voltaje aplicado a la celda de electrólisis microbiana hasta el límite de 0.8 V, donde esta eficiencia disminuye, además menciona que el biofilm sufrió un daño considerable con voltajes aplicados entre 0.5 V y 0.8V, aunque se ven menos afectadas en comparación con voltajes más elevados. A su vez Guerrero [59] menciona el rango operativo óptimo para el potencial eléctrico está entre 0.8 V y 1.1 V.

3.8. SENSOR DE PH

Ma' ruf, [60] en su investigación donde realiza el monitoreo en tiempo real de la calidad de agua, utiliza el sensor pH - 4502C y menciona que a pesar de su bajo costo este sensor muestra una excelente precisión en la medición de pH.

Ahing [61], coincide que el sensor puede que produzca errores en la medición, ya sea que este no lea correctamente el valor del pH debido a la interferencia provocada por el mismo sensor, por lo cual se requiere investigar la causa de estas variaciones hasta lograr la obtención de valores precisos.

Respecto a la calibración del sensor, Ma' ruf [60], Ahing [61] y Sitranata [62] utilizan la misma metodología para la calibración proporcionada por el fabricante del sensor pH - 4502C.

3.9. CONTROL DE LAS BOMBAS PERISTÁLTICAS

Navoneel [47] presenta el diseño de un circuito sencillo utilizando la placa Arduino®, donde usa una bomba peristáltica de 12 V, contrastando la necesidad de utilizar circuitos y materiales de bajo costo. A diferencia del trabajo del autor antes mencionado, en este proyecto se presentó un circuito mejor diseñado el cual se puede adaptar a las necesidades del usuario, ya sea realizando ajustes para aumentar

o disminuir el caudal al que necesite el usuario, esto se puede implementar en una tarjeta electrónica y posteriormente armarla con los componentes electrónicos adaptándola a un módulo realizado en una impresora 3D, con esto se reducen costos en comparación con los equipos que se ofrecen en el mercado, además, este puede controlarse a través de una DAQ o una placa Arduino®.

Por su parte, Desteffani [48] hace hincapié en la importancia de promover la fabricación de dispositivos de bajo costo el cual promueve un mayor acceso que permitirán que más investigadores logren realizar aportaciones, además, de permitir que esta tecnología pueda ser incluida en las aulas para preparar a futuros ingenieros con más herramientas para solucionar problemas reales que necesitan solución en ingeniería, creando productos de valor agregado y disminuyendo la dependencia tecnológica de otros países.

3.10. LABVIEW® COMO HERRAMIENTA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL

La utilización del software LabVIEW® no se tomó de manera arbitraria, ya que este se puede utilizar para la adquisición de datos mediante una tarjeta DAQ de la marca National Instruments® o se puede utilizar algún otro microcontrolador como Arduino® como un equivalente a una tarjeta de adquisición de datos, además, LabVIEW® también se puede utilizar para realizar un control preliminar de procesos, tal como Mahmed [46] menciona como aplicó este software para la adquisición de datos para la evaluación de producción de biogás, el cual es un proyecto bastante similar a este.

Metodología propuesta

El desarrollo de este trabajo propuso llevarlo a cabo en 5 etapas:

- Identificación de las variables críticas del proceso con base en la literatura especializada.
- Armado, arranque y operación del reactor.
- Selección de los sensores apropiados para medir variables de proceso.
- Propuesta de diseño y simulación de los circuitos de acondicionamiento de señales y fuentes de alimentación en el Software Multisim® para cada uno de los sensores y actuadores.
- Implementación de los circuitos en una protoboard, integrando sensores y actuadores para verificar su funcionamiento. Esta etapa de prototipaje es el paso previo fundamental para el diseño de las tarjetas electrónicas definitivas que se integrarán en el reactor

4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL REACTOR

El reactor bioelectroquímico anaerobio de flujo ascendente, el cual está fabricado de acrílico, se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2, consta de dos partes principales, las cuales se adhieren mediante una unión tipo brida. El reactor cuenta con un volumen útil de 14.924 L, el cual tiene medidas de 16 x 16 x 58.3 cm.

La sección inferior del reactor incluye las conexiones de entrada para el influente y la recirculación. En su interior se alojan un espacio donde será colocado el lecho de lodo granular y la cámara para los electrodos de grafito tipo escobillón, los cuales serán el ánodo y cátodo y estarán separados por una sección de fibra de vidrio para evitar el contacto entre los electrodos.

La parte superior integra tres salidas: recirculación, efluente y punto de muestreo del biogás. Además, incorpora dos deflectores (uno a 30° y otro a 45°) los cuales se utilizan para sedimentar los lodos y separar de burbujas de biogás. Además, junto al punto de muestreo del biogás, hay un puerto para la introducción de los cables de titanio que estarán conectados a una fuente de corriente constante para mantener activas las reacciones bioelectroquímicas, dicha fuente será diseñada en el apartado correspondiente.

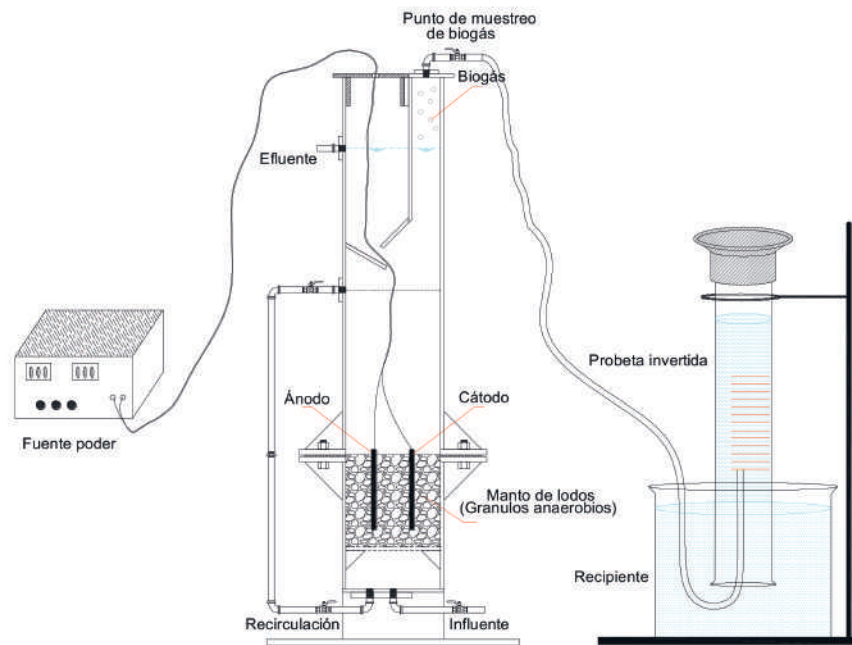


Figura 4.1: Esquema de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente electroquímico [12]



Figura 4.2: Fotografía de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente electroquímico

4.2. ARMADO DEL REACTOR

Primero, se cortó una sección de neopreno del tamaño de la sección transversal del reactor (Figura 4.3) para sellar la unión tipo brida. Los orificios para los tornillos se realizaron coincidiendo con su diámetro, eliminando el excedente de material para prevenir fugas.



Figura 4.3: Sección de neopreno

Se cortó e instaló una sección de fibra de vidrio (Figura 4.4) en el fondo del reactor para evitar contacto entre electrodos. Adicionalmente, se cortaron mangueras Masterflex® para la bomba peristáltica de la misma marca.



Figura 4.4: Sección de fibra de vidrio

Los cables de titanio se introdujeron por la entrada superior, asegurando que no presentaran partes expuestas dentro del reactor y manteniendo la separación adecuada para prevenir cortocircuitos.

Posteriormente, se fijaron los cables a los electrodos de grafito tipo escobilla (Figura 4.5), garantizando un contacto firme y permanente, considerando que el sistema no permite modificaciones posteriores al cierre del reactor.

Finalmente, se conectaron las mangueras y válvulas en la entrada y línea de recirculación, como se muestra en la Figura 4.6.

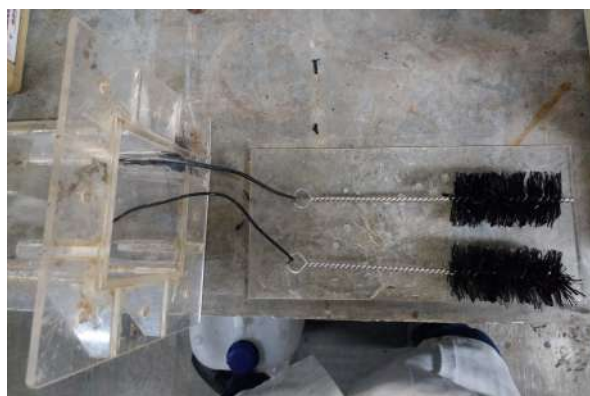


Figura 4.5: *Electrodos de grafito tipo escobillón*



Figura 4.6: *Conexión de válvulas y mangueras de entrada y recirculación*

4.2.1. Inoculación del reactor

Se tomó una muestra de 4 L de lodo granular previamente aclimatado a temperatura ambiente, tras su almacenamiento en cámara frigorífica a 4 °C.

Se instaló la fibra de vidrio en la base del reactor para dividir el espacio en dos cámaras. Posteriormente, se cargó lodo granular manteniéndolo húmedo hasta alcanzar un nivel situado 2.5 cm por debajo del límite inferior del reactor.

Los electrodos se introdujeron en el lodo granular asegurando la separación entre ellos y verificando que los cables permanecieran aislados (Figura 4.7).



Figura 4.7: *Inoculación del reactor*

Se aplicó una capa de silicón de aproximadamente 2.5 cm de espesor en los bordes superior e inferior del reactor y de la junta de neopreno. Posteriormente, se unieron ambas secciones del reactor insertando los tornillos y tuercas correspondientes, los cuales se apretaron hasta lograr un sellado completo (Figuras 4.8 4.9).



Figura 4.9: Reactor UASB electroquímico inoculado y cerrado



Figura 4.8: Reactor antes del sellado

4.3. ARRANQUE DEL REACTOR

4.3.1. Preparación del sustrato de vinaza mezcalera y llenado del reactor

Se preparó el sustrato mezclando 2 L de vinaza (Figura 4.10) con agua simple hasta alcanzar 20 L (relación 1:10), ajustando el pH a 7.0 mediante neutralización. El reactor se llenó hasta el nivel de salida del efluente y se monitorizó durante 24 horas para detectar posibles fugas (Figura 4.11).



Figura 4.10: *Vinaza de mezcal*



Figura 4.11: *Llenado del reactor UASB electroquímico con vinaza*

4.3.2. Conexiones con la bomba peristáltica

Se conectaron las líneas de influente y recirculación a la bomba peristáltica, dirigiendo el efluente al desagüe. La manguera de alimentación se sumergió completamente en el tanque de 20 L para evitar la

entrada de aire, crucial para mantener las condiciones anaerobias (Figura 4.12).



Figura 4.12: Conexiones del reactor UASB electroquímico

4.3.3. Aforo del caudal

Se desconectó la línea de influente para realizar el aforo de caudal, eliminando previamente las burbujas de aire del sistema al encender la bomba.

El cálculo del caudal requiere el tiempo de retención hidráulica (fijado en 3 días) y el volumen del reactor (14.93 L), determinándose mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V_{\text{reactor}}}{TRH} \quad (4.1)$$

Donde:

Q = caudal

TRH = tiempo de residencia hidráulica

V_r = volumen del reactor

A partir de la ecuación [?] se obtuvo un caudal teórico de 3.45 mL/min. Para verificar este valor experimentalmente, se encendió la bomba y se midió el tiempo desde que cae la primera gota, recolectando el efluente en una probeta graduada durante un minuto. Este procedimiento se repitió ajustando la velocidad de la bomba hasta alcanzar el caudal objetivo (Figura 4.13).



Figura 4.13: Aforo del caudal del reactor

Una vez verificado el caudal, se reconectó la línea de influente tras confirmar la ausencia de fugas o entradas de aire, dando inicio a las reacciones biológicas.

4.4. OPERACIÓN DEL REACTOR

La bomba peristáltica debe mantener operación continua. Es necesario verificar periódicamente el nivel del tanque de alimentación, pH del influente y efluente (diariamente), DQO del influente y efluente (semanalmente), y el nivel del efluente (Figura 4.14).

Un aumento en el nivel de salida indica posibles obstrucciones en el sistema de descarga.



Figura 4.14: Nivel del agua residual dentro a la salida del efluente del reactor

Es necesario mantener el tanque de alimentación a 35 °C mediante un calentador sumergido para asegurar la operación en rango mesofílico.

La operación prioriza prevenir la inhibición del proceso biológico y obstrucciones en las líneas de flujo.

Finalmente se completó el ensamblado, arranque y operación inicial del reactor UASB electroquímico para tratamiento de vinazas, identificando los parámetros críticos para su monitoreo continuo y futura instrumentación.

Posterior, se inició la selección de sensores y actuadores basado en las variables críticas identificadas.

4.5. DISEÑO ELECTRÓNICO DE LOS CIRCUITOS PARA LA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE, SENSORES Y ACTUADORES

La selección adecuada de sensores requiere comprender los principios fisicoquímicos y biológicos que rigen las reacciones bioelectroquímicas. Esto permite identificar los dispositivos necesarios para medir las variables críticas del reactor, fundamentales para su posterior instrumentación.

Es crucial considerar que, en lugar de adquirir sistemas completos (generalmente costosos), puede resultar más viable diseñar los dispositivos de sensado o adquirir únicamente los sensores básicos. Sin embargo, estos últimos suelen requerir el diseño de fuentes de alimentación y etapas de acondicionamiento de señal para una correcta adquisición de datos, los cuales se emplearán en el modelado matemático del sistema mediante representación en espacio de estado.

Para esta etapa inicial, se consideraron los siguientes sensores y dispositivos:

- Fuente de corriente constante para los electrodos.
- Sensor de micro flujo de gas.
- Sensor de pH.
- Dos bombas peristálticas (para el influente y otra para la recirculación).
- Resistencia calentadora (para mantener la reacción a 35 °C).

Durante el avance de este trabajo, se determinará la necesidad de incorporar sensores adicionales o desarrollar diseños específicos de sensado.

4.5.1. Selección del sensor de microflujo Honeywell® AWM 3150V

El sensor seleccionado, es el Honeywell® AWM 3150V [63], opera con un voltaje de alimentación de 8 a 15 V y presenta un rango de medición de 0 hasta 30 mL/min (figura 4.15).



Figura 4.15: Sensor de microflujo de biogás AWM 3150V

Para la medición de flujo se seleccionó el sensor Honeywell® AWM 3150V [63], que opera con 8 - 15 V y mide hasta 30 mL/min. Dado que el reactor genera 5 - 12 L de biogás diarios (equivalente a 3.47 - 8.33 mL/min), el sensor resulta idóneo por su adecuado rango y bajo costo.

Entre sus ventajas destacan la medición directa del flujo volumétrico en sccm (centímetros cúbicos estándar por minuto, del inglés), unidad que compensa automáticamente variaciones de temperatura y presión al reportar el volumen en condiciones estandarizadas.

Esta característica garantiza mediciones consistentes e independientes de las condiciones ambientales, confirmando su idoneidad para esta aplicación.

Otra característica es que el sensor de flujo es del tipo aire masivo tipo Microbridge, los cuales se fundamentan en la tecnología MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Estos dispositivos están diseñados para medir el caudal másico de aire u otros gases mediante el principio de convección

térmica [63].

En esencia, el sensor incorpora un elemento calefactor micro-mecanizado y pares de sensores de temperatura en la entrada y salida, formando una estructura de "puente microelectromecánico". Cuando se aplica energía al calefactor, se genera un perfil de temperatura simétrico a su alrededor. La presencia de un flujo de gas perturba este perfil, enfriando el sensor en la entrada y calentando el sensor en la salida en proporción directa al caudal másico del fluido. Esta diferencia de temperatura se traduce en una diferencia de resistencia eléctrica en los sensores de temperatura, que son configurados típicamente como parte de un puente de Wheatstone [63].

La salida desbalanceada del puente de Wheatstone es una señal de voltaje analógica de baja amplitud, la cual es proporcional al flujo másico. Esta señal es posteriormente acondicionada y amplificada por circuitos integrados específicos dentro del mismo encapsulado del sensor, entregando una salida de voltaje estable, lineal y amplificada lista para ser leída por un microcontrolador o sistema de adquisición de datos [63].

Este sensor se conectará mediante una manguera en la toma de salida de biogás, sin embargo, como se mencionó, se requerirá de una etapa para eliminar el H_2S del biogás para proteger de daños debidos a la corrosión en el sensor.

4.5.2. Selección del sensor de PH 4502 C con electrodo 201

El sensor PH - 4502C (Figura 4.16a) con electrodo 201 (Figura 4.16 c) [64] es un módulo galvánico que mide pH en el rango de 0 a 14. Se conecta mediante un cable coaxial (Figura 4.16 b) a la entrada BNC y opera con 5 V y 10 mA, generando una señal de voltaje proporcional a la acidez o alcalinidad de la solución. Esta señal se amplifica y acondiciona para su interpretación mediante microcontrolador, con un tiempo de respuesta de 5 segundos (Figura 4.16 a).

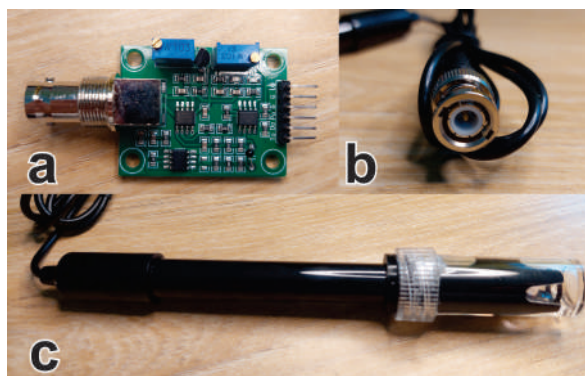


Figura 4.16: Sensor de PH-4502 C con electrodo 201

Se trata de un sistema modular de medición de pH compuesto por dos partes. El PH4502C es un transmisor/amplificador/convertidor de señal de pH de 2 hilos. Su función es tomar la señal de muy alto impedancia y bajo voltaje del electrodo, amplificarla, compensarla por temperatura y convertirla en una señal estandarizada (generalmente 4-20 mA) que puede ser leída por un PLC, computadora o display. El electrodo E-201 (o equivalente como E-201F): Es el sensor propiamente dicho. Es un electrodo combinado de pH, lo que significa que integra en un solo cuerpo al electrodo de medición (bulbo de vidrio sensible a iones H); electrodo de referencia (generalmente Ag/AgCl) que proporciona un potencial de referencia estable y el sensor de temperatura (PT1000 o termistor) para compensación automática de temperatura (ATC). Este sensor es un equipo económico y robusto muy usado en automatización y proyectos de investigación [64].

El electrodo E-201 será colocado en un recipiente de muestreo continuo a la salida del efluente del reactor, y deberá estar sumergido para realizar las mediciones de pH.

4.5.3. Selección de las bombas peristálticas Kamoer® NKP-DCL-S10Y

La bomba peristáltica Kamoer® modelo NKP - DCL - S10Y [65], está diseñada para manejo de productos químicos, opera con un motor de 12 V de corriente continua a 5 W. Es autocebante y emplea tubos de silicón resistentes a temperatura y al envejecimiento, adecuados para líquidos poco corrosivos.

La dirección del flujo se determina por la polaridad de conexión. El rango de caudal es de 10 - 60 mL/min con controlador de velocidad, y 0 - 200 mL/min sin él. Su peso aproximado es de 110 g (Figura 4.17).



Figura 4.17: Bomba peristáltica Kamoer® NKP-DCL-S10Y

4.5.4. Selección del resistor calentador con control de temperatura Oceanaqua® OCT - 25

Para esta etapa inicial de instrumentación se optó por un resistor calentador sumergible Oceanaqua® OCT - 25 [66] en lugar de un sistema autorregulado, dado que el requisito principal es mantener una temperatura constante de 35 °C. El dispositivo opera con 120 V a 25 W de potencia, tiene capacidad para calentar hasta 25 L y permite ajustar la temperatura en un rango de 18 °C a 35 °C (Figura 4.18).



Figura 4.18: Resistor calentador Oceanaqua® OCT - 25

4.5.5. Diseño para la fuente de alimentación de los electrodos

Para el diseño de este circuito se eligieron los siguientes componentes:

- 1 regulador de voltaje L7805
- 1 transformador de 127 v de entrada y 12 v a 500 mA de salida
- 4 diodos rectificadores 1N4004
- 1 capacitor electrolítico de $470\ \mu\text{F}$ a 50 V
- 1 capacitor electrolítico de $47\ \mu\text{F}$ a 25 V
- 1 capacitor de poliéster de $330\ \text{nF}$ a 400 V
- 1 capacitor cerámico de $100\ \text{nF}$
- 1 resistor de $120\ \Omega$ de 1 w
- 1 potenciómetro de $5\ \text{k}\Omega$

Se diseñó el circuito eléctrico mostrado en la Figura 4.19, simulándolo inicialmente en Multisim® y posteriormente implementándolo en protoboard (Figura 4.20).

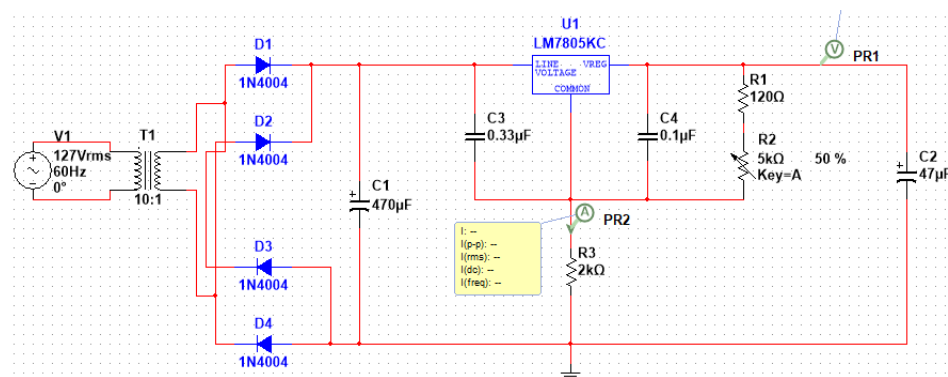


Figura 4.19: Simulación de la fuente de corriente propuesta en Multisim®

El diseño incorpora un transformador reductor (127 V a 12 V a 500 mA) que proporciona aislamiento galvánico y protección al usuario. La señal se rectifica y filtra mediante un circuito de onda completa para obtener corriente continua con bajo rizado. Posteriormente, se implementó la configuración estándar del regulador LM7805 adaptada como fuente de corriente constante, generando una salida fija de 40 mA.

Tras la verificación experimental, el circuito demostró un funcionamiento adecuado, manteniendo los 40 mA especificados con alimentación de 120 V. No obstante, para la aplicación específica en electrodos (donde el rango operativo debe ser de 0.2 a 10 mA y 0.2 a 0.8 V para evitar lisis celular e inhibición de la reacción) se requiere un sistema de lazo cerrado con capacidad de ajuste por debajo de 40 mA.

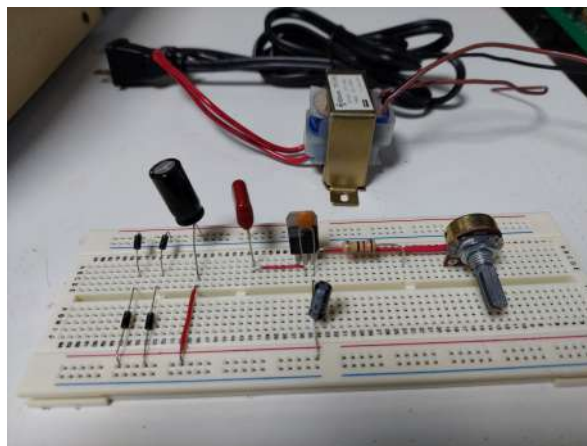


Figura 4.20: Armado de la fuente de corriente propuesta en protoboard

De acuerdo con el párrafo anterior, 40 mA provocarán la inhibición del reactor electroquímico, entonces, para evitar la inhibición, se propuso un segundo diseño con las especificaciones adecuadas.

La primera etapa consistió en simular el circuito en Multisim®, utilizando los siguientes componentes:

- 1 amplificador operacional LM358N
- 1 resistor de 330 Ω de 1/2 w

- 6 resistores de $1\ \Omega$ de 1/2 w
- 1 resistor de $1\ \text{k}\Omega$ de 1/2 w
- 1 resistor de $100\ \Omega$ de 1/2 w
- 1 resistor de $180\ \Omega$ de 1/2 w
- 1 elevador de voltaje DC-DC
- 1 transistor MPS 2222A
- 3 terminales con tornillo para circuito impreso

El circuito mostrado en la Figura 4.21 mantiene una corriente constante entre 0.2 a 4 mA en los electrodos mediante una configuración de resistencias y un convertidor CD - CD acoplado al transistor. La corriente se ajusta mediante la variación del voltaje V2, y la señal de salida es compatible con sistemas de adquisición de datos.

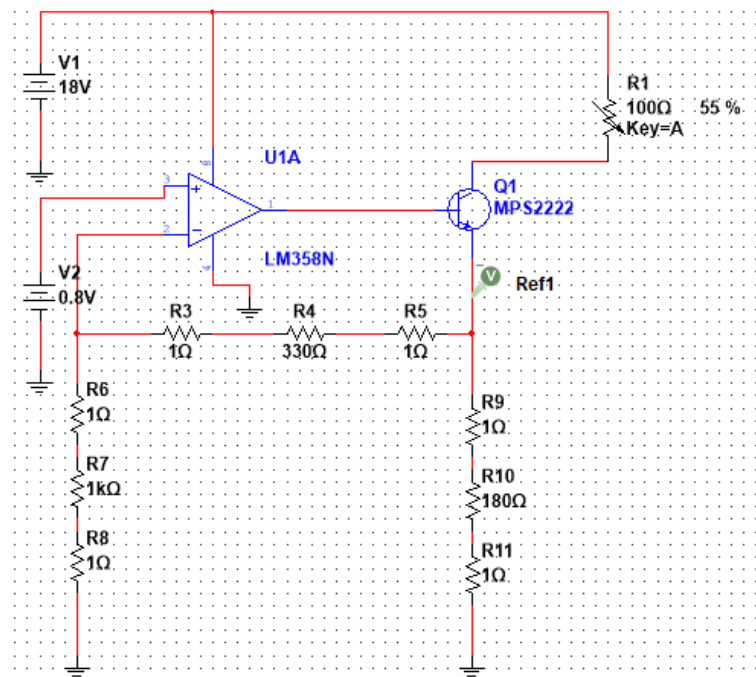


Figura 4.21: Simulación de la segunda fuente de corriente propuesta en Multisim®

El circuito se implementó inicialmente en protoboard para verificar su funcionalidad. Tras confirmar su operación correcta, se diseñó el circuito impreso en Altium Designer®, cuyo resultado se presenta en las Figuras 4.22 y 5.1.

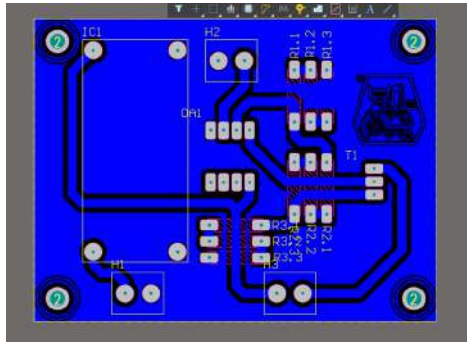


Figura 4.22: Tarjeta electrónica para la fuente de corriente constante diseñada en Altium Designer®

4.5.6. Diseño electrónico para la fuente de alimentación y acondicionamiento de señales para el sensor de flujo

La fuente de alimentación incorpora los siguientes componentes electrónicos:

- 2 diodos zener de 5.1 v
- 1 resistor de 100 Ω

El circuito de la fuente de alimentación se diseñó inicialmente en Multisim® y posteriormente se implementó en protoboard para su verificación, como se muestra en las Figuras 4.23 y 4.24.

Este diseño simplificado genera 10.2 V mediante dos diodos Zener de 5.1 V conectados en serie, con una resistencia de protección de 100 Ω , para asegurar su operación segura.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del circuito, se conectó el sensor de flujo. De acuerdo con la hoja de datos del fabricante, la salida del sensor a flujo cero es de 1 V (Figura 4.25).

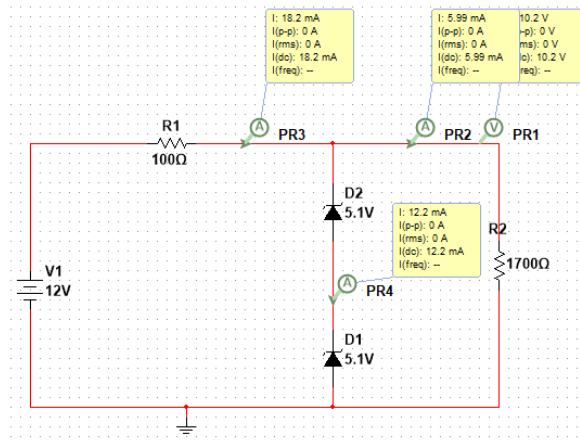


Figura 4.23: *Diseño de fuente de alimentación de corriente para el sensor de biogás realizado en Multisim®*



Figura 4.24: Fuente de alimentación para el sensor de biogás realizada en protoboard

Para acondicionar la señal de salida del sensor y garantizar la comunicación con la DAQ 6211, se diseñó en Multisim® un circuito basado en el amplificador operacional OPA277 (Figura 4.26). Este amplificador diferencial permite amplificar ambas señales de entrada para medir el voltaje del sensor y transmitirlo a la tarjeta de adquisición.

Tras implementar el circuito en protoboard y verificar su funcionamiento, se procede a listar los componentes electrónicos utilizados:

- 4 resistores de 10 k Ω
- 2 resistores de 15 k Ω
- 1 amplificador operacional OPA277

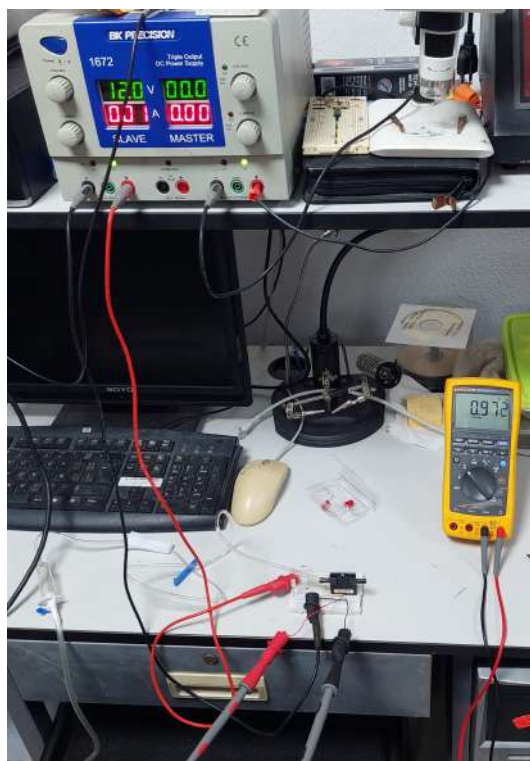


Figura 4.25: Señal de salida del sensor de caudal de gas a flujo cero

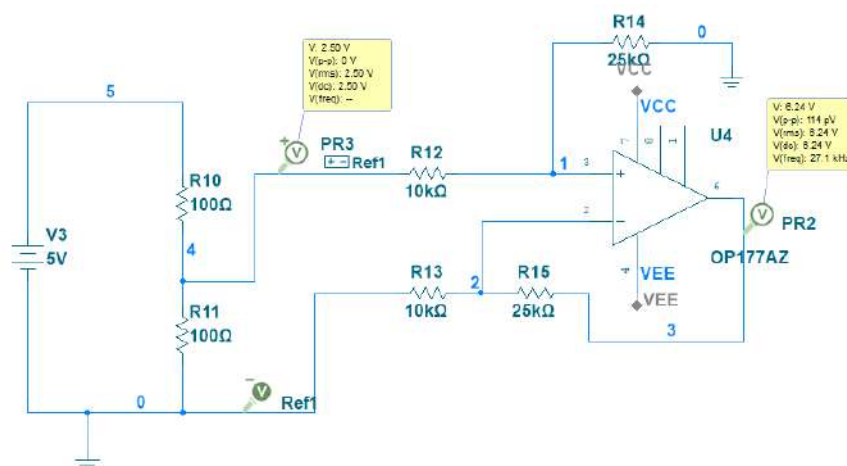


Figura 4.26: Diseño del circuito para acondicionamiento de señales para el sensor de biogás realizado en Multisim®

La integración de ambos circuitos (Figura 4.27) y posteriormente ya con el sensor de flujo integrado en la protoboard (Figura 4.28), se pudo verificar el correcto funcionamiento de la fuente de alimentación

del sensor de flujo de gas. Mediante mediciones con el multímetro, se confirmó la correspondencia entre los valores de voltaje y los flujos específicos.

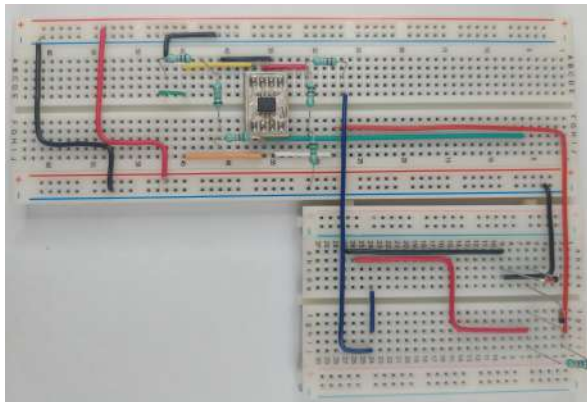


Figura 4.27: Armado del circuito para acondicionamiento de señales y fuente de alimentación para el sensor de biogás

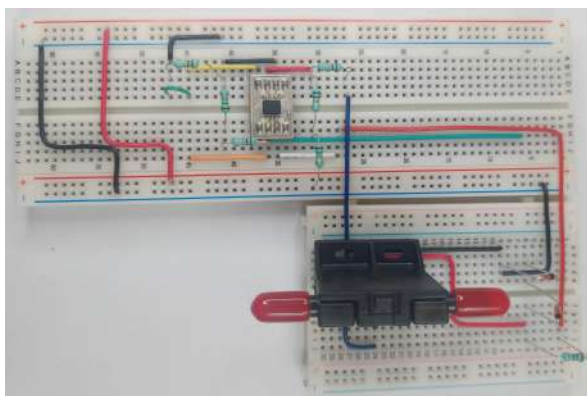


Figura 4.28: Integración del sensor de flujo de biogás al circuito de alimentación y acondicionamiento de señales

El diseño emplea el amplificador operacional OPA277 en configuración diferencial para amplificar ambas señales de entrada del sensor, acondicionando la señal para su envío a la tarjeta de adquisición de datos (Figura 4.29).

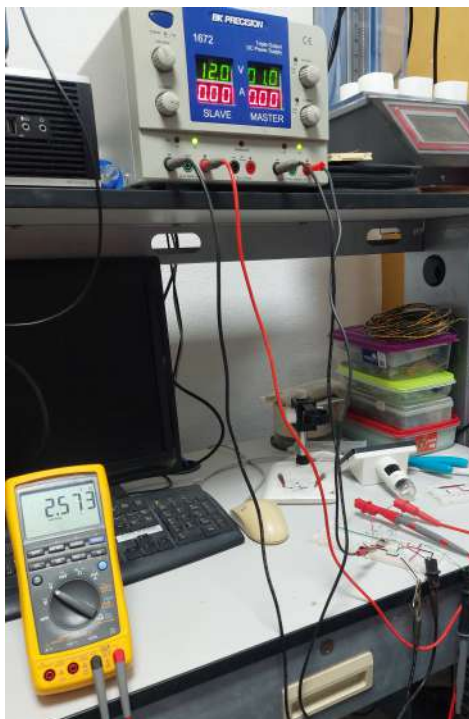


Figura 4.29: Obtención de señal de salida del circuito para el sensor de gas

4.5.7. Conexiones del sensor de pH con el microcontrolador Arduino®

Las mediciones de pH se realizaron con el módulo PH - 4502C y electrodo E201 - BNC [64], que incorpora un potenciómetro de calibración. La interfaz con el sistema de adquisición de datos se implementó mediante Arduino®, conectando VCC para alimentación, GND a tierra y la salida analógica P0 del módulo a una entrada analógica del microcontrolador, según las especificaciones del fabricante, como se muestra en la Figura 4.30.

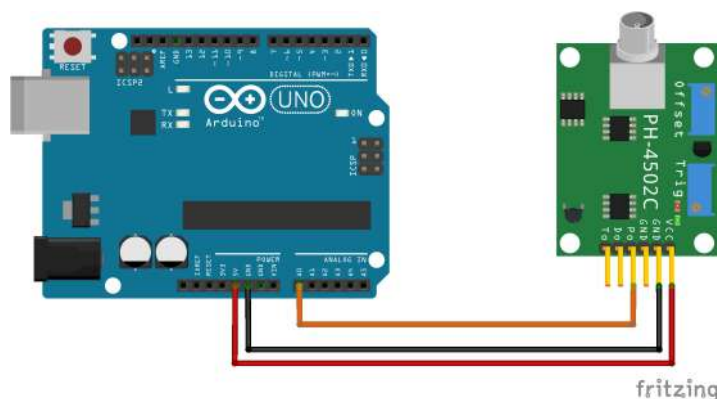


Figura 4.30: Conexiones del sensor PH4502C con el microcontrolador tipo Arduino®

Esta configuración permite la calibración inicial y visualización de datos en el monitor serial. Para etapas posteriores, se planea la integración con LabVIEW® para facilitar el registro de datos en tiempo real.

Se implementó el código del fabricante en Arduino® para la lectura del sensor, procediendo a su calibración con soluciones buffer (pH 4.01, 6.86 y 9.18). La curva de regresión lineal resultante se programó en el microcontrolador, mostrando concordancia con los valores de referencia y variaciones mínimas en el voltaje (con un porcentaje de error de máximo de 1.74 %), consistentes con lo reportado en la literatura [60–62] para aplicaciones de monitorización.



Figura 4.31: Soluciones buffer para la calibración del sensor de pH

4.5.8. Diseño electrónico para el control de la velocidad de un motor mediante modulación por ancho de pulso (PWM)

Para el diseño de este circuito (Figura (4.32)), se utilizó el amplificador operacional TL081. El método empleado para variar la velocidad del motor de la bomba peristáltica es conocido como modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés); esto es, la aplicación de un voltaje todo-nada pulsante de frecuencia constante, pero, variable la relación entre el tiempo de aplicación del voltaje al motor (todo) con respecto al tiempo en que no se aplica voltaje (nada). Esta modulación se consigue en dos partes. La primera parte, consta de dos amplificadores operacionales U1 y U2, configurado uno de ellos (U1) como un comparador con retroalimentación positiva para que presente histéresis y el otro (U2) está configurado como integrador inversor que recibe a su entrada la salida del amplificador U1 y la salida del amplificador U2 se aplica a la entrada del amplificador U1. Como el voltaje de salida de U1 es un valor fijo (un escalón, el voltaje de salida U2 será la integral de este escalón, o sea, una rampa, que al aplicarse a la entrada de U1, alcanzará un valor que producirá que la salida de U1 cambie al nivel contrario del que estaba, lo que causará que el integrador U2 ahora genere una rampa con pendiente opuesta a la primera rampa. En resumen, en la salida de U2 se tendrá una onda de voltaje de forma triangular, que, con los valores propuestos de los componentes, tendrá una frecuencia de 8.696 Hz.

La segunda parte, consta de un amplificador operacional U3 configurado como comparador de voltajes, que recibe por su entrada inversora la onda triangular y por su entrada no inversora un voltaje ajustable proveniente del cursor de un potenciómetro. Con esto, en el voltaje de salida de U3 se obtiene una onda rectangular de frecuencia constante cuyo ancho de pulso se puede variar con el potenciómetro.

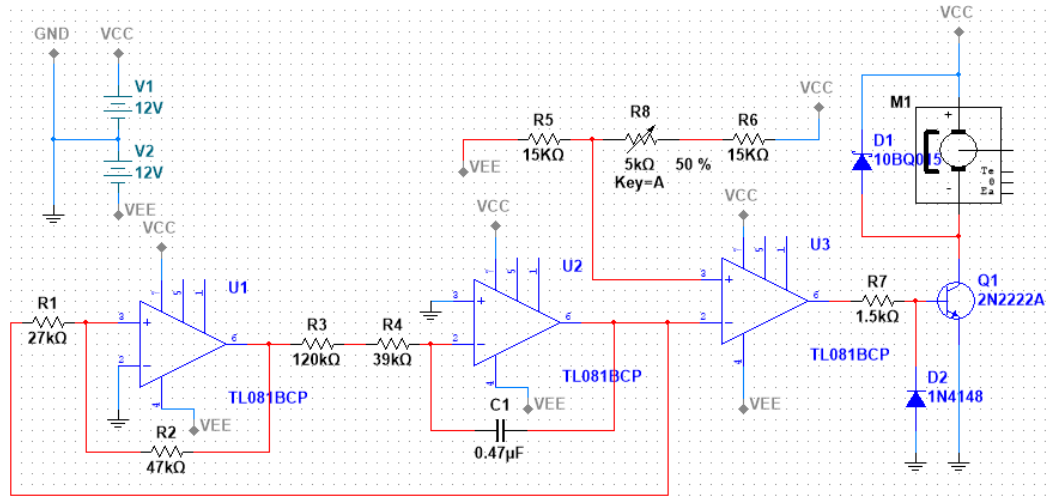


Figura 4.32: Circuito controlador para la bomba peristáltica mediante modulación por ancho de pulso simulado en Multisim®

Finalmente, como el amplificador operacional no es capaz de proporcionar la corriente que requiere el motor, se emplea un transistor NPN que tiene la función de amplificar la corriente que entrega U3 a la base del transistor, a un valor mucho mayor suficiente para manejar al motor de la bomba peristáltica. El diodo en antiparalelo paralelo (Schottky) con el motor se emplea para que la inercia en la corriente del motor circule fácilmente por el diodo hasta que se extinga, en vez de que vaya a circular por el transistor en estado de alta resistencia (abierto) y lo dañe. Un segundo diodo va en antiparalelo (diodo de conmutación rápida) con la unión base-emisor del transistor, para protegerlo del voltaje inverso al que se vería expuesto cuando U3 se satura negativamente (-12V), lo anterior se puede observar en el circuito ya armado en la protoboard mostrado en la Figura (4.33).

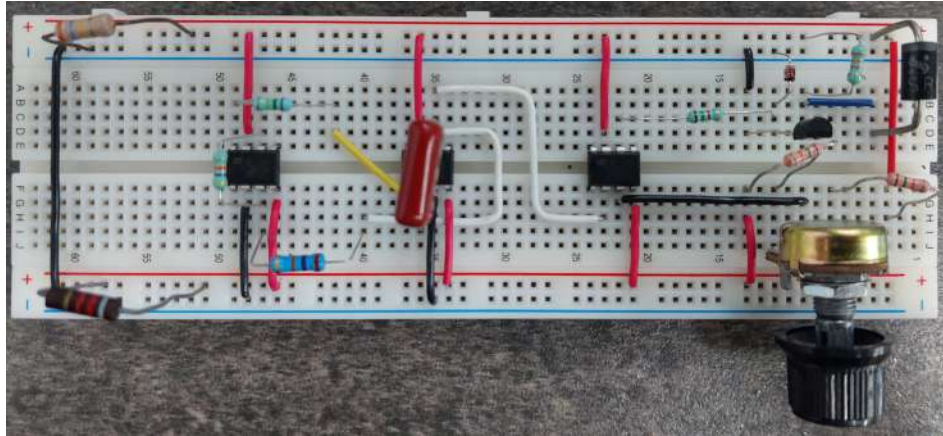


Figura 4.33: Circuito controlador para la bomba peristáltica armado en protoboard

Resultados

5.1. RESULTADOS DE LOS CIRCUITOS DISEÑADOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES

5.1.1. Fuente de alimentación para los electrodos

En el tratamiento de aguas con reactores anaerobios tipo celda de electrólisis microbiana (CEM) [67], el control galvanostático (por corriente) supera al potencioestático (por voltaje) al regular directamente el flujo de electrones, lo que se correlaciona con la actividad microbiana y la eficiencia en la remoción de contaminantes.

Este método asegura estabilidad operativa y reproducibilidad, manteniendo constante la carga orgánica

removida incluso con variaciones en el afluente, mientras el voltaje se ajusta automáticamente para compensar cambios en la biopelícula, además opera dentro de límites metabólicos seguros, previniendo daños al biocatalizador. En contraste, el control por voltaje genera corriente fluctuante, dificulta la reproducibilidad y conlleva riesgo de sobrepotenciales dañinos, comprometiendo la estabilidad del sistema. El monitoreo operativo incluye verificar el nivel de salida para prevenir variaciones en el caudal causadas por taponamientos, así como la medición diaria del pH del efluente y del flujo de biogás. Estas variables son críticas para diagnosticar el estado del reactor. Un síntoma claro de inhibición es la combinación de un pH fuera del rango neutro y una caída en la producción de biogás. Este fenómeno suele estar asociado a valores de corriente y voltaje elevados, lo que demanda ajustes operativos urgentes.

La nueva fuente de corriente constante incorpora control por lazo cerrado mediante la tarjeta DAQ 6210 de la marca National Instruments®, permitiendo el ajuste automático a través de señales de voltaje. Este sistema mantiene los parámetros operativos dentro del rango especificado, acondiciona las señales de entrada y salida, y regula la corriente en el reactor electroquímico a un valor constante de 4 mA cuando el valor de voltaje es de 0.8 V, el cual está dentro del rango permitido para evitar la lisis celular, el cual se observa en la Figura 5.2.

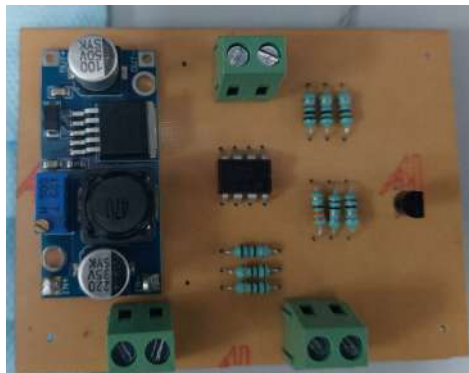


Figura 5.1: Fuente de corriente constante armada con sus componentes electrónicos



Figura 5.2: Fuente de corriente constante manteniendo 4 mA de salida

5.1.2. Caracterización del sensor de flujo

Es importante mencionar que la caracterización de los sensores no forma parte de los objetivos del presente trabajo, pero, se logró hacer una caracterización preliminar de algunos sensores.

La hoja de datos del fabricante [63] incluye las características de flujo versus voltaje de salida del sensor (Tabla 5.1). Con estos datos se obtuvo la curva de operación del Honeywell® AWM 3150V (Figura 5.3).

Tabla 5.1: Datos del sensor AWM 3150V proporcionados por el fabricante

Flujo (mL)	Voltaje (V)
0	1.00
1	1.10
2	1.20
3	1.30
4	1.40
5	1.50
10	1.95
20	2.90
30	3.75

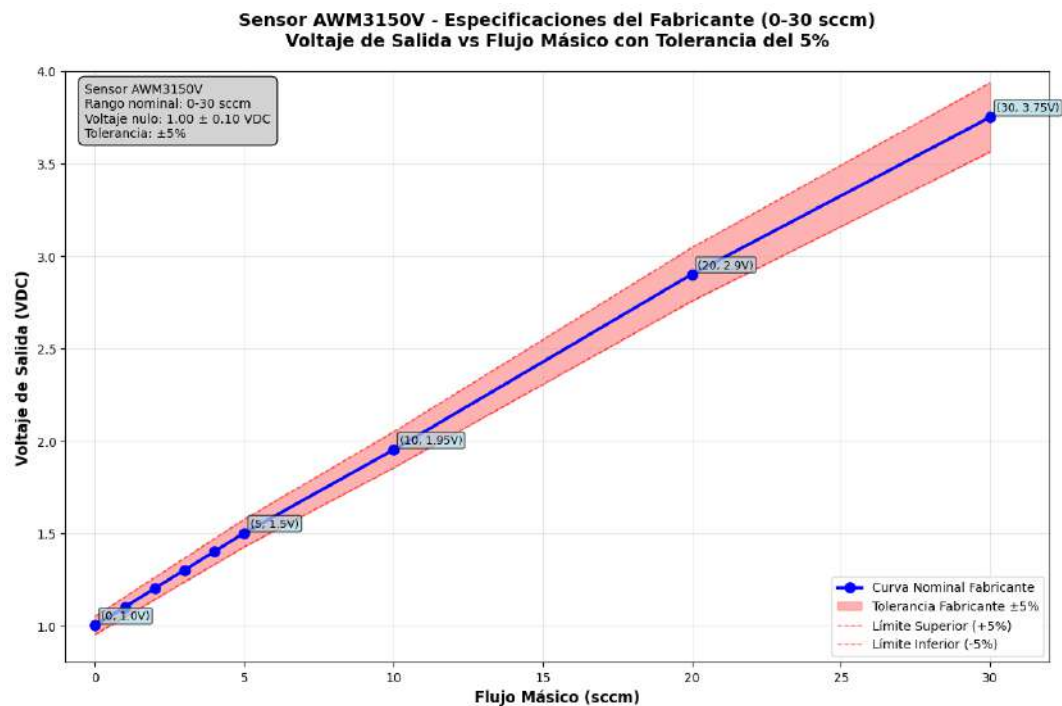


Figura 5.3: Gráfico de salida de voltaje del sensor vs flujo creado a partir de los datos proporcionados por el fabricante

La caracterización del sensor de microflujo de gas se realizó mediante el método de probeta invertida [12], utilizando una jeringa graduada y un compresor de aire con válvula reguladora (Figura 5.4). Se midió el volumen de agua desplazado por minuto, verificando que el voltaje de salida del sensor correspondiera con los valores de flujo establecidos en la hoja de datos. Los resultados obtenidos se

presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Caracterización preliminar del sensor AWM 3150V

Flujo (mL)	Voltaje (V)
0	0.977
9	1.650
15	2.300
18	2.800
25	3.300
33	3.720
37	4.040



Figura 5.4: Prueba de desplazamiento de gas durante un minuto

La Figura 5.5 presenta la comparación entre los datos del fabricante y los resultados experimentales del sensor de flujo. Los valores medidos se mantienen dentro del rango operativo especificado, donde la línea azul indica la salida nominal y su variación esperada, y la línea roja representa los datos experimentales. Esta concordancia confirma la idoneidad del sensor para medir el flujo en el reactor.

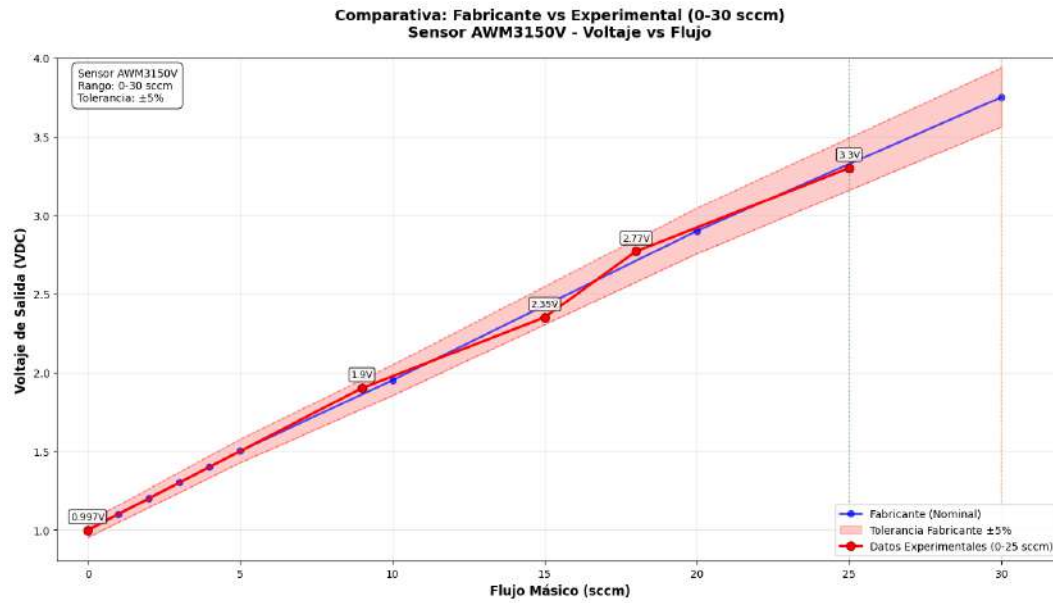


Figura 5.5: Gráfico comparativo del comportamiento nominal del sensor contra los datos experimentales

Se realizó un análisis de regresión lineal por mínimos cuadrados para caracterizar la respuesta del sensor de flujo másico AWM 3150V mostrada en la Figura 5.6, comparando los datos de especificación del fabricante con los valores obtenidos experimentalmente que se observan en la Figura 5.7 en el rango de 0 a 30 sccm.

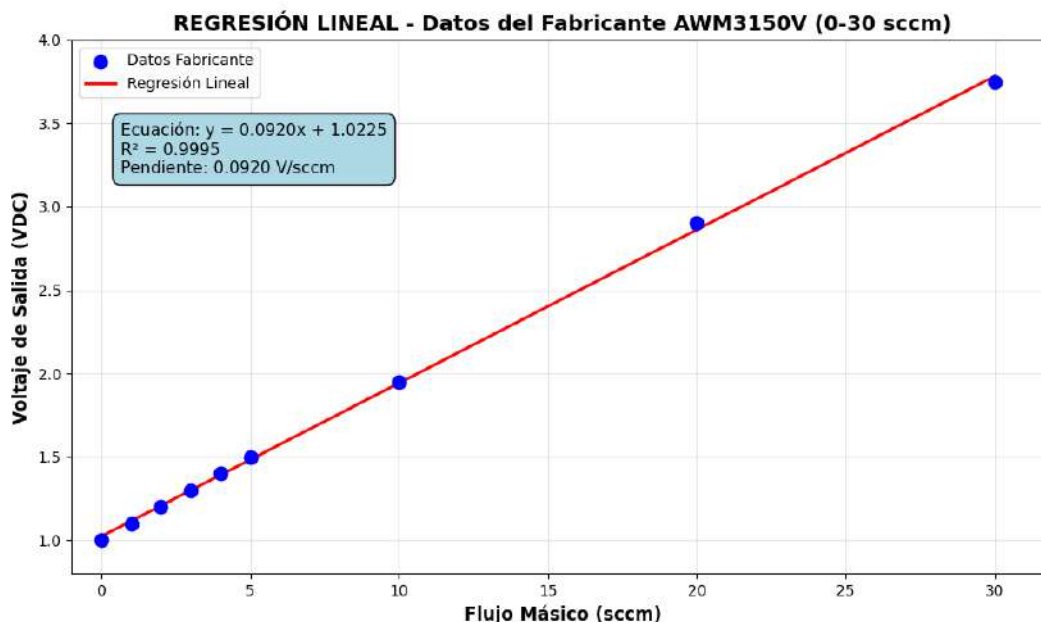


Figura 5.6: Análisis de regresión lineal para los datos del sensor AWM 3150V

Los resultados demuestran una notable concordancia entre ambos conjuntos de datos, como se evidencia en la Tabla 5.3 La ecuación de calibración experimental presenta una pendiente de 0.0926 V/sccm, lo que representa una variación de apenas +0.0006 V/sccm respecto al valor de referencia del fabricante (0.0920 V/sccm). Similarmente, el voltaje en condición de flujo cero muestra una diferencia mínima de +0.0006 V, con valores de 1.0231 V en las mediciones experimentales frente a 1.0225 V especificado por el fabricante.

El coeficiente de determinación (R^2) de 0.9954 obtenido experimentalmente confirma una excelente linealidad en la respuesta del sensor, con una reducción marginal de -0.0041 respecto al valor de referencia (0.9995). Esta mínima discrepancia se encuentra dentro de los límites aceptables para aplicaciones de control de procesos, validando la confiabilidad del sistema de medición implementado.

La estrecha correlación entre los datos experimentales y las especificaciones del fabricante valida la metodología de calibración empleada y confirma que el sensor opera dentro de sus parámetros nominales, proporcionando mediciones confiables para el monitoreo y control de flujo en el sistema.

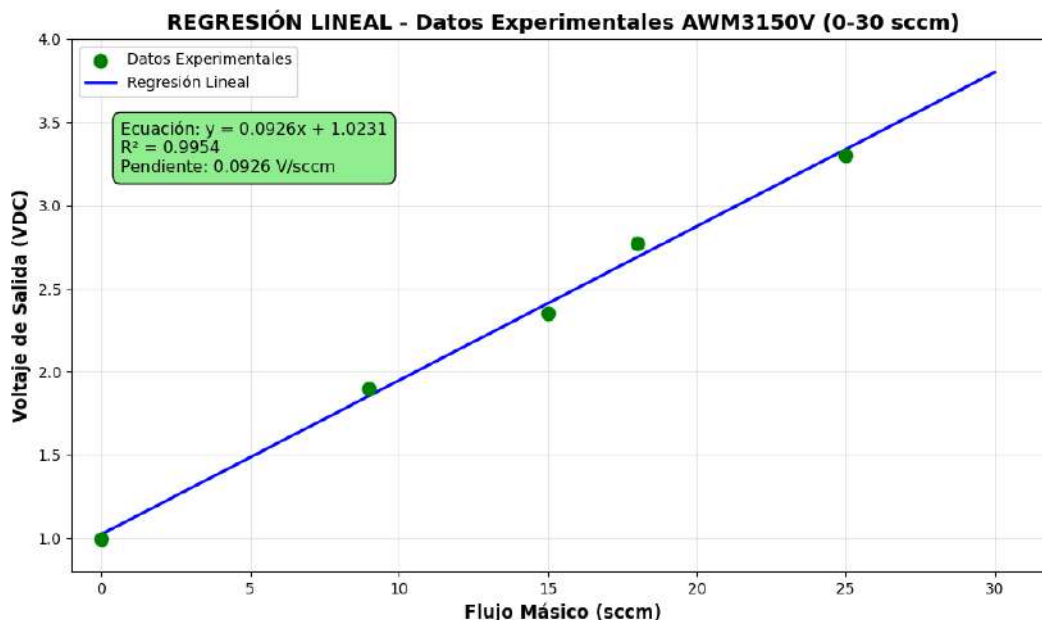


Figura 5.7: Análisis de regresión lineal para los datos experimentales del sensor AWM 3150V

Tabla 5.3: Calibración: Sensor de Flujo AWM 3150V

Parámetro	Datos del Fabricante	Datos Experimentales	Variación
Ecuación	$y = 0.0920x + 1.0225$	$y = 0.0926x + 1.0231$	Mínima
Coefficiente R^2	0.9995	0.9954	-0.0041
Pendiente (V/sccm)	0.0920	0.0926	+0.0006
Voltaje en Cero Flujo	1.0225 V	1.0231 V	+0.0006 V

- **Consistencia de Calibración:** Las pendientes difieren en solo 0.65 %, demostrando excelente reproducibilidad, el voltaje en flujo cero presenta variación de 0.06 %, dentro de márgenes aceptables, puesto que la linealidad se mantiene en ambos conjuntos de datos.
- **Precisión Experimental:** $R^2 = 0.9954$ confirma alta correlación en mediciones experimentales, la mínima desviación respecto a los datos del fabricante valida la metodología, por lo cual, el comportamiento predictivo del sensor se mantiene confiable.
- **Implicaciones Prácticas:** El sensor puede utilizarse con curvas de calibración estándar sin ajustes significativos. La deriva mínima no afecta las aplicaciones de monitorización de biogás, entonces se confirma la estabilidad del sensor en condiciones de operación reales.

La comparativa valida el uso del AWM 3150V para aplicaciones de investigación, mostrando consistencia excepcional entre los datos del fabricante y las mediciones experimentales. Las mínimas variaciones observadas no comprometen su funcionalidad para el monitoreo de flujos en reactores anaerobios.

Si bien el biogás es una mezcla de CH_4 , CO_2 , H_2 , también contiene H_2S corrosivo que puede dañar el sensor, esta limitación es inherente a la aplicación y no al diseño del circuito. Para solucionarlo, se podría realizar en trabajos futuros la integración de una etapa de eliminación del gas ácido, lo que se identifica como una mejora directa para la medición de biogás a través del sensor propuesto.

5.1.3. Caracterización preliminar del resistor calentador

Por limitaciones de tiempo, se optó por adquirir un calentador comercial en lugar de diseñar un sistema de control de temperatura. El dispositivo seleccionado emplea una resistencia para mantener el reactor a una temperatura constante de 35 °C.

Se evaluó el desempeño térmico del sistema midiendo el tiempo requerido para alcanzar la temperatura objetivo y su capacidad de mantener esa temperatura, utilizando un temperatura mostrada en la Figura 5.8.

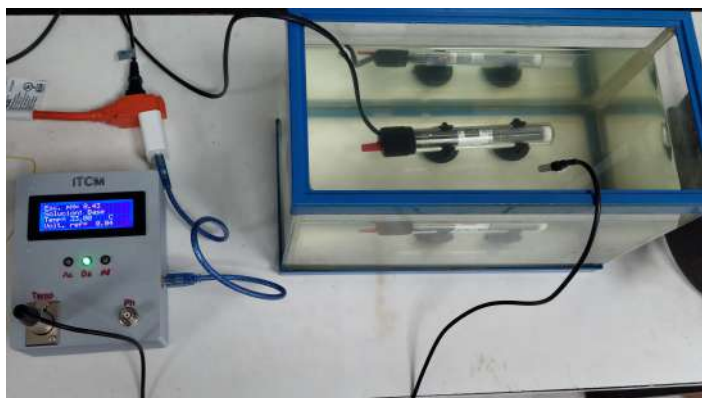


Figura 5.8: Mediciones de temperatura para la caracterización preliminar del resistor calentador

El resistor calentador se sumergió en un tanque de vidrio de 5 L, permitiendo su aclimatación a la

temperatura ambiente durante 30 minutos según las especificaciones del fabricante. Tras conectar el dispositivo, se registró la temperatura cada 30 minutos. Los datos recopilados (Tabla 5.4) permitieron generar la curva de comportamiento térmico mostrada en la Figura 5.9.

Tabla 5.4: Lecturas de temperatura del resistor calentador en un intervalo de tiempo

Hora	Temperatura (°C)
11:30	28.81
12:00	30.69
12:30	31.62
13:00	32.94
13:30	33.56
14:00	34.38
14:30	34.75
15:00	34.81
15:30	34.88
16:00	34.94
16:30	35.01

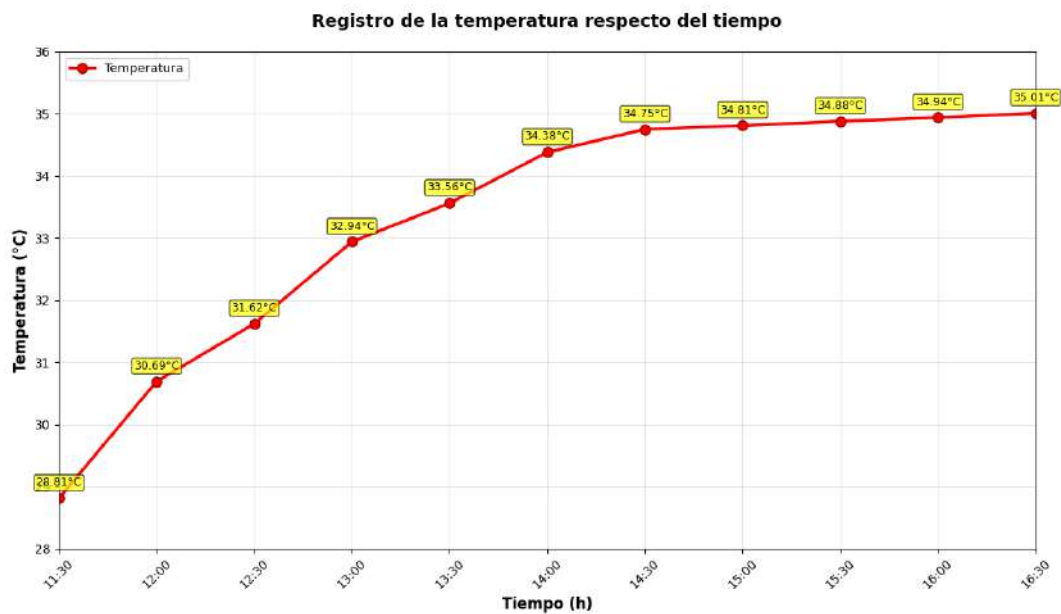


Figura 5.9: Registro de la temperatura respecto del tiempo del resistor calentador

Se concluye que el calentador alcanza la temperatura objetivo de 35 °C en aproximadamente 4.5 horas, manteniéndola dentro del rango aceptable de ± 0.2 °C con variaciones mínimas.

5.1.4. Validación del sensor de pH con el microcontrolador Arduino®

El sensor se sumergió en soluciones de pH conocido, registrándose los voltajes correspondientes (Tabla 5.5). Los datos permitieron obtener una ecuación de regresión lineal con pendiente negativa (Figura 5.10), la cual se integró en el código cargado en el microcontrolador para la conversión a valores de pH.

La validación mostró que, si bien las lecturas coinciden con los valores de referencia, el sensor no se estabiliza en un valor constante, requiriendo verificación con equipos calibrados de referencia y acondicionamiento adicional de señal.

Tabla 5.5: Valores de voltaje vs pH

Voltaje (V)	pH
2.71	4.01
2.28	6.86
1.91	9.18

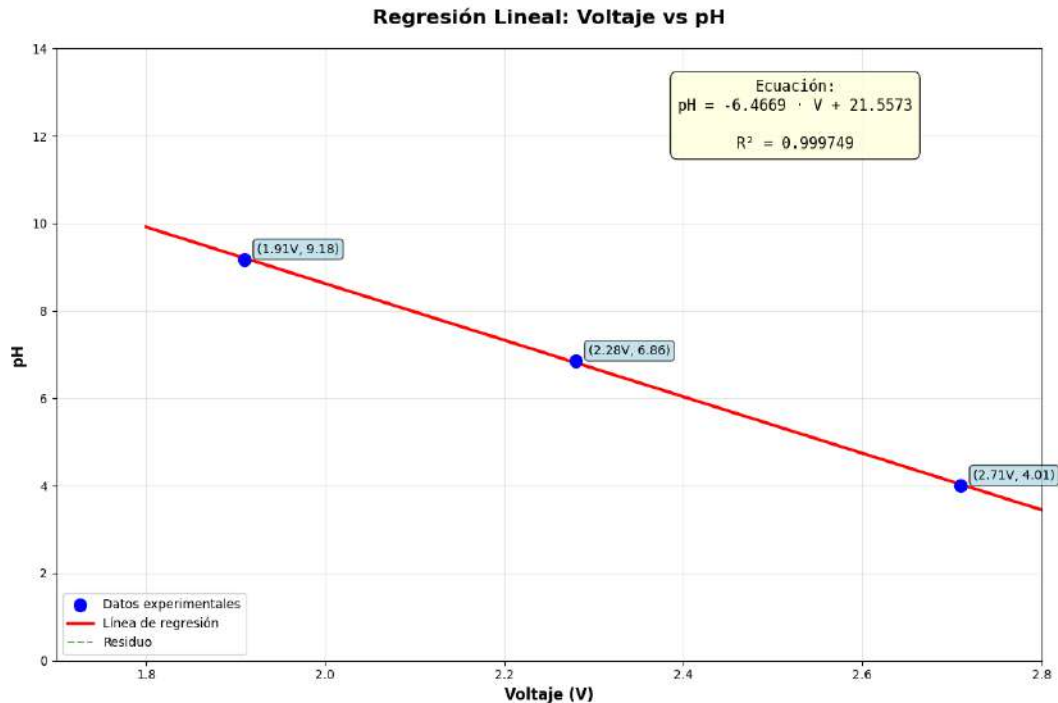


Figura 5.10: Gráfico de dispersión para los datos del sensor de pH

La validación del sensor PH - 4502C se hizo mediante la comparación con un equipo Thermo Scientific®, el cual mostró valores equivalentes (Figura 5.11). Sin embargo, mientras el equipo comercial estabiliza rápidamente sus lecturas, el sensor presenta fluctuaciones atribuibles (según Ahing [61]) a interferencias internas o inestabilidad del voltaje de referencia en Arduino®.

El rango de salida del sensor (1.17 - 3.33 V) excede el voltaje de referencia interno del microcontrolador (1.1 V), lo que impide utilizar esta función de estabilización, mediante la adición de una función en el código de Arduino®. Esta limitación requerirá una etapa adicional de acondicionamiento de señal en futuras investigaciones sobre el diseño. No obstante, el sensor demuestra ser una herramienta de bajo costo con precisión aceptable para la aplicación.

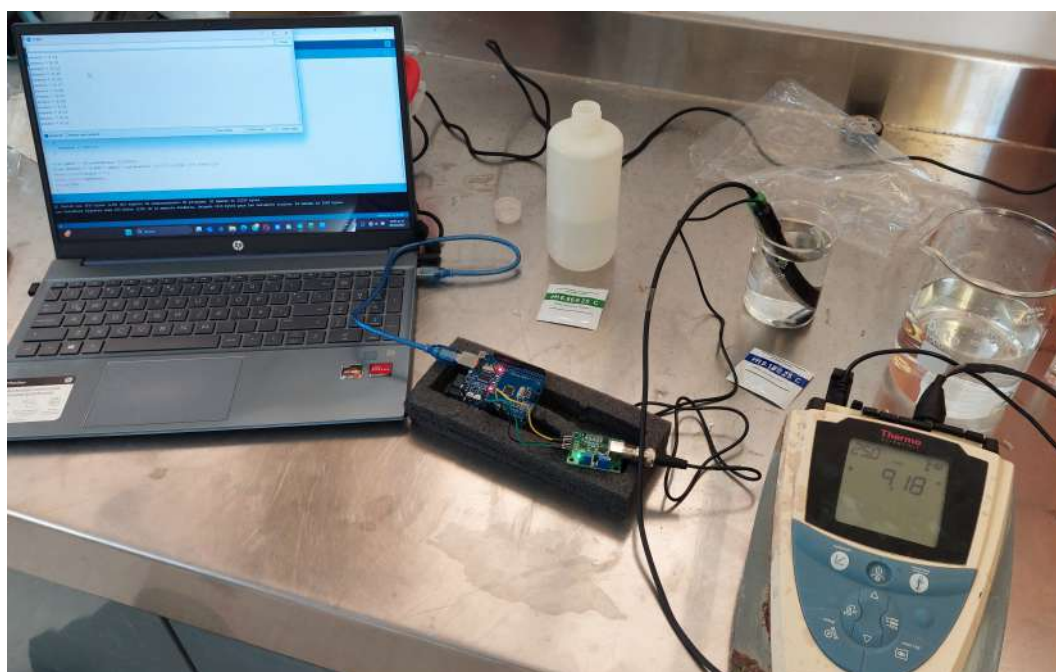


Figura 5.11: Comparación de las mediciones del sensor de pH con el potenciómetro Thermo Scientific® y el sensor PH 4502C

Se desarrolló un programa en LabVIEW® utilizando la librería NI-VISA para adquirir las lecturas de pH directamente desde el microcontrolador con el sensor conectado, obteniendo los valores en tiempo real. Esta implementación eliminó la necesidad de utilizar una tarjeta de adquisición de datos

de la marca National Instruments®, reduciendo significativamente los costos del sistema. Las Figuras 5.12 y 5.13 muestran las lecturas en el monitor serial de Arduino® y la interfaz de LabVIEW®, respectivamente.

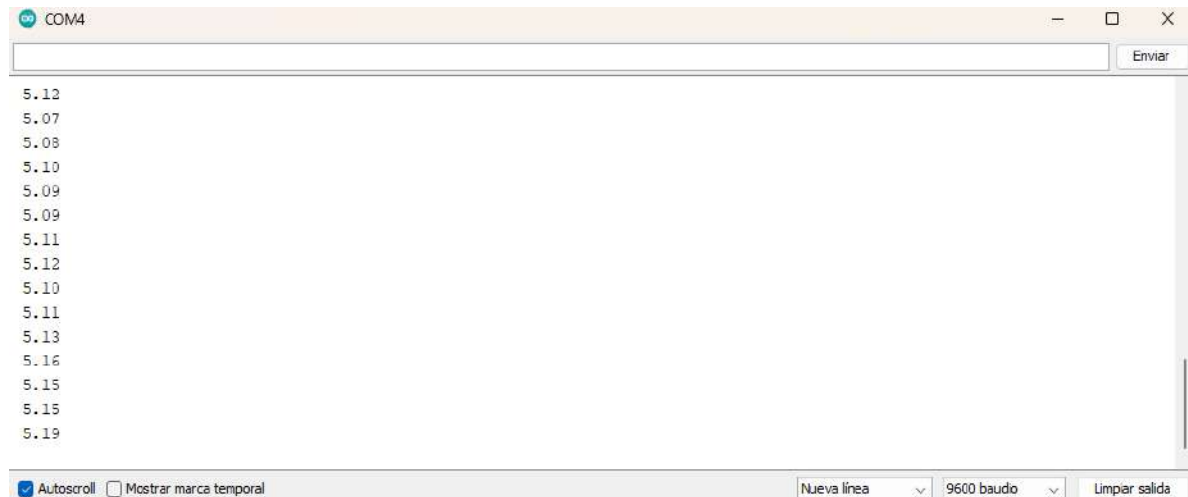


Figura 5.12: Lecturas de pH mostradas en el monitor serial de la placa Arduino®

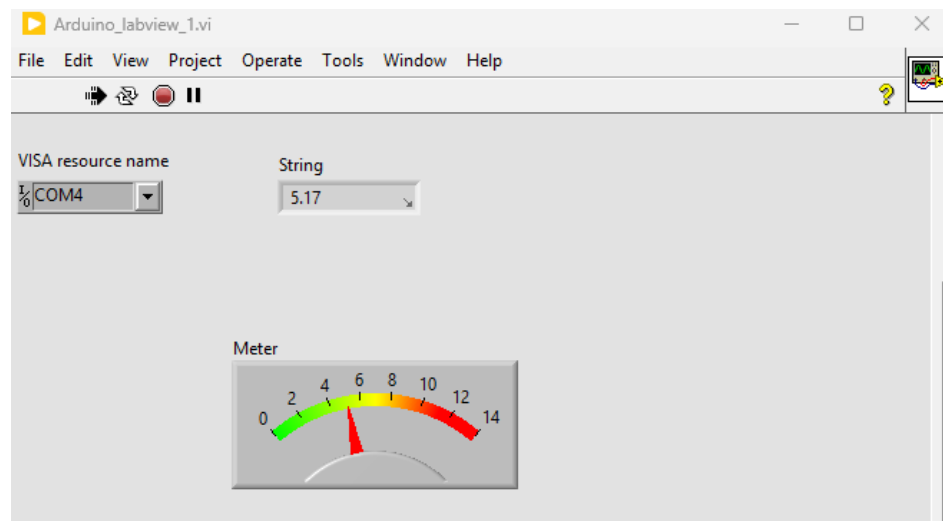


Figura 5.13: Lectura de pH mostrada en software LabVIEW®

5.1.5. Control de la velocidad y caudal mediante modulación por ancho de pulso (PWM)

El circuito se verificó alimentándolo con 12 V y observando la señal PWM en osciloscopio (Figura 5.15). Al conectar la bomba peristáltica, se corroboró la relación directa entre el voltaje de control y la velocidad del motor. Posteriormente, se hicieron pruebas para verificar la relación entre la velocidad de la bomba peristáltica con el caudal, se siguió el mismo procedimiento realizado en la sección 4.3.3. donde se obtuvo un intervalo entre 0 a 4.8 mL/min (Figura 5.14).

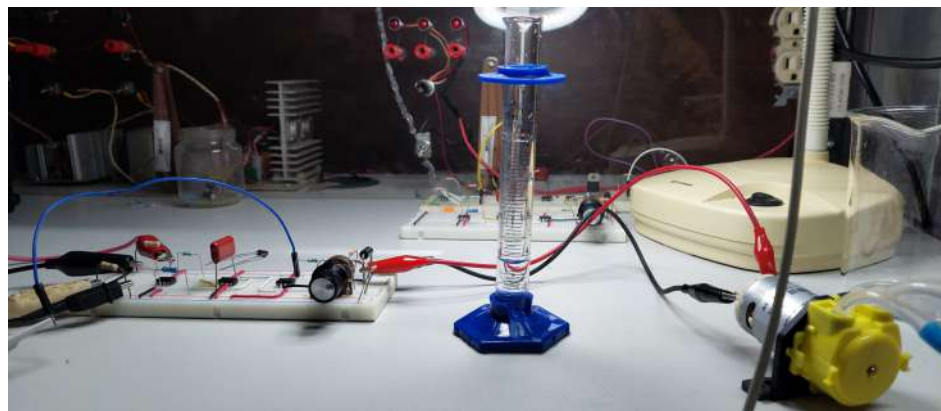


Figura 5.14: Prueba para verificar la correspondencia de la velocidad de la bomba con el caudal

Para la versión en PCB, se reemplazará el potenciómetro por una entrada de voltaje variable, permitiendo el control automático de velocidad mediante la tarjeta de adquisición de datos.

Este trabajo se alinea con el enfoque de bajo costo propuesto por Navoneel [47], quien emplea Arduino® para controlar bombas peristálticas. No obstante, el diseño presentado supera las soluciones genéricas mediante una arquitectura modular y personalizable que permite ajustes precisos de caudal. Su versatilidad se potencia con la capacidad de implementación en PCB, también se pueden diseñar carcasas impresas en 3D, para la integración final en un solo dispositivo, constituyendo una solución integrada y económicamente competitiva. Adicionalmente, el sistema mantiene compatibilidad con control mediante DAQ o Arduino®, ampliando su rango de aplicaciones.

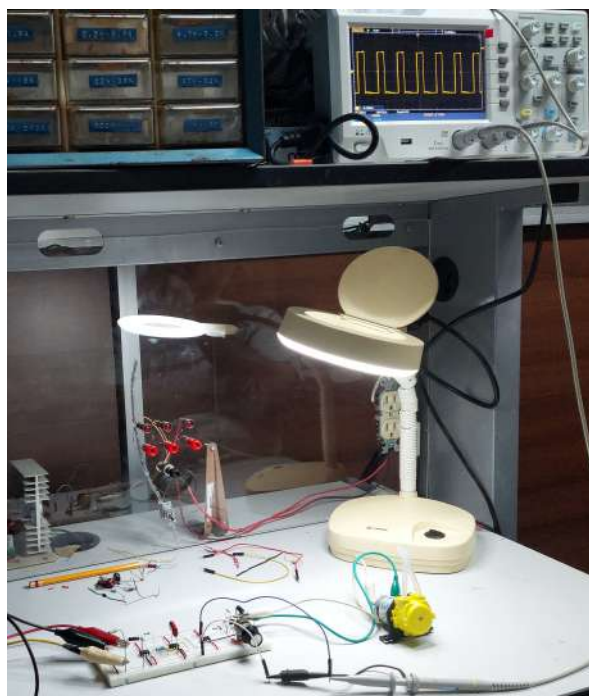


Figura 5.15: Control del motor mediante modulación de ancho de pulso

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. DISCUSIÓN

El desarrollo e implementación de un sistema de instrumentación de bajo costo para reactores UASB electroquímicos demuestra la viabilidad de utilizar componentes asequibles sin comprometer significativamente la funcionalidad esencial para la investigación y el control de procesos. La fuente de corriente constante, la cual opera de manera estable en el rango de 0.2 a 4 mA, cumplió con el requisito crítico de polarizar los electrodos del reactor sin inducir lisis celular, un factor clave para mantener la integridad de la biopelícula y la actividad microbiana, donde se pueden realizar algunas adaptaciones en la PCB para regular aún más la corriente y controlar aún más la corriente dentro del rango permitido. De manera complementaria, el circuito PWM para el control de la bomba peristáltica no solo representó una reducción de costos frente a controladores comerciales, sino que también ofreció una flexibilidad superior para la integración con microcontroladores y la implementación de futuros esquemas de

control automático en lazo cerrado.

La evaluación de los sensores seleccionados revela un balance deliberado entre costo y desempeño. El sensor de flujo Honeywell® AWM 3150V mostró una funcionalidad robusta y confiable para el monitoreo de caudales de biogás, con la ventaja adicional de reportar el flujo volumétrico en condiciones estandarizadas (sccm), lo que garantiza la comparabilidad de las mediciones independientemente de las variaciones ambientales. Por otro lado, el sensor de PH - 4502C confirmó su utilidad como una herramienta de bajo costo, proporcionando mediciones con una precisión aceptable para el monitoreo de tendencias. Sin embargo, su principal limitación (la presencia de fluctuaciones en la señal de salida) subraya la necesidad de una etapa de acondicionamiento de señal (filtrado y posiblemente amplificación diferencial) para aplicaciones que requieran una mayor estabilidad y precisión absoluta.

A continuación, se muestra en las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3, un análisis costo - beneficio de los sensores y bombas peristálticas elegidas.

Tabla 6.1: Análisis Comparativo Costo - Beneficio para el sensor de flujo

Componente	Solución de Bajo Costo	Solución Comercial	Análisis Costo - Beneficio
Sensor de Flujo Honeywell® AWM 3150V [63]	Costo: \$600-800 Precisión: Adecuada para monitoreo Ventaja: Medición directa en sccm	Ejemplo: Sensores de flujo másico (ej. Kemyence® [68]) Costo: \$8,000-20,000 Precisión: Muy alta Ventaja: Máxima precisión y estabilidad	Beneficio: Ahorro > 90 % La solución de bajo costo ofrece precisión suficiente para el control del proceso. La alta precisión de equipos comerciales no es requisito crítico.

Tabla 6.2: *Análisis Costo - Beneficio para el sensor de pH*

Componente	Solución de Bajo Costo	Solución Comercial	Análisis Costo - Beneficio
Sensor de pH pH - 4502C [64]	Costo: \$200 - 300	Ejemplo: Electrodos industriales (Mart® [69], Hamilton® [70])	Beneficio: Ahorro > 95 %
	Precisión: Aceptable ($\pm 0.1 - 0.2$ pH)	Costo: \$3,000 - 10,000	La ligera merma en precisión se compensa por el menor costo
	Limitación: Requiere acondicionamiento de señales	Precisión: Muy alta (± 0.01 pH)	La precisión es para control de proceso
		Ventaja: Alta estabilidad y vida útil larga	aceptable

Tabla 6.3: *Análisis Costo - Beneficio para la bomba peristáltica*

Componente	Solución de Bajo Costo	Solución Comercial	Análisis Costo - Beneficio
Control de Bomba Circuito PWM Personalizado	Costo: \$300 - 600	Ejemplo: Controlador comercial de bomba (Cole-Parmer® [71])	Beneficio: Ahorro ~90 %
	Ventaja: Alta flexibilidad y adaptable a microcontroladores	Costo: \$4,000-12,000	Solución personalizada más adaptable para automatización e
		Ventaja: Configuración "plug-and-play"	integración, aunque requiere desarrollo

En conjunto, la propuesta de diseño del sistema electrónico de instrumentación, valida la estrategia de integrar electrónica de bajo costo y código abierto, estableciendo las bases para un sistema de control automático futuro. Este enfoque no solo reduce la barrera de entrada financiera para la investigación en tecnologías de tratamiento de aguas residuales, sino que también promueve la adaptabilidad y la escalabilidad de las soluciones del control automático aplicado al tratamiento de aguas residuales.

6.2. ESTADO DEL PROYECTO Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Se han completado los diseños de los circuitos para las fuentes de alimentación y acondicionamiento de señales de los sensores y bombas peristálticas. Los ajustes finales se realizarán durante la operación del reactor para optimizar el rendimiento de cada sensor, lo que pospondrá el diseño de las PCB hasta validar su funcionamiento in situ. Esta estrategia evita gastos innecesarios en materiales.

El arranque del reactor se encuentra pendiente debido a la falta de sustrato (vinaza). La operación continua del sistema requiere un suministro estable de este subproducto, actualmente escaso en la región. La Tequilera Chinaco® en González, Tamaulipas, podría ser una fuente potencial, aunque su producción discontinua dificulta el abastecimiento.

Considerando que la estabilización del reactor tarda de uno a tres meses usando inóculo, las pruebas con los sensores y la validación de su funcionamiento se extenderán varios meses más. Una vez operativos, se procederá a la adquisición de datos para desarrollar un modelo matemático que sustente un futuro algoritmo de control automático.

6.3. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Se logró el diseño exitoso de un sistema de instrumentación electrónica de bajo costo para reactores anaerobios electroquímicos, desarrollando circuitos críticos de alimentación, acondicionamiento de señales y control para bomba peristáltica. La implementación demostró la capacidad de mantener variables operativas clave (como la corriente aplicada a los electrodos 0.2 - 4 mA y el caudal de alimentación) dentro de rangos específicos, utilizando componentes económicos sin comprometer la funcionalidad básica del sistema.

Este desarrollo sienta las bases tecnológicas para la implementación futura de un sistema de control automático que optimice la estabilidad operativa del reactor y maximice la producción de biogás. La viabilidad técnica y económica confirmada (con componentes que ofrecen prestaciones comparables a equipos comerciales de alto costo) representa una contribución significativa al desarrollo de tecnologías accesibles y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

Como siguientes pasos, se recomienda garantizar el suministro continuo de todos los insumos necesarios para el arranque y operación del reactor, incluyendo materiales y equipo para el análisis de DQO. Paralelamente, se sugiere disponer de componentes para refinar los circuitos y avanzar hacia el desarrollo de un dispositivo de control automático que mantenga el reactor en estado estable, maximice la producción de biogás y prevenga fenómenos de inhibición.

Cabe señalar que el desarrollo de un sistema de control automático completo constituye un objetivo de largo plazo. Se propone continuar esta línea de investigación con el diseño de sensores adicionales y la implementación de estrategias de control en cascada basadas en modelos de espacio de estado, consolidando así las bases para el control integral de reactores anaerobios bioelectroquímicos.

Bibliografía

- [1] INEGI, “Medio ambiente. cuéntame de México,” 2023. [Online]. Available: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/ambiente/residual.aspx?tema=T>
- [2] G. Olsson, “Instrumentation, control and automation in wastewater,” 2013. [Online]. Available: www.iwapublishing.com
- [3] A. V. Fernandez, *Modelado y control en el espacio de estados*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería y Automática, 2002.
- [4] C. Chi-Tsong, “Teoría y diseño de sistemas lineales,” 1984.
- [5] R. Salas-Cabrera, “Basic concepts and definitions in dynamic systems,” 2024.
- [6] S. Lavalle, *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.
- [7] Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, “NORMA Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones,” Secretaría de Economía, Ciudad de México, Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, 2017. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5472787&fecha=23/02/2017
- [8] S. Díaz and I. Moreno, “Mezcal vinasses treatment: A review of assessed processes,” *Tecnología y Ciencias de Agua*, 2004.
- [9] N. J. y. M. R. Ruiz-Camou, C., “Evaluación del desempeño ambiental de la producción de mezcal en Michoacán, México: Un enfoque de análisis del ciclo de vida,” *Life Cycle Assess*, vol. 28, pp. 1658–1671, 2023.
- [10] J. R. Rojas, *Tratamiento de Aguas Residuales*, cuarta edición ed. escuela colombiana de ingeniería, 2021.
- [11] L. Alvarez, “Biocombustibles gaseosos mediante digestión anaerobia, una alternativa para la demanda energética,” *Ciencia y Sociedad*, 2024.
- [12] M. G. Reynoso, “Tratamiento de vinazas tequileras a través de un reactor anaerobio electroquímico,” Noviembre 2019.

- [13] O. Rico-Asención, “Automatización y control inteligente fuzzy de un reactor uasb vía wirelss con labview,” 2015.
- [14] S. Chong, T. K. Sen, A. Kayaalp, and H. M. Ang, “The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (uasb) reactors for domestic sludge treatment - a state-of-the-art review,” pp. 3434–3470, 2012.
- [15] M. Schiappacasse, “Apuntes de biotecnología ambiental.” Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química, Junio 2002.
- [16] C. L. Velazquez and g Mendez, *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*, I. Publishing, Ed., 2017.
- [17] K. Rabaey and L. Angenent, “Bioelectrochemical systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application,” *IWA Publishing*, 2009.
- [18] D. Barrera, *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*, E. Reverte, Ed., 2014.
- [19] H. S. Fogler, *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*, 4th ed., P. Education, Ed., 2008.
- [20] A. Slate and K. Whitehead, “Microbial fuel cells: An overview of current technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [21] K. M. Rosero, “Humedales artificiales y celdas de combustible microbianas como sistemas individuales combinados para el tratamiento de aguas residuales,” Mayo 2019.
- [22] O. KeChrist and H. Onyeaka, “Microbial fuel cells a renewable energy technology for bioelectricity generation: A mini review,” *Electrochemistry Communications*, 2021.
- [23] S. Maddalwar and K. Kumar, “Plant microbial fuel cell: Opportunities, challenges, and prospects,” *Biosource Technology*, 2021.
- [24] T. Hua and S. Li, “Microbial electrolysis cell as an emerging versatile technology: a review on its potential application, advance and challenge,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2018.
- [25] S. Spiess and J. Kucera, “Impact of carbon felt electrode pretreatment on anodic biofilm composition in microbial electrolysis cells,” *Current Opinion in Biotechnology*, 2021.
- [26] R. Rosseau and L. Etcheverry, “Microbial electrolysis cell (mec): Strengths, weaknesses and research needs from electrochemical engineering standpoint,” *Applied Energy*, 2020.
- [27] K. Katuri and M. Ali, “The role of microbial electrolysis cell in urban wastewater treatment: integration options, challenges, and prospects,” *Current Opinion in Biotechnology*, 2019.
- [28] K. Mishima and M. Nakamura, *Self-Immobilization of Aerobic Activated Sludge A Pilot Study of the Aerobic Upflow Sludge Blanket Process in Municipal Sewage Treatment*, I. Publishing, Ed., 1991.

- [29] T. Abbasi and S. Abbasi, "Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (uasb) reactors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
- [30] CONAGUA, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos anaerobios*, CONAGUA, Ed., 2018.
- [31] D. R. Rendón, "Estado del arte del proceso de lodo activado granular y diseño de un prototipo de laboratorio," Febrero 2022.
- [32] S. Tay and B. Moy, "Comparing activated sludge and aerobic granules as microbial inocula for phenol biodegradation," *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005.
- [33] I. J. R. Benitez, "Efecto de las condiciones de arranque de filtros anaerobios de flujo ascendente en la producción de hidrógeno a partir de vinaza tequilera," Marzo 2021.
- [34] A. D. D. Basurto, "Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos organicos generados en el mercado tiquipaya," Noviembre 2013.
- [35] D. Bastone and J. Keller, "The iwa anaerobic model no 1 for enhanced understanding and application of the anaerobic treatment processes," *Water Science and Technology*, 2002.
- [36] R. M. Tamayo, F. A. García, and J. E. Marín, "Modelado y control automático de temperatura de un reactor uasb para el tratamiento de lixiviados en el rango mesofílico," 2006.
- [37] N. Hilgert, J. R. M. Harmand, J.-P. Steyer, and J.-P. Vila, "Nonparametric identification and adaptive control of an anaerobic fluidized bed digester."
- [38] V. Alcaraz-González, J. Harmand, A. Rapaport, J. P. Steyer, V. G. Alez-Alvarez, and C. Pelayo-Ortiz, "Software sensors for highly uncertain wwtps: a new approach based on interval observers," pp. 2515–2524, 2002.
- [39] E. A. V. Gómez, "Utilización de vinazas como sustratos en biorreactores uasb y egbs," Noviembre 2020.
- [40] W. A. Salmerón, "Evaluación del tratamiento anaerobio con un reactor uasb de las aguas residuales domésticas a temperatura mesofílica," Noviembre 2020.
- [41] R. Fonseca and M. Zaiat, "Development of a low-cost electrochemical sensor for monitoring components in wastewater treatment processes," *Environmental Technology*, 2022.
- [42] R. Tice and Y. Kim, "Methanogenesis control by electrolytic oxygen production in microbial electrolysis cells," *Hydrogen energy*, 2014.
- [43] L. Gao and T. Sangeetha, "The regulating role of applied voltage on methanogenesis in an up-flow single-chamber microbial electrolysis assisted reactor," *Water Process Engineering*, 2023.
- [44] R. Shinde and A. Hackula, "Dynamic anaerobic digestion-based biorefineries for on-demand renewable energy and bioproducts in a circular bioeconomy," *Trends in Biotechnology*, 2025.

- [45] S. Milani and G. Bidhendi, "Biogas and photovoltaic solar energy as renewable energy in wastewater treatment plants: A focus on energy recovery and greenhouse gas emission mitigation," *Water Science and Engineering*, 2023.
- [46] C. Mahmed and R. Verma, "Evaluation of biogas production from food waste under thermophilic and mesophilic conditions under swiss conditions," *Environmental Management and Sustainable Development*, 2025.
- [47] B. Navoneel and S. Mukherjee, "Arduino based liquid dispenser system using peristaltic pump," *Applied Electronics and Instrumentation Engineering*, 2017.
- [48] T. Desteffani, "Use of the 555 integrated circuit for the construction of a pwm module," *Brazilian Journal of Science*, 2023.
- [49] Y. Küçükağa and A. Facchin, "An original arduino-controlled anaerobic bioreactor packed with biochar as a porous filter media," *MethodsX*, 2022.
- [50] D. Theodosi and K. Papadopoulou, "Improving the biogas production and methane yield in an uasb reactor with the addition of sulfate," *Preprints*, 2023.
- [51] A. D. Ausilio, "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment," *Psychonomic Society*, 2012.
- [52] I. R. Ruiz and M. R. Reyes, "Diseño de un sistema de control para el ajuste del trh y temperatura de un reactor de flujo ascendente a escala laboratorio para estudios de degradación," Febrero 2025.
- [53] W. Ahmed and M. Aggour, "Biogas control: Methane production monitoring using arduino," *International Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 2017.
- [54] M. Gómez and I. Hernández, "Industrial wastewater treatment by anaerobic digestion using a solar heater as renewable energy for temperature-control," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2020.
- [55] C. Flores and G. Mockaitis, "Psler: A power supply and datalogging application for microbial-electrolysis systems," *Preprints*, 2024.
- [56] A. Ding and Y. Yang, "Impact of applied voltage on methane generation and microbial activities in an anaerobic microbial electrolysis cell (mec)," *Chemical Engineering Journal*, 2016.
- [57] G. Baek and L. Shi, "The effect of high applied voltages on bioanodes of microbial electrolysis cells in the presence of chlorides," *Chemical Engineering Journal*, 2021.
- [58] F. Ndayisenga and Z. Yu, "Effects of the applied voltage on electroactive microbial biofilm viability and hydrogen production in a recalcitrant organic waste-fed single-chamber membrane-free microbial electrolysis cell performance," *Chemical Engineering Journal*, 2023.
- [59] O. Guerrero and J. Baeza, "Exploring key operational factors for improving hydrogen production in a pilot-scale microbial electrolysis cell treating urban wastewater," *Chemical Engineering Journal*, 2023.

- [60] K. M. ruf and C. Insaniah, “Internet of things for real-time monitoring of water quality with integrated temperature, ph, and tds sensors,” *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science*, 2024.
- [61] Y. Ahing and A. Sumarahinsih, “Design of filterization monitoring system in household wastewater treatment using iot based pid method,” *Jurnal Teknik*, 2025.
- [62] J. Sitranata and J. Teng, “Aqualyze: Smart monitoring water quality through iot-enabled sensors in ras,” *Procedia Computer Science*, 2025.
- [63] Honeywell International Inc., *AWM3000 Series Mass Airflow Sensors*, 2023, documento técnico del fabricante.
- [64] DFRobot, *pH-4502C pH Sensor Module with BNC-201 Electrode Datasheet*, 2023, hoja de datos del módulo sensor de pH-4502C con electrodo BNC-201. [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1784.html>
- [65] Kamoer Fluid Tech (Shanghai) Co., Ltd., *NKP-DCL Series Programmable Peristaltic Pump User Manual and Technical Specifications*, 2023, hoja de datos y manual de usuario para la serie NKP-DCL de bombas peristálticas programables. [Online]. Available: <https://www.kamoer.com/upload/NKP-DCL-Manual.pdf>
- [66] Oceanaqua International Co., Ltd., *OCT Series Heater with Temperature Control User Manual and Technical Specifications*, 2023, manual de usuario y especificaciones técnicas del resistor calentador OCT-25. [Online]. Available: <https://www.oceanaqua.com/products/oct-series-heaters>
- [67] I. Ieppoulos and J. Greenman, “The future role of mfcs in biomass energy,” *Frontiers in Energy Research*, 2023.
- [68] Keyence Corporation, *Flow Sensors Catalog - FD-Q Series*, 2023.
- [69] Mettler Toledo, *Industrial pH Electrodes Catalog*, 2023.
- [70] Hamilton Company, *pH/ORP Electrodes Product Guide*, 2022.
- [71] Cole-Parmer, *Peristaltic Pump Controllers Catalog*, 2023.