



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Modelado y control de temperatura para el electrolito de un
electrolizador alcalino

presentada por
Ing. Arlett Adame Najera

como requisito para la obtención del grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez

Codirector de tesis
Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2026.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 17/junio/2026

Oficio No. DIE/0138/2026

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. ARLETT ADAME NAJERA**, con número de control **M24CE016** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"MODELADO Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL ELECTROLITO DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional: 7534115

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional: 3431842

REVISOR 1

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional: 9968714

REVISOR 2

Dr. Manuel Adam Medina
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional: 5992003

C.c.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante

JGM/ibm



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2225,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **15/junio/2026**

Oficio No. SAC/162/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ARLETT ADAME NAJERA
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"MODELADO Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL ELECTROLITO DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

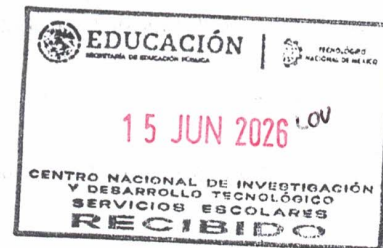
"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4106,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

Resumen

En el presente trabajo de tesis se abordó el análisis, instrumentación, modelado y control de temperatura de un sistema de electrólisis alcalina para la producción de gas oxihidrógeno (HHO) utilizando hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. El desarrollo experimental se centró en estudiar la influencia de la temperatura y la concentración del electrolito sobre la producción de HHO, así como en implementar una estrategia de control en cascada para regular la temperatura del sistema adecuadamente ante incertidumbres y perturbaciones exógenas.

Inicialmente, se adaptó un intercambiador de calor a un sistema electrolítico con sensores de temperatura y flujo integrados, utilizando Arduino, myRIO y LabVIEW para adquirir, visualizar y almacenar datos en tiempo real. Posteriormente, se evaluó experimentalmente la producción de HHO en lazo abierto en función de la temperatura, para concentraciones de KOH del 10 %, 15 % y 30 % en masa. Los resultados mostraron producciones máximas de 1.4311 SLPM, 2.115 SLPM y 1.98 SLPM, respectivamente.

Asimismo, se parametrizó un modelo dinámico de un intercambiador de calor de placas, para determinar la temperatura de salida del electrolito y del sistema de enfriamiento. Los resultados de validación mostraron una alta precisión del modelo, obteniéndose errores absolutos medios menores a 0.11 °C para el agua de enfriamiento y 0.0878 °C para la salida de electrolito, y errores cuadráticos medios menores de 0.021 y 0.0138, respectivamente.

Finalmente, se implementó una estrategia de control en cascada para la regulación de temperatura del electrolizador. El controlador permitió mantener estable la temperatura del electrolito ante perturbaciones y variaciones paramétricas relacionadas con la concentración y las propiedades del electrolito. La operación en lazo cerrado mostró un aumento en la producción de HHO respecto a la operación en lazo abierto.

Abstract

This thesis addresses the analysis, instrumentation, modeling, and temperature control of an alkaline electrolysis system for the production of oxyhydrogen gas (HHO) using potassium hydroxide (KOH) as the electrolyte. The experimental work focused on studying the influence of temperature and electrolyte concentration on HHO production, as well as on implementing a cascade control strategy to properly regulate the system's temperature in the face of uncertainties and exogenous disturbances.

Initially, a heat exchanger was adapted to an electrolytic system with integrated temperature and flow sensors, using Arduino, myRIO, and LabVIEW to acquire, display, and store data in real time. Subsequently, open-loop HHO production was experimentally evaluated as a function of temperature for KOH concentrations of 10 %, 15 %, and 30 % by mass. The results showed maximum productions of 1.4311 SLPM, 2.115 SLPM, and 1.98 SLPM, respectively.

Additionally, a dynamic model of a plate heat exchanger was parameterized to determine the outlet temperature of the electrolyte and the cooling system. Validation results showed high model accuracy, with mean absolute errors of less than 0.11 °C for the cooling water and 0.0878 °C for the electrolyte outlet, and mean squared errors of less than 0.021 and 0.0138, respectively.

Finally, a cascade control strategy was implemented to regulate the electrolyzer temperature. The controller kept the electrolyte temperature stable despite disturbances and parameter variations related to the electrolyte's concentration and properties. Closed-loop operation resulted in increased HHO production compared to open-loop operation.

Dedicatoria

*A **Dios** por darme la oportunidad de cumplir otra meta en mi vida, por guiarme y darme la fortaleza para seguir adelante.*

*A **mis padres, Elizabeth Najera y Erick Adame** por ser la inspiración de mi vida y acompañarme siempre con su amor y ejemplo. Con todo mi cariño y admiración, les dedico este logro.*

*A **mis hermanos, Tanya Adame y Erick Zain Adame** por el apoyo brindado y cada momento compartido. Tenerlos en mi vida es una bendición. Los quiero mucho.*

Agradecimientos

Agradezco primeramente **a Dios**, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para superar cada reto presentado a lo largo de este camino, y por permitirme culminar una etapa más en mi vida profesional y personal.

A mi familia, especialmente a mis padres, **Elizabeth Nájera y Erick Adame**, por su amor, esfuerzo, consejos y apoyo incondicional en cada momento. Gracias por ser mi inspiración, por creer siempre en mí y por impulsarme a seguir adelante aún en los momentos más difíciles. A mis hermanos, **Tanya Adame y Erick Zain Adame**, por su compañía, cariño y motivación.

Agradezco al **Dr. Fabricio Escobar Jiménez** por hacerme parte de proyecto, por su paciencia y conocimiento impartido, al Doctor **Gerardo Vicente Guerrero** por su apoyo, orientación y disposición durante el desarrollo de esta investigación.

A mis revisores el **Dr. Manuel Adam Medina** y a la **Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo** a quienes agradezco por el tiempo, observaciones y recomendaciones brindadas, las cuales contribuyeron significativamente al desarrollo de esta tesis.

Al Maestro **Víctor Miguel Salinas Cortés** por su amistad, conocimiento impartido, técnicas y experiencias en el laboratorio.

A mis **amigos de JME**, por su apoyo, comprensión y por todos los momentos compartidos durante esta etapa. Gracias por acompañarme, aconsejarme y estar en los momentos difíciles.

A mi pareja, **Carlos González** por su amor, apoyo, paciencia y motivación constante.

Al **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)**, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y desarrollar esta investigación, así como por proporcionar los conocimientos, herramientas y espacios necesarios para mi crecimiento profesional.

También agradezco a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el apoyo económico durante el desarrollo de esta investigación.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. General	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Metas	4
1.4. Planteamiento del problema	5
1.5. Justificación	7
2. Estado del Arte	8
2.1. Electrolitos utilizados en electrolizadores alcalinos	8
2.2. Control en electrolizadores alcalinos	11
2.2.1. Control de distintas variables en electrolizadores alcalinos	11
2.2.2. Control de temperatura en electrolizadores alcalinos	12
2.3. Modelos empleados para describir la temperatura del electrolito	15
2.4. Condiciones de operación de temperatura en electrolizadores alcalinos	16
3. Marco teórico	19
3.1. Electrólisis del agua	19
3.2. Electrolizador alcalino	19
3.2.1. Diseño unipolar	20
3.2.2. Diseño bipolar	20
3.2.3. Con brecha	21
3.2.4. Sin brecha	21
3.3. Gas Brown	22
3.4. Electrolito	23
3.5. Conductividad	23

3.6. Intercambiador de calor	24
3.7. Modelo matemático de un intercambiador de calor	25
3.8. Eficiencia de Faraday	26
3.9. Estructura de un control PID	27
3.10. Control Adaptable	29
4. Metodología	32
4.1. Diseño e Instrumentación del sistema	32
4.1.1. Componentes del sistema	33
4.1.2. Caracterización	36
4.1.3. Sistema de control de la bomba	40
4.1.4. Adquisición de datos	40
4.1.5. Programación en Labview	42
4.2. Procedimiento para el desarrollo experimental en lazo abierto	42
4.3. Modelado del intercambiador de calor de placas	44
4.4. Diseño del control	45
4.4.1. Control Proporcional-Integral (Método Ziegler-Nichols)	45
4.4.2. Control adaptable	46
5. Resultados	52
5.1. Implementación de un sistema de enfriamiento en un electrolizador alcalino .	52
5.2. Producción de HHO en función de la temperatura (Lazo abierto)	54
5.2.1. Producción de HHO a una concentración del 10 % masa de KOH . . .	54
5.2.2. Producción de HHO a una concentración del 15 % masa de KOH . . .	58
5.2.3. Producción de HHO a una concentración del 30 % masa de KOH . . .	61
5.2.4. Datos generales de la producción de HHO a distintas concentraciones (10 %, 15 %, 30 %)	64
5.3. Validación del modelo	66
5.4. Sintonización PI	67
5.5. Puntos de operación para la regulación de temperatura (Control en cascada)	70
5.5.1. Control de temperatura a una concentración del electrolito del 10 % .	70
5.5.2. Control de temperatura a una concentración del electrolito del 15 % .	73
5.5.3. Control de temperatura a una concentración del electrolito del 30 % .	75
5.5.4. Eficiencia de Faraday	77

6. Conclusiones y trabajos futuros	78
6.1. Instrumentación del sistema	78
6.2. Producción de HHO	79
6.3. Validación del modelo y control	80
A. Nomenclatura	89

Índice de figuras

1.1. Electrolizador alcalino.	2
1.2. Antecedente 1 (Cervantes Bobadilla,2019).	3
1.3. Antecedente 2 (Salinas Cortés,2024).	3
3.1. Componentes del electrolizador alcalino.	20
3.2. Configuración unipolar.	20
3.3. Configuración unipolar.	21
3.4. Configuración con brecha.	21
3.5. Configuración sin brecha.	22
3.6. Valores de la conductividad a distintas concentraciones y temperaturas [1].	24
3.7. Intercambiador de calor.	25
3.8. Diagrama de bloques PID.	27
3.9. Diagrama general de un sistema de control adaptativo	30
3.10. Diagrama en bloques de un sistema adaptable con modelo de referencia [53].	31
3.11. Diagrama en bloques de un sistema con regulador auto-ajustable [53].	31
3.12. Diagrama en bloques de un sistema con ganancia tabulada [53].	31
4.1. Diagrama de instrumentación.	32
4.2. Electrolizador alcalino.	33
4.3. Intercambiador de calor de placas del sistema.	33
4.4. Fuente de alimentación 1.	34
4.5. Fuente de alimentación 2.	34
4.6. Tanque de almacenamiento.	34
4.7. Bomba de diafragma.	35
4.8. Sensor de flujo.	35
4.9. Sensor de temperatura.	35
4.10. Enfriador líquido.	36

4.11. Sensor de flujo de gas.	36
4.12. Polinomio de ajuste de la bomba electrolito.	37
4.13. Código de arduino para el sensor de flujo.	37
4.14. Polinomio de ajuste del sensor de flujo.	38
4.15. Código de Arduino para sensores de temperatura.	38
4.16. Sistema provisional.	39
4.17. Instrumentación del sistema de control de la bomba.	40
4.18. Código de Arduino para sensores de temperatura.	41
4.19. Diagrama de bloques en Labview.	42
4.20. Solución KOH.	43
4.21. Metodología para el análisis de la producción de HHO.	44
4.22. Diagrama de control en cascada para la regulación de temperatura.	45
4.23. Oscilación sostenida con periodo P_c	46
5.1. Vista frontal del sistema instrumentado.	53
5.2. Vista posterior del sistema instrumentado.	53
5.3. Vista lateral del sistema.	53
5.4. Interfaz de LabVIEW.	53
5.5. Temperatura vs Producción HHO (10 % KOH).	55
5.6. Temperatura vs Corriente (10 % KOH).	55
5.7. Dinámica de la corriente y la producción (10 % KOH).	56
5.8. Producción de HHO vs Corriente al 10 % en masa de KOH.	56
5.9. Temperatura vs Producción de HHO (10 % KOH)-Prueba adicional.	57
5.10. Temperatura vs Corriente (10 % KOH)-Prueba adicional.	58
5.11. Temperatura vs Producción HHO (15 % KOH).	59
5.12. Temperatura vs Corriente (15 % KOH).	60
5.13. Dinámica de la corriente y la producción de HHO (15 % KOH).	60
5.14. Producción de HHO vs Corriente al 15 % en masa de KOH.	61
5.15. Temperatura vs Producción HHO (30 % KOH).	62
5.16. Temperatura vs Corriente (30 % KOH).	63
5.17. Dinámica de la corriente y la producción de HHO (30 % KOH).	63
5.18. Producción de HHO vs corriente al 30 % en masa de KOH.	64
5.19. Simulación de temperaturas y comparación con datos experimentales.	66
5.20. Oscilación sostenida experimental.	67
5.21. Primera sintonización.	68

5.22. Segunda sintonización.	68
5.23. Tercera Sintonización.	68
5.24. Respuesta al escalón, control PI.	69
5.25. Concentración 10 % KOH- <i>a)</i> Control de temperatura del KOH, <i>b)</i> Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, <i>b)</i> Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, <i>c)</i> Esfuerzo de control.	71
5.26. Producción de HHO en distintos puntos de operación (10 % KOH).	72
5.27. Concentración 15 % KOH- <i>a)</i> Control de temperatura del KOH, <i>b)</i> Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, <i>b)</i> Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, <i>c)</i> Esfuerzo de control.	73
5.28. Producción de HHO en distintos puntos de operación (15 % KOH).	74
5.29. Concentración 30 % KOH- <i>a)</i> Control de temperatura del KOH, <i>b)</i> Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, <i>b)</i> Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, <i>c)</i> Esfuerzo de control.	75
5.30. Producción de HHO en distintos puntos de operación (30 % KOH).	76

Índice de tablas

2.1. Comparación de los electrolitos empleados en la electrólisis alcalina.	10
2.2. Control de temperatura en electrolizadores alcalinos.	14
2.3. Modelos empleados para describir la temperatura del electrolito.	16
2.4. Condiciones de operación de temperatura.	18
4.1. Especificaciones del electrolizador.	33
4.2. Especificaciones del intercambiador.	33
4.3. Especificaciones de la fuente 1.	34
4.4. Especificaciones de la fuente 2.	34
4.5. Especificaciones del tanque.	34
4.6. Especificaciones de la bomba.	35
4.7. Especificaciones del sensor de flujo.	35
4.8. Especificaciones del sensor de temperatura.	35
4.9. Especificaciones del enfriador líquido.	36
4.10. Especificaciones del sensor de gas.	36
4.11. Datos experimentales del intercambiador de calor.	39
4.12. Datos de reparametrización el modelo.	44
4.13. Parámetros de sintonización de controladores según Ziegler-Nichols	46
5.1. Resultados experimentales para diferentes concentraciones de KOH.	65
5.2. Sintonización experimental	67
5.3. Eficiencia de Faraday para los diferentes puntos de operación y concentraciones de KOH.	77

Capítulo 1

Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles para cubrir la alta demanda de energía es una de las causas del aumento de la contaminación global. Esto ha llevado a buscar alternativas sostenibles y tecnologías verdes para un mejor uso de los recursos energéticos con la finalidad de reducir las emisiones de gases contaminantes [2, 3]. El gas oxihidrógeno (HHO) se presenta como una opción interesante por ser un combustible limpio con un alto poder calorífico, fácil de producir y económicamente viable, además de que el equipo requiere un bajo mantenimiento [4].

El HHO es una mezcla de hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) en proporción 2:1. Este gas se produce mediante la electrólisis del agua, un proceso electroquímico que separa las moléculas de agua en sus componentes mediante la aplicación de una corriente eléctrica en un electrolizador (Figura 1.1). Los electrolizadores alcalinos son unos de los más utilizados y desarrollados en la generación de HHO [5] operan a temperaturas de 60 °C a 80 °C con soluciones de KOH o NaOH al 20 %-30 % en masa [6]. La eficiencia del proceso depende de variables internas y externas, como la naturaleza del electrolizador, la concentración del electrolito, los electrodos, la temperatura, la presión y la densidad de corriente. La temperatura es un factor fundamental en el sistema, ya que influye directamente en la cinética de reacción, la corriente de alimentación, la pureza del gas generado y la estabilidad operativa del electrolizador [7]. A temperaturas elevadas pueden generar oxidación de electrodos, además, la formación de burbujas evitando la transferencia de masa [8].

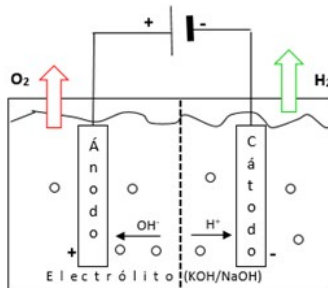


Figura 1.1: Electrolizador alcalino.

Se han desarrollado modelos matemáticos basados en principios físicos, termodinámicos y electroquímicos para describir el comportamiento dinámico térmico de los sistemas, con el fin de desarrollar y evaluar controladores avanzados que permitan alcanzar de manera eficiente los objetivos operativos [9, 10], asimismo sistemas de enfriamiento y gestión térmica para regular la temperatura del electrolizador [11]. Además, se han implementado tecnologías para un control preciso de la temperatura en los electrolizadores alcalinos, como sistemas de enfriamiento. En estos sistemas de electrólisis alcalina para la producción de oxihidrógeno, se han utilizado principalmente controladores como el proporcional-integral (PI), proporcional-integral-derivativo (PID) [12, 13] y el controlador predictivo por modelo (MPC) [14] para regular la temperatura.

El presente proyecto se centra en la implementación de un sistema de control en cascada para la regulación de la temperatura de un electrolizador alcalino destinado a la producción de HHO. Se realizó experimentación en lazo abierto para evaluar los puntos de operación más adecuados del sistema con base en la producción de HHO. Para ello, se empleó un electrolito de hidróxido de potasio a distintas concentraciones, analizando la influencia de la concentración en el comportamiento térmico y electroquímico del electrolizador alcalino.

Posteriormente, se llevó a cabo la adaptación de un sistema de enfriamiento con el propósito de regular la temperatura del proceso y mantener condiciones de operación más estables. A partir de la información experimental obtenida, se estableció un modelo del sistema que permitió analizar su comportamiento dinámico y sirvió como base para la selección de la temperatura de operación del electrolizador en la implementación de la estrategia de control de temperatura. Con ello, se buscó mejorar la regulación de la temperatura y el desempeño del proceso de electrólisis para la producción de HHO.

1.1. Antecedentes

En 2019 en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cervantes Bobadilla [15] desarrolló un trabajo de tesis titulado "Producción de hidrógeno sobre demanda para adición, como aditivo en motores de combustión interna", el objetivo de este proyecto se basó en proponer un esquema para el desarrollo de un modelo matemático y control de un electrolizador alcalino con la finalidad de producir hidrógeno sobre demanda para alimentar un motor de combustión interna.

En 2024, Salinas Cortés [16] diseñó y construyó un electrolizador de 12 placas con una capacidad de producción de 1.5 SLPM (litros estándar por minuto), en el cual se identificaron experimentalmente modelos dinámicos de la producción de oxihidrógeno, así como controladores en función de las variables de corriente y flujo. La corriente suministrada fue controlada mediante modulación por ancho de pulsos (PWM).

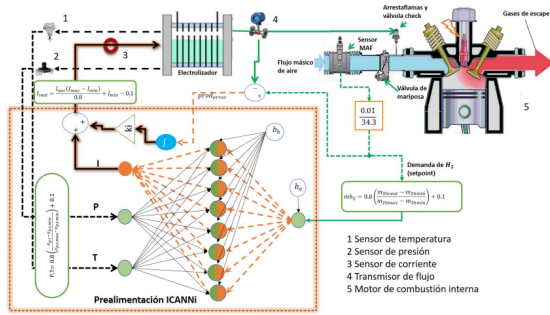


Figura 1.2: Antecedente 1 (Cervantes Bobadilla, 2019).

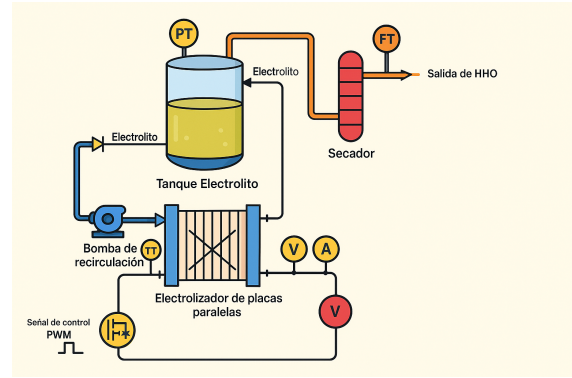


Figura 1.3: Antecedente 2 (Salinas Cortés, 2024).

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Analizar el impacto de la variabilidad de temperatura del electrolito en un electrolizador alcalino en la producción de oxihidrógeno.

1.2.2. Específicos

- Implementar e instrumentar un intercambiador de calor en un electrolizador alcalino.

- Parametrizar un modelo matemático del intercambiador de calor para estimar la dinámica de la temperatura del electrolito (KOH).
- Simular el modelo del intercambiador de calor para estimar la temperatura del electrolito (KOH) y compararlo con los datos experimentales.
- Diseñar una ley de control en cascada mediante un control adaptable y un control PI para regular la temperatura del sistema, con la finalidad de operarlo de forma regulada.
- Implementar mediante un programa de LabVIEW el sistema de control en cascada para regular la temperatura del electrolito (KOH) así como una interfaz gráfica para el monitoreo y registro de datos del electrolizador alcalino.
- Desarrollar un análisis experimental en lazo abierto para determinar la dinámica de la producción de oxihidrógeno a diferentes temperaturas y establecer las mejores condiciones de operación.
- Regular la temperatura del electrolito tomando como referencia las menores temperaturas establecidas en el análisis en lazo abierto que exhiban rendimientos altos en la producción de HHO.

1.3. Metas

- La obtención de un banco de pruebas instrumentado para la producción de oxihidrógeno con sistema de enfriamiento.
- La obtención de un modelo matemático del intercambiador de calor parametrizado, que representa adecuadamente la dinámica de la temperatura del electrolito (KOH).
- Obtención de resultados de la validación del modelo del intercambiador de calor, permitiendo estimar la temperatura del electrolito (KOH) adecuadamente y validando su desempeño mediante la comparación con datos experimentales.
- Obtención de una ley de control en cascada que integra un control adaptable y un control PI, permitiendo la regulación adecuada de la temperatura del sistema durante su operación.

- Obtención de una interfaz gráfica programada en LabVIEW que integra el sistema de control en cascada, permitiendo la regulación de la temperatura del electrolito (KOH) y facilitando el monitoreo y almacenamiento de datos mediante una interfaz gráfica.
- Obtención del análisis experimental en lazo abierto, obteniendo la dinámica de la producción de HHO a distintas temperaturas y permitiendo identificar las condiciones de operación más adecuadas.
- Obtención de una ley de control para regular la temperatura del electrolito en los valores establecidos a partir del análisis en lazo abierto, asegurando una operación adecuada del sistema.

1.4. Planteamiento del problema

El calentamiento global representa una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial debido al incremento de gases de efecto invernadero generados por actividades industriales y energéticas. El uso intensivo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural ha provocado un aumento considerable en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo al deterioro ambiental, al aumento de la temperatura global y al cambio climático. Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar tecnologías energéticas limpias y sostenibles que permitan reducir la dependencia de los combustibles convencionales y disminuir el impacto ambiental asociado a su utilización [17].

La producción de oxihidrógeno (HHO) mediante electrólisis alcalina ha cobrado interés debido a su potencial como fuente de energía limpia y alternativa a los combustibles fósiles. Sin embargo, el desempeño de los electrolizadores alcalinos depende considerablemente de variables de operación como la temperatura, la corriente suministrada y la concentración del electrolito [12]. En sistemas que utilizan hidróxido de potasio (KOH), el incremento de temperatura ocasionado por el efecto Joule y las reacciones electroquímicas modifica propiedades fisicoquímicas del electrolito, tales como la conductividad, viscosidad y densidad, afectando directamente la dinámica del sistema y la producción de HHO [18].

De acuerdo con Qi et al. [8] estudios reportan que el aumento de la temperatura favorece la conductividad iónica y la producción de gas, sin embargo, las temperaturas elevadas pueden provocar inestabilidad térmica, disminución de eficiencia energética y riesgos operativos asociados al sobrecalentamiento del electrolizador. Además, las variaciones de temperatura generan cambios paramétricos no lineales que dificultan mantener condiciones adecuadas de

operación mediante controladores convencionales de parámetros fijos.

Aunque existen investigaciones enfocadas en analizar experimentalmente la influencia de la concentración, la corriente y la temperatura sobre la producción de HHO, gran parte de estos trabajos se limita a la caracterización del proceso, sin abordar estrategias de control capaces de adaptarse a las variaciones dinámicas del sistema. Esto representa una problemática importante, ya que durante la operación del electrolizador las propiedades del sistema cambian continuamente en función de la temperatura y la concentración del electrolito, provocando incertidumbres y perturbaciones que afectan la estabilidad del proceso y el desempeño del sistema de producción de HHO [8, 19].

Por ello, surge la necesidad de implementar un sistema de control de temperatura capaz de adaptarse a las variaciones paramétricas del electrolizador alcalino sin requerir una reparametrización constante del modelo. En este contexto, la presente investigación propone el desarrollo e implementación de un sistema de enfriamiento y una estrategia de control adaptable aplicada a un electrolizador alcalino para la producción de HHO, con el propósito de mantener la estabilidad térmica del sistema, mejorar las condiciones de operación y contribuir al incremento de la eficiencia del proceso de electrólisis.

1.5. Justificación

La creciente demanda energética y la necesidad de reducir las emisiones contaminantes generadas por los combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de tecnologías basadas en energías renovables y combustibles limpios. En este contexto, el gas HHO, compuesto por hidrógeno y oxígeno, obtenido por la electrólisis del agua, surge como una alternativa energética prometedora debido a la alta densidad energética del hidrógeno y a que su uso no genera emisiones contaminantes directas; usar el HHO no tendría un impacto ambiental negativo, aprovechando fuentes de energía sostenibles.

La producción de HHO mediante electrólisis alcalina ha adquirido gran relevancia en investigación y desarrollo debido a su potencial para integrarse con sistemas de energía renovable. Este proceso se lleva a cabo en electrolizadores alcalinos, cuyo desempeño depende de variables como la corriente, el voltaje, la concentración del electrolito y la temperatura. Entre estos factores, la temperatura es uno de los que impactan fuertemente el proceso, ya que influye directamente en las propiedades fisicoquímicas del electrolito, como la conductividad, viscosidad y transferencia de masa, afectando la eficiencia energética, la estabilidad operativa y la producción de HHO.

Diversos autores, como Cantisani et al. [20], señalan que la gestión térmica es esencial para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro en sistemas de electrólisis alcalina para generación de hidrógeno u HHO. Aunque el incremento de la temperatura puede favorecer la cinética electroquímica y aumentar la producción de HHO, también puede provocar variaciones dinámicas y cambios en los parámetros del sistema, lo que dificulta mantener condiciones de operación estables. Por esta razón, el presente proyecto se desarrolló con el objetivo de implementar un sistema de control basado en un modelado dinámico que permitiera describir y regular el comportamiento térmico de un electrolizador alcalino mediante la adaptación de un sistema de enfriamiento. Asimismo, se buscó establecer un punto de operación adecuado en función de la temperatura y la concentración del electrolito, con el fin de mejorar la estabilidad del proceso y la producción de HHO.

Capítulo 2

Estado del Arte

La electrólisis del agua ha sido una de las tecnologías más estudiadas y desarrolladas a lo largo de los últimos años para la producción sostenible de oxihidrógeno, ya que es un proceso escalable y que permite el uso de energías renovables. Este proceso puede traer beneficios significativos para combatir el cambio climático, diversificar las fuentes de energía y promover una economía ecológica. Sin embargo, un sistema de electrólisis alcalina ha sido objeto de estudio debido a distintos factores que influyen en su desempeño para la producción de oxihidrógeno u hidrógeno tales como: la temperatura, electrolitos, electrodos, densidad de corriente, presión, entre otros.

2.1. Electrolitos utilizados en electrolizadores alcalinos

La electrólisis alcalina del agua representa una de las tecnologías más maduras para la producción de hidrógeno y oxihidrógeno debido a su relativa simplicidad de implementación, bajo costo operativo y compatibilidad con fuentes de energía renovable [17, 21]. En este tipo de sistemas, el electrolito desempeña un papel fundamental, ya que determina la conductividad iónica del medio, las pérdidas óhmicas, la eficiencia energética y la estabilidad operativa del electrolizador. Por esta razón, diversos estudios han centrado su atención en analizar el efecto de la concentración del electrolito, la temperatura de operación y el tipo de solución alcalina empleada.

Los electrolitos más utilizados en electrólisis alcalina son el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), debido a que presentan alta conductividad iónica y menor corrosión en comparación con soluciones ácidas [22, 23]. Entre ambos, el KOH ha mostrado un mejor desempeño electroquímico, principalmente por su mayor movilidad iónica y menor

resistencia interna del sistema [1, 13]. Sellami y Loudiyi [13] realizaron un estudio comparativo entre KOH y NaOH bajo las mismas condiciones de operación, observando que el KOH alcanzó una eficiencia cercana al 90.25 %, mientras que el NaOH obtuvo aproximadamente 83.33 %. Los autores atribuyen esta diferencia a la mayor conductividad del KOH y a una mejor transferencia de carga durante el proceso de electrólisis.

Diversas investigaciones coinciden en que el aumento de la concentración del electrolito incrementa inicialmente la producción de hidrógeno debido a la reducción de las pérdidas óhmicas y a los incrementos de la conductividad eléctrica. Sakas et al. [9] analizaron un electrolizador alcalino industrial, empleando KOH al 25 % m/m y reportaron una eficiencia de Faraday del 86 %, señalando que el incremento de la concentración favorece la densidad de corriente y mejora la producción de hidrógeno. De manera similar, Rodríguez y Amores [24] validaron experimentalmente una celda alcalina con KOH al 30 % m/m operando entre 50 °C y 80 °C, concluyendo que tanto la temperatura como la concentración del electrolito reducen el voltaje requerido en la celda y mejoran la cinética electroquímica del proceso. El efecto positivo de la temperatura también ha sido ampliamente documentado. Jang et al. [14] desarrollaron un modelo numérico para estudiar el comportamiento térmico de un sistema de electrólisis alcalina y demostraron que el incremento de temperatura favorece la transferencia de masa, disminuye la resistencia interna y mejora la eficiencia global del sistema. Resultados similares fueron reportados por Tuysuz [25], quien concluyó que operar en intervalos de temperatura entre 60 °C y 90 °C permite alcanzar mayores densidades de corriente y una mejor eficiencia electroquímica.

En aplicaciones orientadas a la producción de HHO, Essuman [10] evaluó experimentalmente concentraciones de KOH y NaOH entre 0.01 M y 0.03 M, observando que un incremento de concentración produce mayores volúmenes de gas HHO. El estudio mostró, además, que el KOH proporciona una producción superior, en comparación con el NaOH en las mismas condiciones de voltaje y temperatura. Estos resultados coinciden con los obtenidos por El Kady et al. [18] y Vethamony y Thangavel [19], quienes reportaron que el aumento de la temperatura y la concentración acelera la liberación de burbujas y mejora la generación de gas.

No obstante, algunos estudios indican que incrementar excesivamente la concentración del electrolito puede provocar efectos adversos. Mousa et al. [12] analizaron soluciones de KOH entre 0.01 M y 0.2 M y observaron que, aunque la producción de gas aumenta, la eficiencia energética del generador disminuye ligeramente debido al incremento de las pérdidas térmicas y los fenómenos asociados al calentamiento del electrolito. De manera semejante, Araújo

et al. [26] reportaron que concentraciones elevadas incrementan la viscosidad de la solución y modifican la dinámica de formación de burbujas, lo cual puede afectar la transferencia de masa y la estabilidad operacional del sistema.

En términos generales, el estudio de la literatura mostró que el KOH es el electrolito con mejor desempeño para su uso en electrolizadores alcalinos debido a su elevada conductividad y estabilidad electroquímica. Además, se reconoce que tanto la temperatura como la concentración del electrolito son variables críticas para maximizar la producción de hidrógeno u oxihidrógeno [9, 10]. Sin embargo, también se evidencia que incrementos excesivos de concentración pueden ocasionar problemas relacionados con el aumento de viscosidad, sobrecalentamiento y pérdidas energéticas, por lo que resulta necesario establecer condiciones óptimas de operación que permitan mantener un equilibrio entre eficiencia, estabilidad térmica y consumo energético [12]. En la Tabla 2.1, se muestran de forma resumida los electrolitos que se han utilizado a cierta concentración y el efecto que han tenido en el proceso de electrolisis alcalina.

Tabla 2.1: *Comparación de los electrolitos empleados en la electrólisis alcalina.*

Tipo	Concentración	T (°C)	Producción / Resultado	Referencia
KOH	25 % m/m	70	H_2 , eficiencia de Faraday de 86 %. El aumento de concentración mejoró la conductividad iónica y disminuyó las pérdidas óhmicas, favoreciendo la densidad de corriente y la producción de gas.	[9]
KOH, NaOH	3 M	25–80	H_2 , muestran que el KOH es más eficaz que el hidróxido de sodio (NaOH) para las mismas condiciones de electrólisis de presión, temperatura y corriente, obteniendo una eficiencia del 90.25 % y de 83.33 %, respectivamente.	[13]
KOH	30 % m/m	70	H_2 , eficiencia de 77 %. El incremento de temperatura y concentración favoreció la reducción del voltaje de celda y mejoró la cinética electroquímica.	[14]
KOH, NaOH	0.01 M a 0.03 M	44	HHO, producción de 71.96 %, mostrando que a mayor concentración existe mayor producción de HHO. De los dos electrolitos evaluados, la mayor producción se obtuvo empleando KOH.	[10]
KOH	0.01 a 0.2 M	60	Los valores promedio de eficiencia del generador disminuyeron significativamente de 53.09 % a 51.37 % con el aumento de la concentración de KOH.	[12]
KOH	25 a 35 % m/m	30 a 60	Al incrementar la concentración del electrolito existe un aumento en la producción de H_2 ; sin embargo, también conlleva a una mayor viscosidad y velocidad de formación de gas a concentraciones elevadas.	[26]
NaOH	1 a 5 M	25-60	Incremento en la producción de H_2 con el aumento de temperatura. Mayores concentraciones mejoraron la conductividad.	[27]
KOH	20 a 30 % m/m	60-90	Mayor densidad de corriente y mejora de la eficiencia electroquímica. El incremento de temperatura favoreció la cinética de reacción y disminuyó la resistencia interna del sistema.	[25]

2.2. Control en electrolizadores alcalinos

En este apartado se presentan los trabajos de investigación relacionados con los controladores empleados en la regulación y el control de las variables que intervienen en el proceso de electrólisis.

2.2.1. Control de distintas variables en electrolizadores alcalinos

El control de procesos en sistemas de electrólisis alcalina ha adquirido gran relevancia en los últimos años debido a la necesidad de mejorar la eficiencia energética, la seguridad operativa y la producción de hidrógeno. Diversos autores han implementado estrategias de control sobre diferentes variables del proceso, tales como la corriente de electrólisis, la potencia suministrada, la presión de operación, la pureza del hidrógeno y la temperatura del sistema, tales como controladores PI, MPC, adaptativos, difusos y óptimos [28]. Por ejemplo, Uribe et al. [29] emplearon un controlador por modos deslizantes para regular la pureza del hidrógeno en electrolizadores alcalinos de alta presión, mientras que Ayubirad et al. [30] desarrollaron una estrategia de control basada en restricciones para mantener la presión dentro de límites seguros operando con variaciones rápidas de potencia. Asimismo, Qi et al. [8] propusieron un controlador predictivo no lineal (NMPC) capaz de coordinar simultáneamente variables como la corriente, el flujo de electrolito y la temperatura, con el objetivo de maximizar la eficiencia energética del sistema. De igual forma, Flamm et al. [31] utilizaron control predictivo basado en modelo (MPC) para optimizar la producción de hidrógeno considerando restricciones de potencia y condiciones operativas.

Estos trabajos evidencian que la implementación de estrategias de control avanzadas mejoran significativamente el desempeño de los electrolizadores alcalinos. Sin embargo, entre todas las variables involucradas en el proceso, la temperatura constituye uno de los parámetros más críticos debido a su influencia directa sobre la conductividad del electrolito, la cinética de reacción, la eficiencia energética y la estabilidad operativa del sistema. Por ello, diversos investigadores han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de estrategias específicas para el control térmico de electrolizadores alcalinos; estas estrategias se describen en el siguiente apartado.

2.2.2. Control de temperatura en electrolizadores alcalinos

El control de la temperatura en electrolizadores alcalinos es uno de los principales desafíos para garantizar la estabilidad operativa, la eficiencia energética y la seguridad del sistema durante la producción de hidrógeno y oxihidrógeno (HHO). La temperatura influye directamente sobre parámetros como la conductividad del electrolito, la velocidad de reacción electroquímica, la densidad de corriente y la eficiencia del proceso, por lo que diversos autores han desarrollado estrategias de control orientadas a mantener un comportamiento térmico estable en el sistema [8].

Entre los controladores más utilizados en electrolizadores alcalinos destacan el controlador proporcional-integral (PI), el controlador proporcional-integral-derivativo (PID) y el controlador predictivo basado en modelo (MPC, por sus siglas en inglés). Estas estrategias de control han sido implementadas para reducir el sobreimpulso térmico, mejorar el tiempo de respuesta y mantener la temperatura del electrolito dentro de los rangos seguros de operación.

Flamm et al. [31] desarrollaron una estrategia de control predictivo basada en modelo (MPC) aplicada a electrolizadores para optimizar la producción de hidrógeno. El sistema operó en un rango de temperatura de 50 °C a 70 °C donde el controlador MPC fue capaz de predecir la evolución térmica del sistema a lo largo de un horizonte de optimización. Los autores reportaron un error cuadrático medio (RMSE) de 0.6641 °C. Demostrando así que el control predictivo presenta una elevada precisión para la regulación de la temperatura en sistemas dinámicos de electrólisis.

Por otra parte, Saranya et al. [32] analizaron el desempeño de controladores PI y PID en sistemas térmicos, señalando que ambos presentan un comportamiento aceptable para el control de la temperatura alrededor de 60 °C. Sin embargo, los autores concluyeron que el controlador PID responde mejor a perturbaciones y cambios bruscos en el sistema, porque reduce el error de seguimiento y mejora la estabilidad del proceso en comparación con el controlador PI.

Asimismo, Sakas et al. [9] implementaron un controlador proporcional-integral (PI) para regular la temperatura de un electrolizador alcalino industrial operando a 70 °C. El controlador actuó sobre la válvula de alimentación de agua de refrigeración, calculando el error entre la temperatura medida y la temperatura de referencia. Los autores concluyeron que el controlador PI permitió mantener un comportamiento térmico estable y evitar fluctuaciones significativas de temperatura durante la operación dinámica del sistema.

En investigaciones más recientes, Qi et al. [8] compararon el desempeño de un controlador

PID-I y un controlador predictivo MPC en un sistema de electrólisis alcalina bajo condiciones dinámicas de funcionamiento. Los autores reportaron que el controlador MPC presentó un mejor desempeño para reducir el sobreimpulsos de temperatura, ya que el controlador PID-I redujo el sobreimpulso aproximadamente $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que con el controlador MPC prácticamente no se observó un sobreimpulsos significativo.

De igual manera, Hernández-Arroyo et al. [33] realizaron una comparación entre controladores PID y MPC aplicados a sistemas térmicos. Concluyendo que el controlador MPC presenta un mejor comportamiento dinámico. Los resultados mostraron que el controlador MPC alcanzó un tiempo de asentamiento cercano a 1000 s y un sobreimpulso de aproximadamente $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el controlador PID presentó tiempos de asentamiento cercanos a 2000 s y sobreimpulsos de hasta $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por otra parte, Conker [34] propuso una técnica de control basada en lógica difusa (Fuzzy Logic, FL) aplicada a sistemas generadores de HHO operando a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados mostraron que el controlador difuso mejora la capacidad de producción de HHO y protege al generador del sobrecalentamiento, lo que permite una operación más eficiente y segura en comparación con los métodos de control de carga fija. Además, el autor destacó que la lógica difusa permite una mejor adaptación a las variaciones dinámicas del sistema sin requerir un modelo matemático preciso.

En general, los estudios analizados muestran que los controladores MPC presentan un mejor desempeño en el control de la temperatura de los electrolizadores alcalinos debido a su capacidad predictiva y a la reducción del sobreimpulso térmico. No obstante, los controladores PI y PID continúan siendo ampliamente utilizados debido a su simplicidad de implementación y su buen desempeño en sistemas con dinámica moderada. Asimismo, técnicas avanzadas como la lógica difusa y el control adaptable representan una alternativa prometedora para mejorar la estabilidad térmica y la eficiencia de producción de hidrógeno en sistemas de electrólisis alcalina [28]. En la Tabla 2.2 se muestran los controladores más empleados en la regulación de temperatura en sistemas electrolíticos.

Tabla 2.2: *Control de temperatura en electrolizadores alcalinos.*

Controladores	Temperatura (°C)	Comentarios	Referencia
MPC	50 a 70	Predice la temperatura a lo largo de un horizonte de optimización. Se analizó el error de predicción a un paso, con un error cuadrático medio (RMSE) de 0.6641 °C.	[31]
PI, PID	60	El controlador PI y PID cumplen con un desempeño aceptable, pero el proceso con retraso o con un cambio brusco se observa que el controlador PID tiene una mejor respuesta.	[32]
PI	70	Controla la válvula de alimentación de agua de refrigeración, en la cual se calcula el error que hay entre la temperatura actual y la temperatura de referencia.	[9]
PID-I, MPC	70	Se propone para reducir el sobreimpulso de la temperatura. El controlador MPC es el que muestra un mayor ajuste en el sobreimpulso, debido a que se reduce en 2.2 °C con el controlador PID-I, y no se observa un sobreimpulso obvio con el controlador MPC.	[8]
PID, MPC	70	El control MPC presenta un mejor comportamiento, con un tiempo de asentamiento de 1000 s y un sobreimpulso de 5 °C, y que el PID presenta un tiempo de asentamiento de 2000 s y un sobreimpulso de 40 °C.	[33]
Controlador de lógica difusa y de carga fija	60	La técnica de control basada en lógica difusa mejora la capacidad de producción del HHO y protege el generador del sobrecalentamiento, haciendo que la operación sea más eficiente y segura en comparación con los métodos de control fijos.	[34]

2.3. Modelos empleados para describir la temperatura del electrolito

El desarrollo de modelos matemáticos ha permitido comprender el comportamiento térmico de los electrolizadores alcalinos y constituye una herramienta fundamental para el diseño de estrategias de control, debido a que la temperatura influye directamente en la conductividad del electrolito, la cinética de reacción y la eficiencia de producción de hidrógeno, diversos autores han propuesto modelos basados en balances de energía para describir la dinámica térmica tanto de la celda electrolítica como de los sistemas de enfriamiento asociados.

Valenciaga et al. [11] desarrollaron un modelo dinámico no lineal de parámetros concentrados para describir el comportamiento térmico de un electrolizador alcalino y su sistema de refrigeración. Como se observa en la Tabla 2.3, el modelo se basa en balances de energía que representan la dinámica de temperatura en la celda electrolítica, los intercambiadores de calor, los tanques separadores y el circuito de enfriamiento. Además, considera fenómenos como la generación de calor durante la electrólisis, la transferencia de calor entre fluidos, las pérdidas térmicas al ambiente y los retardos asociados a la circulación del electrolito y del refrigerante. Los autores concluyen que el modelo proporciona una representación adecuada de la dinámica térmica del sistema y constituye una herramienta útil para el diseño y la evaluación de estrategias avanzadas de control de temperatura.

Por otra parte, los modelos presentados por Rodríguez-Cerda et al. [35] y Bastida et al. [36] describen el comportamiento térmico del intercambiador de calor mediante balances de energía aplicados a los fluidos caliente y frío. Estos modelos fueron validados experimentalmente y permiten representar la evolución temporal de las temperaturas de salida considerando variables como el flujo másico, las capacidades caloríficas y el coeficiente global de transferencia de calor. Los resultados mostraron estimaciones precisas de los modelos respecto a las medidas experimentales de las temperaturas de salida de fluido frío y caliente. Evidenciando que este tipo de formulaciones pueden emplearse para analizar la capacidad de enfriamiento y la respuesta térmica del sistema ante cambios en las condiciones de operación.

Asimismo, Bastida et al. [36] desarrollaron un modelo dinámico no lineal de un intercambiador de calor de placas a partir de principios fundamentales de transferencia de calor y mecánica de fluidos. El modelo se formuló mediante un balance de energía para describir la evolución temporal de las temperaturas. Una de sus principales contribuciones fue la incorporación del cálculo dinámico del coeficiente global de transferencia de calor, considerando la variación de propiedades termofísicas, como la densidad, la viscosidad, la conductividad tér-

mica y el calor específico en función de la temperatura. Posteriormente, el modelo se linealizó en distintos puntos de operación para obtener funciones de transferencia adecuadas para el diseño de controladores. Los resultados mostraron que el modelo reproduce satisfactoriamente la dinámica térmica del intercambiador y proporciona una representación adecuada para el análisis y diseño de estrategias de control de temperatura en sistemas de transferencia de calor.

Los modelos descritos anteriormente se muestran en la Tabla 2.3 y su nomenclatura en el *Apéndice A*.

Tabla 2.3: Modelos empleados para describir la temperatura del electrolito.

Modelo	Ecuación	Referencia
Modelo 1 a la salida de la celda electrolítica	$c_l V_{\text{stack}} \frac{dT_{\text{stack}}}{dt} = Q_{el} - Q_{\text{disp,stack}} + 2q\rho c_l (T_{\text{prec}}(t - \tau_{\text{stack}}) - T_{\text{stack}})$	[11]
Modelo 1 a la salida del intercambiador de calor	$c_l V_{\text{int}} \frac{dT_{\text{int,out}}}{dt} = q\rho c_l (T_{\text{stack}}(t - \tau_{\text{int}}) - T_{\text{int,out}}) - kA_{\text{int}}\Delta T - Q_{\text{disp,int}}$	[11]
Modelo 2 a la salida del intercambiador de calor	$\frac{dT_{co}}{dt} = \frac{v_c}{V_c} (T_{ci} - T_{co}(t)) + \frac{UA}{\rho_c C_{pc} V_c} (T_{ho}(t) - T_{co}(t))$ $\frac{dT_{ho}}{dt} = \frac{v_h}{V_h} (T_{hi} - T_{ho}(t)) + \frac{UA}{\rho_h C_{ph} V_h} (T_{co}(t) - T_{ho}(t))$	[35, 36]
Modelo 3 a la salida del intercambiador de calor	$m_c C_p \frac{dT_{co}}{dt} = m_c C_p T_{ci} + UA \left[\frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} - \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} \right] - m_c C_p T_{co}$ $m_c C_p \frac{dT_{ho}}{dt} = m_c C_p T_{hi} - [m_c C_p + AU \left(\frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} - \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} \right)]$	[32]

2.4. Condiciones de operación de temperatura en electrolizadores alcalinos

La temperatura de operación es uno de los parámetros más importantes en los electrolizadores alcalinos, debido a que influye directamente en la conductividad iónica del electrolito, la resistencia interna de la celda y la velocidad de las reacciones electroquímicas [37]. Diversos estudios han analizado su efecto sobre la eficiencia de producción de hidrógeno y la calidad del gas obtenido. El Kady et al. [18] realizaron una investigación experimental para comparar el desempeño de celdas húmedas y secas destinadas a la producción de HHO, encontrando que a una temperatura de 60 °C se alcanza una eficiencia de Faraday de 72.1 % y una eficiencia de voltaje de 75.45 %. Los autores concluyeron que el incremento de la temperatura favorece la producción de gas debido a la reducción de la resistencia eléctrica del electrolito. De manera similar, Salazar y Solis [38] desarrollaron un sistema automatizado para la producción de HHO mediante electrólisis del agua, evaluando el desempeño del proceso ba-

jo diferentes condiciones de operación. Los autores reportaron una eficiencia de Faraday de 98.65 % a 60 °C y un caudal volumétrico de HHO de 2.70 L/min. Estos resultados evidencian que el control adecuado de las variables de operación permite maximizar la conversión de la energía eléctrica en gas producido, mejorando significativamente el rendimiento global del sistema.

Por otra parte, Sakas et al. [9] desarrollaron un modelo dinámico basado en balances de masa y energía para analizar el comportamiento de una planta industrial de electrólisis alcalina. Los autores reportaron una eficiencia de Faraday cercana al 96 % a una temperatura de 70 °C, identificando que el aumento de temperatura mejora la conductividad del electrolito y reduce las pérdidas energéticas asociadas al proceso. Asimismo, Jang et al. [14] estudiaron mediante simulación numérica el efecto de la temperatura sobre el desempeño de un electrolizador alcalino, obteniendo una eficiencia de Faraday de 76 % a 70 °C. Sus resultados mostraron que la elevación de la temperatura incrementa la densidad de corriente y favorece la producción de hidrógeno; sin embargo, también señalaron que temperaturas excesivamente altas pueden afectar la estabilidad operativa del sistema.

A temperaturas superiores, Ulleberg [39] analizó el comportamiento de electrolizadores alcalinos avanzados mediante simulación, reportando eficiencias de Faraday cercanas al 98 % a 80 °C. El estudio concluyó que operar a temperaturas elevadas disminuye las sobretensiones de activación y mejora el rendimiento energético del proceso. De igual manera, Arpajou et al. [40] emplearon técnicas de optimización basadas en modelos para sistemas de electrólisis alcalina, obteniendo una pureza de hidrógeno del 96 % y una eficiencia de voltaje del 74 % a 80 °C.

Por último, Zhao et al. [41] desarrollaron un electrolizador alcalino bipolar de configuración zero-gap, alcanzando una pureza del hidrógeno de 99.99 % a 85 °C, resultado que atribuyen a una mejora en las condiciones de transporte de masa y a una reducción de la mezcla de gases en la celda.

En conjunto, los estudios revisados muestran que las condiciones de operación suelen encontrarse en un intervalo de temperatura entre 60 y 85 °C, donde se alcanzan altas eficiencias de Faraday, elevadas purezas de hidrógeno y una reducción de las pérdidas energéticas. Sin embargo, la temperatura adecuada depende de factores como el diseño del electrolizador, la concentración y tipo de electrolito utilizado, así como de las estrategias de control implementadas para mantener la estabilidad térmica del sistema [37, 38].

Tabla 2.4: *Condiciones de operación de temperatura.*

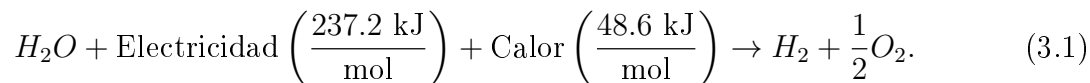
Temperatura (°C)	Eficiencia	Referencia
60	HHO, Faraday 72.1 %	[42]
60	HHO, Faraday 98.65 %	[38]
70	H_2 , Faraday 76 %	[14]
70	H_2 , Faraday 86 %	[9]
80	H_2 , Faraday 98 %	[39]
80	H_2 , Pureza del gas 96.7 %	[40]
85	H_2 , Pureza del gas 99.99 %	[43]
80	H_2 , Voltaje 74.03 %	[40]
60	H_2 , Voltaje 75.45 %	[42]

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en el que el agua se descompone en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) mediante la aplicación de una corriente eléctrica en un electrolizador, la reacción fundamental de la electrólisis se muestra en la Ecuación (3.1). Aunque el potencial teórico requerido es de 1.23 V, en condiciones reales se requieren aproximadamente 1.48 V debido a pérdidas energéticas del sistema [44].



Se han desarrollado 4 tipos de tecnologías de electrólisis del agua que se distinguen en función del electrolito, las condiciones de operación y los iones utilizados; electrólisis de agua alcalina, por electrolito polimérico, óxido sólido del agua y por intercambio de protones. Las más utilizadas son la electrólisis alcalina (AWE, por sus siglas en inglés) y la electrólisis mediante membrana de intercambio de protones (PEM, por sus siglas en inglés) [21]. Electrólisis del agua es una de las tecnologías prometedoras y estudiadas actualmente para aplicaciones a gran escala, los electrolitos más empleados en el proceso, son bases fuertes debido a que presentan gran conductividad iónica [37].

3.2. Electrolizador alcalino

El electrolizador alcalino consta de dos electrodos, usualmente de acero recubierto de níquel, separados por un diafragma que facilita el transporte iónico 3.1. Emplea una solución acuosa de KOH o NaOH como electrolito a concentraciones típicas de 20–40 %. Las reacciones electroquímicas en el ánodo y el cátodo se presentan en las ecuaciones (3.2) y (3.3). Estos

sistemas pueden clasificarse según la configuración de las celdas (unipolar o bipolar) y la disposición de los electrodos (con o sin brecha) [37, 44].

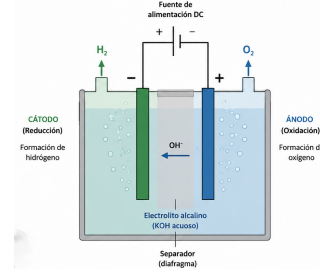
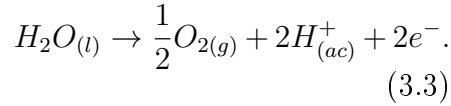
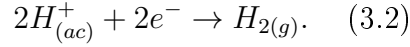


Figura 3.1: Componentes del electrolizador alcalino.

3.2.1. Diseño unipolar

En el diseño unipolar cada electrodo es conectado individualmente a una fuente eléctrica, lo cual significa que los electrodos tienen la misma polaridad en la superficie. Este tipo de electrolizadores utilizan electrolitos como el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH) y a bajo flujo de corriente en la alimentación. Su temperatura normal de operación se encuentra en un rango de 60 °C y 90 °C y la presión se encuentra cercana a la atmosférica. Estos electrolizadores trabajan entre el 60 % y 80 % de eficiencia.

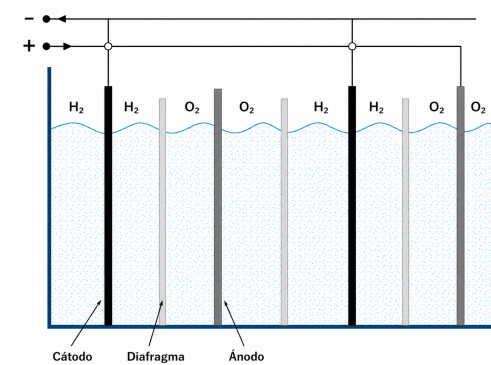


Figura 3.2: Configuración unipolar.

3.2.2. Diseño bipolar

En este diseño la fuente eléctrica se conecta solo a los dos electrodos en los extremos opuestos a la celda, conocidos como “electrodos terminales”. Este tipo de diseño es aplicado comúnmente a electrolizadores que utilizan membranas de electrolito de polímero sólido y

requieres un alto flujo de corriente eléctrica. Los electrolizadores unipolares requieren menor espacio y cantidad de conexiones eléctricas, por otra parte, permite trabajar a temperaturas y presiones más altas de lo normal, comúnmente a 150 °C y 30 bares de presión, pudiendo trabajar con una eficiencia al 90 %.

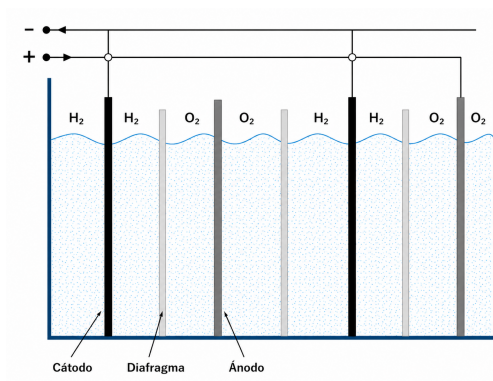


Figura 3.3: Configuración unipolar.

3.2.3. Con brecha

En esta configuración existe una separación entre los electrodos y el diafragma o membrana, lo que puede resultar en pérdidas óhmicas más significativas y limitar la densidad de corriente que la celda puede soportar sin sobrecalentarse.

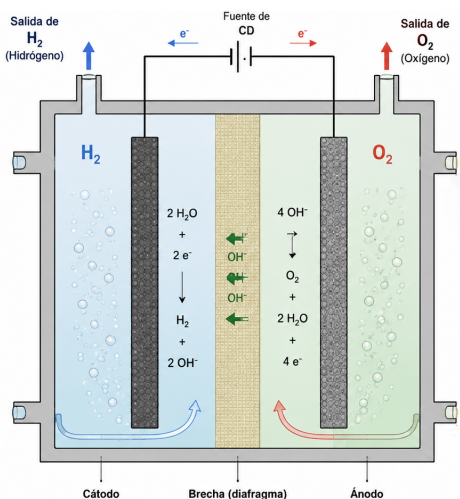


Figura 3.4: Configuración con brecha.

3.2.4. Sin brecha

En una configuración sin brecha, los materiales de electrodos porosos se presionan directamente en ambos lados del diafragma o membrana de la celda, lo que reduce las pérdidas

óhmicas. Esto permite que la celda funcione a densidades de corriente más altas.

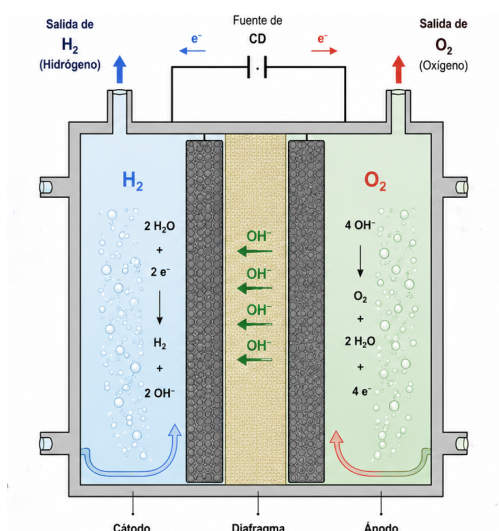


Figura 3.5: Configuración sin brecha.

3.3. Gas Brown

El gas brown, también conocido como oxihidrógeno (HHO) es una mezcla de hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) en una relación molar de 2:1. Se obtiene por métodos electroquímicos de la electrólisis del agua, ocurriendo en los electrodos reacciones de óxido reducción, siendo el oxígeno producido simultáneamente como subproducto del hidrógeno. Es un gas incoloro, inodoro, no tóxico y más ligero que el aire. Se quema en el vacío y bajo el agua, siendo su único producto de combustión el agua. El HHO puede quemarse a 273,15 K de temperatura y 1 atmósfera de presión, cuando está compuesto por una relación del gas de aproximadamente 4 % y 94 % de hidrógeno en volumen [45].

La producción de gas Brown depende de diversos parámetros operativos y de diseño del electrolizador. Entre los más importantes se encuentran: la concentración del electrolito, voltaje y corriente, temperatura y material y separación de los electrodos [46].

El gas Brown ha sido investigado en diversas aplicaciones energéticas e industriales. Entre las principales destacan [47]:

- **Motores de combustión interna**

Diversos estudios reportan que la adición de HHO en motores de combustión puede mejorar la eficiencia térmica y reducir emisiones contaminantes a la atmósfera.

- **Soldadura y corte**

Debido a su alta temperatura de llama, el gas Brown se utiliza en procesos de soldadura, corte y tratamiento térmico de materiales.

- **Sistemas de energía alternativa**

El HHO se estudia como complemento en sistemas de energía renovable y almacenamiento energético, especialmente en investigaciones relacionadas con hidrógeno verde y electrólisis del agua.

3.4. Electrolito

Un electrolito es un líquido que contiene iones positivos y negativos, y conduce la electricidad mediante el flujo de dichas cargas. Los electrolitos son soluciones ácidas o sales metálicas (compuestos iónicos) generalmente disueltos en agua.

Hay dos tipos de electrolitos, fuertes y débiles. Un electrolito fuerte es una sustancia que está prácticamente ionizada totalmente en disolución acuosa. Dicho en otras palabras, un electrolito fuerte tiene una fuerte (o alta) tendencia a producir iones. Un electrolito débil es una sustancia que está solo parcialmente ionizada en disolución acuosa.

En la electrólisis del agua alcalina se utilizan los tipos de electrolitos fuertes, tales como el KOH y NaOH, debido a que poseen características adecuadas para este proceso, por ejemplo; gran conductividad iónica, estabilidad química y ante variaciones en el nivel de pH resultado de los cambios de concentración protónica sobre los electrodos durante el proceso, no se ve afectada su conductividad. En el caso de la solución de KOH se trabaja en un rango de concentración del 25 y 30 %.

3.5. Conductividad

En los electrolizadores de agua alcalina (AWE), es esencial medir con precisión la conductividad específica del electrolito, ya que una conductividad baja provoca pérdidas de energía, especialmente a altas corrientes. Un estudio experimental realizado por Gilliam et al. [1] muestra el comportamiento de la conductividad en función de la concentración del electrolito y la temperatura (Figura 3.6)

Calculated values of specific conductivity in (S/cm) at various concentrations (wt% KOH) and temperatures (°C)

Concentration (wt%)	Temperature (°C)											
	0	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
0.1	0.00310	0.00357	0.00407	0.00432	0.00459	0.00513	0.00569	0.00626	0.00683	0.00742	0.00801	0.00860
0.5	0.01540	0.01773	0.02022	0.02151	0.02283	0.02553	0.02833	0.03116	0.03406	0.03699	0.03994	0.04289
1	0.03053	0.03518	0.04015	0.04274	0.04537	0.05077	0.05636	0.06203	0.06782	0.07368	0.07958	0.08549
2	0.05994	0.06923	0.07915	0.08430	0.08957	0.1003	0.1115	0.1228	0.1344	0.1461	0.1580	0.1698
4	0.1153	0.1338	0.1535	0.1637	0.1742	0.1957	0.2180	0.2406	0.2637	0.2871	0.3107	0.3344
6	0.1657	0.1932	0.2226	0.2379	0.2536	0.2856	0.3189	0.3527	0.3873	0.4224	0.4577	0.4932
8	0.2110	0.2473	0.2862	0.3064	0.3271	0.3696	0.4138	0.4587	0.5046	0.5512	0.5982	0.6454
10	0.2509	0.2958	0.3439	0.3690	0.3946	0.4474	0.5021	0.5579	0.6151	0.6730	0.7315	0.7903
12	0.2852	0.3384	0.3954	0.4252	0.4557	0.5184	0.5835	0.6500	0.7181	0.7872	0.8570	0.9272
14	0.3138	0.3749	0.4405	0.4748	0.5099	0.5823	0.6575	0.7344	0.8132	0.8931	0.9740	1.0553
16	0.3365	0.4052	0.4790	0.5176	0.5572	0.6388	0.7237	0.8106	0.8997	0.9902	1.0819	1.1741
18	0.3534	0.4291	0.5107	0.5534	0.5972	0.6876	0.7818	0.8783	0.9773	1.0780	1.1799	1.2826
20	0.3645	0.4468	0.5355	0.5820	0.6298	0.7285	0.8314	0.9370	1.0454	1.1558	1.2676	1.3804
22	0.3700	0.4582	0.5535	0.6035	0.6549	0.7614	0.8723	0.9865	1.1038	1.2232	1.3444	1.4667
24	0.3702	0.4636	0.5648	0.6179	0.6726	0.7861	0.9045	1.0265	1.1519	1.2798	1.4097	1.5409
26	0.3654	0.4633	0.5695	0.6254	0.6830	0.8027	0.9277	1.0569	1.1897	1.3253	1.4631	1.6024
28	0.3562	0.4577	0.5681	0.6263	0.6864	0.8114	0.9421	1.0775	1.2168	1.3593	1.5042	1.6509
30	0.3434	0.4474	0.5610	0.6211	0.6831	0.8125	0.9479	1.0885	1.2334	1.3816	1.5327	1.6857
32	0.3277	0.4332	0.5490	0.6104	0.6738	0.8064	0.9454	1.0901	1.2393	1.3923	1.5484	1.7067
34	0.3104	0.4162	0.5329	0.5950	0.6592	0.7937	0.9351	1.0826	1.2349	1.3914	1.5512	1.7137
36	0.2928	0.3976	0.5139	0.5759	0.6402	0.7753	0.9176	1.0665	1.2206	1.3792	1.5413	1.7065
38	0.2765	0.3788	0.4932	0.5544	0.6181	0.7523	0.8940	1.0427	1.1969	1.3560	1.5189	1.6852
40	0.2634	0.3617	0.4726	0.5322	0.5944	0.7259	0.8652	1.0121	1.1647	1.3224	1.4845	1.6501
42	0.2558	0.3484	0.4540	0.5111	0.5709	0.6978	0.8329	0.9759	1.1250	1.2795	1.4386	1.6018
44	0.2565	0.3413	0.4397	0.4933	0.5497	0.6700	0.7988	0.9358	1.0791	1.2282	1.3823	1.5407
46	0.2684	0.3434	0.4324	0.4815	0.5333	0.6448	0.7650	0.8936	1.0288	1.1701	1.3167	1.4681
48	0.2951	0.3580	0.4354	0.4788	0.5249	0.6249	0.7340	0.8516	0.9761	1.1070	1.2434	1.3851

Figura 3.6: Valores de la conductividad a distintas concentraciones y temperaturas [1].

3.6. Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que suministra transferencia de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas.

El intercambiador de calor tipo plato (Figura 3.7), consiste de placas en lugar de tubos para separar a los dos fluidos caliente y frío. Los líquidos calientes y fríos se alternan entre cada una de las placas y los baffles dirigen el flujo del líquido entre las placas. Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, proveen un área extremadamente grande de transferencia de térmica a cada uno de los líquidos. Por lo tanto, un intercambiador de placa es capaz de transferir mucho más calor con respecto a un intercambiador de carcasa y tubos con volumen semejante, esto es debido a que las placas proporcionan una mayor área que la de los tubos. El intercambiador de calor de plato, debido a la alta eficacia en la transferencia de calor, es mucho más pequeño que el de carcasa y tubos para la misma capacidad de intercambio de calor [22].

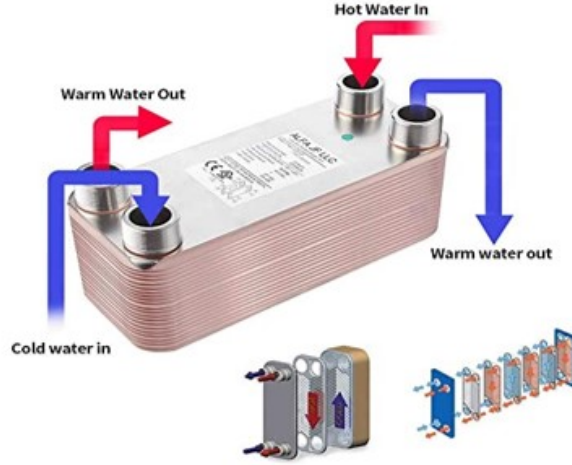


Figura 3.7: Intercambiador de calor.

Los intercambiadores de calor de placas son uno de los dispositivos más utilizados en la mayoría de los campos de transferencia de calor por su versatilidad y funcionalidad, sin embargo, estos tipos de dispositivos son adecuados para condiciones de temperatura, presión y caudal no tan elevados. Un intercambiador de placas opera de 23 a 30 bar de presión y a una temperatura entre 200 y 230 °C [48]. El modelo de un intercambiador de calor por placas se ha modelado a partir de ecuaciones diferenciales parciales de un intercambiador convencional de tubos [49].

3.7. Modelo matemático de un intercambiador de calor

El modelo de un intercambiador de calor por placas se ha modelado a partir de ecuaciones diferenciales de un intercambiador convencional de tubos. El modelado dinámico de estos sistemas se basa en balances de energía aplicados a cada fluido, permitiendo describir la evolución temporal de sus temperaturas de salida. Este enfoque considera tanto el transporte convectivo asociado al flujo de los fluidos como la transferencia de calor a través de las placas, representada mediante el término U y A , que agrupa el coeficiente global de transferencia de calor y el área efectiva de intercambio.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{co}}{dt} &= \frac{Wv_c}{V_c} (T_{ci}(t) - T_{co}(t)) + \left(\frac{U_c A_c}{Cp_c \rho_c V_c} \right) (T_{ho}(t) - T_{co}(t)), \\ \frac{dT_{ho}}{dt} &= \frac{Wv_h}{V_h} (T_{hi}(t) - T_{ho}(t)) + \left(\frac{U_h A_h}{Cp_h \rho_h V_h} \right) (T_{co}(t) - T_{ho}(t)), \end{aligned} \quad (3.4)$$

donde:

- $T_{co}(t)$: temperatura de salida del fluido frío [°C].
- $T_{ho}(t)$: temperatura de salida del fluido caliente [°C].
- T_{ci} : temperatura de entrada del fluido frío [°C].
- T_{hi} : temperatura de entrada del fluido caliente [°C].
- Wv_c, Wv_h : caudales volumétricos de los fluidos frío y caliente, respectivamente [m³/s].
- V_c, V_h : volúmenes efectivos del intercambiador para cada fluido [m³].
- ρ_c, ρ_h : densidades de los fluidos frío y caliente, respectivamente [kg/m³].
- C_{pc}, C_{ph} : calores específicos a presión constante de los fluidos frío y caliente, respectivamente [J/(kg·K)].
- U : coeficiente global de transferencia de calor [W/(m²·K)].
- A : área efectiva de transferencia de calor [m²].
- t : tiempo [s].

3.8. Eficiencia de Faraday

La Ley de Faraday de la electrólisis establece que la masa de una sustancia depositada en un electrodo durante el proceso de electrólisis es directamente proporcional a la carga eléctrica transferida a dicho electrodo, medida en coulomb [50]. La eficiencia de Faraday, la cual relaciona hidrógeno producido en el experimento con el máximo teórico que es posible generar como lo muestra la Ecuación (3.5).

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{V_{H_2, \text{producido}}}{V_{H_2, \text{teórico}}}, \quad (3.5)$$

La eficiencia de Faraday relaciona el volumen de hidrógeno producido ($V_{H_2, \text{producido}}$) en la celda experimental y el volumen de hidrógeno teórico producido ($V_{H_2, \text{teórico}}$) que corresponde al flujo eléctrico durante el tiempo de la prueba. El volumen teórico se obtiene mediante la Ecuación (3.6) [27].

$$V_{H_2, \text{teórico}} = \frac{I \cdot t \cdot V_{\text{molar}}}{n \cdot F}, \quad (3.6)$$

Donde el volumen molar esta dado por:

$$V_{molar} = \frac{R \cdot T}{P}. \quad (3.7)$$

La I representa la corriente promedio, t es el tiempo experimental, n es el número de electrones transferidos durante la reacción, R es la constante universal de los gases ideales, T es la temperatura del medio, P es la presión a la que se encuentra el hidrógeno y F la constante de Faraday.

3.9. Estructura de un control PID

En esta sección se analiza un sistema de control de una entrada y una salida (SISO) con un solo grado de libertad, representado mediante un diagrama en bloques compuesto por una referencia $R(s)$, un controlador PID , una planta $G(s)$ y una realimentación unitaria (Figura 3.8).

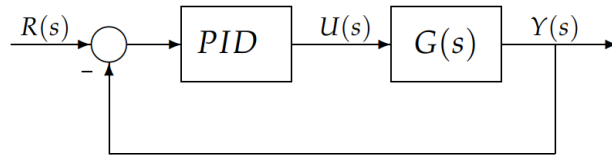


Figura 3.8: Diagrama de bloques PID.

Los controladores pertenecientes a la familia PID se caracterizan por combinar tres tipos de acciones de control: *proporcional* (P), *integral* (I) y *derivativa* (D). Dependiendo de la combinación utilizada, se obtienen las estructuras P, I, PI, PD y PID, ampliamente empleadas en sistemas de control industrial [51].

- **La acción proporcional (P)** genera una señal de control directamente proporcional al error instantáneo del sistema. En el dominio del tiempo, su comportamiento se expresa mediante:

$$u(t) = K_p e(t), \quad (3.8)$$

donde K_p corresponde a la ganancia proporcional y $e(t)$ representa el error entre la referencia y la salida del sistema. En el dominio de Laplace, la función de transferencia del controlador proporcional está dada por:

$$C_p(s) = K_p. \quad (3.9)$$

La ganancia proporcional K_p puede ajustarse para modificar la sensibilidad del controlador frente a las variaciones del error. Un incremento en su valor suele mejorar la rapidez de respuesta del sistema; sin embargo, por sí sola, la acción proporcional generalmente no es capaz de eliminar completamente el error en estado estacionario u offset.

- **La acción integral (I)** genera una señal de control proporcional a la acumulación del error a lo largo del tiempo, lo que contribuye a eliminar el error en estado estacionario. Su expresión en el dominio temporal está dada por:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (3.10)$$

y su función de transferencia se representa como:

$$C_I(s) = \frac{K_i}{s}. \quad (3.11)$$

Debido a que la acción integral continúa actuando mientras exista error, reduciendo el error hasta hacerlo prácticamente nulo, aunque generalmente se produce una respuesta más lenta.

- **El controlador proporcional-integral (PI)** combina las ventajas de las acciones proporcional e integral, proporcionando una respuesta rápida y reduciendo el error en estado estacionario. Su ley de control se expresa como:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (3.12)$$

donde T_i es la constante de tiempo integral que determina la intensidad de la acción integral. La función de transferencia correspondiente es:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right). \quad (3.13)$$

Gracias a la incorporación de la acción integral, el controlador PI puede eliminar el error permanente, razón por la cual es ampliamente utilizado en procesos industriales con dinámicas de primer orden.

- **El controlador proporcional-derivativo (PD)** combina la acción proporcional con una acción derivativa que depende de la velocidad de cambio del error. Su ley de control se expresa como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.14)$$

donde T_d representa la constante de tiempo derivativa. En el dominio de Laplace, la función de transferencia del controlador es:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d. \quad (3.15)$$

La acción derivativa proporciona un efecto predictivo al anticipar las variaciones del error, lo que mejora la rapidez de respuesta y aumenta el amortiguamiento del sistema. Sin embargo, presenta una alta sensibilidad al ruido de medición, por lo que rara vez se emplea de forma independiente. Al combinarse con la acción proporcional, contribuye a reducir las oscilaciones y mejorar el comportamiento transitorio del sistema.

- **PID: acción de control proporcional-integral-derivativa**, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.16)$$

y su función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (3.17)$$

3.10. Control Adaptable

Un sistema es adaptable cuando cambiar el comportamiento conforme a nuevas circunstancias o cambios en el medio ambiente. Un controlador adaptable es un controlador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y de las perturbaciones [52]. Existen muchas definiciones de control adaptable; una de las más aceptadas, señala que es un tipo de control especial no lineal en el que el estado del proceso

puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan en diferente velocidad. La escala lenta corresponde a los cambios de los parámetros y la escala rápida que corresponde a la dinámica del bucle ordinario. En la Figura 3.9 se muestra el esquema general del control adaptativo. La estructura de éste control está compuesta por tres elementos principales [53]:

- Planta o proceso: sistema cuya variable de salida se desea controlar.
- Controlador ajustable: controlador cuyos parámetros pueden modificarse en tiempo real.
- Mecanismo de adaptación: algoritmo encargado de estimar los parámetros del proceso o evaluar el desempeño del sistema para actualizar los parámetros del controlador.

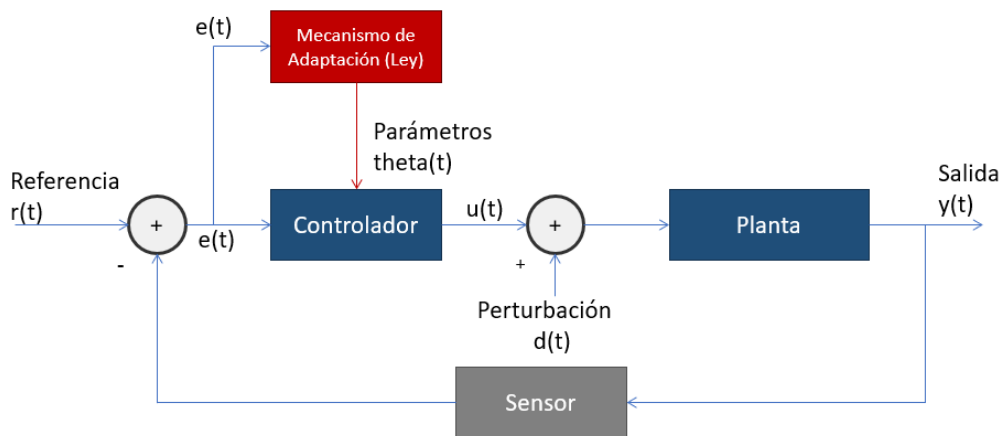


Figura 3.9: Diagrama general de un sistema de control adaptativo .

Principales tipos de control adaptativo

Los sistemas de control adaptativo pueden clasificarse según el mecanismo empleado para ajustar los parámetros del controlador. Los enfoques de control adaptativo más utilizados son los siguientes [53]:

- **Control Adaptativo con Modelo de Referencia (MRAC, *Model Reference Adaptive Control*)**: los parámetros del controlador se ajustan continuamente con el objetivo de que la salida de la planta reproduzca el comportamiento de un modelo de referencia previamente especificado.

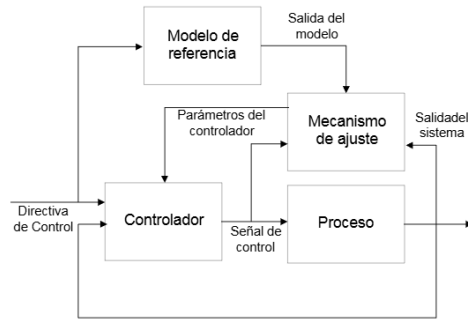


Figura 3.10: Diagrama en bloques de un sistema adaptable con modelo de referencia [53].

- **Control Adaptativo Autoajustable (STR, *Self-Tuning Regulator*)**: se basa en la estimación en línea de los parámetros de la planta para actualizar automáticamente las ganancias del controlador y mantener el desempeño deseado.

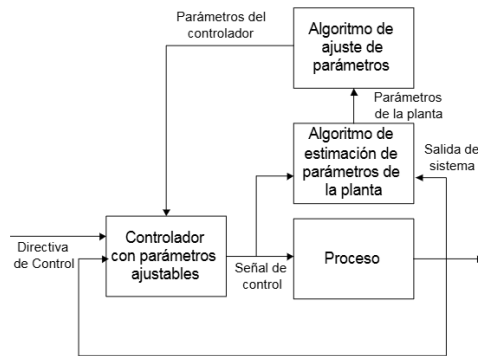


Figura 3.11: Diagrama en bloques de un sistema con regulador auto-ajustable [53].

- **Control Adaptativo por Ganancia Programada (*Gain Scheduling*)**: modifica los parámetros del controlador en función de variables de operación conocidas, tales como la temperatura, la velocidad o la carga del sistema, permitiendo adaptar la acción de control a diferentes condiciones de funcionamiento.

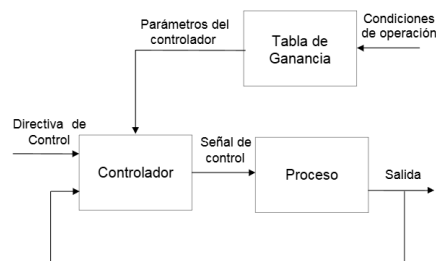


Figura 3.12: Diagrama en bloques de un sistema con ganancia tabulada [53].

Capítulo 4

Metodología

4.1. Diseño e Instrumentación del sistema

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de proceso de la adaptación de un intercambiador de calor al electrolizador para el control de temperatura. El sistema se compone del circuito de agua de enfriamiento y el de electrólisis. El intercambiador permite la transferencia de calor entre fluidos, evitando el sobrecalentamiento y manteniendo la estabilidad térmica. El electrolito (KOH) circula hacia el electrolizador de placas paralelas donde se genera el gas HHO; este gas pasa por un secador y se mide su flujo. El sistema cuenta con cuatro sensores de temperatura en el intercambiador y dos de flujo, correspondientes al agua de enfriamiento y al HHO.

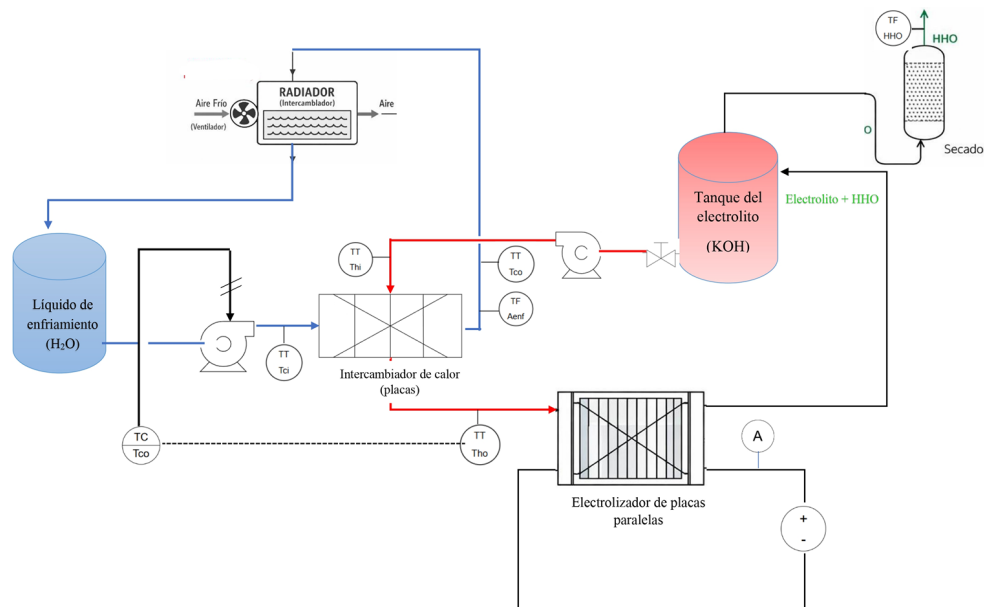


Figura 4.1: Diagrama de instrumentación.

En este apartado se describen las características de los componentes que conforman el sistema, así como el procedimiento de adaptación e implementación del sistema de enfriamiento en un electrolizador alcalino, incluyendo la instrumentación empleada para el control de la temperatura del electrolito.

4.1.1. Componentes del sistema

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de los componentes que integran el sistema.

■ Electrolizador alcalino.

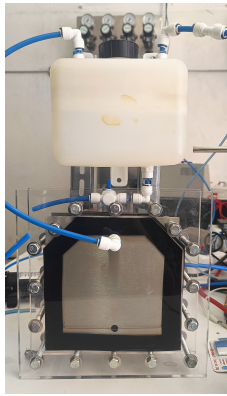


Figura 4.2: *Electrolizador alcalino.*

Tabla 4.1: *Especificaciones del electrolizador.*

Especificaciones	Datos técnicos
Electrolizador de placas paralelas	13 placas, 1 ánodo, 2 cátodos, 5 neutras, en paralelo
Material	Electrodos de acero inoxidable 316L Empaques de hule de neopreno Tapas de acrílico
Superficie	Superficie activa total de 188 cm^2
Volumen interno entre placas	676 cm^3
Corriente	30 A
Voltaje	12 V
Producción de oxihidrógeno	2 SLPM

■ Intercambiador de calor

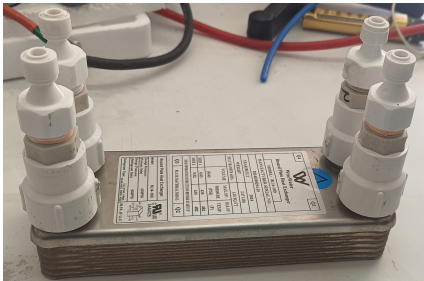


Figura 4.3: *Intercambiador de calor de placas del sistema.*

Tabla 4.2: *Especificaciones del intercambiador.*

Especificaciones	Datos técnicos
Modelo	BL14-10D
Material	SS316L
Año de construcción	2024
Peso	1.17 kg
Área de transferencia	0.028 m^2
Volumen	0.114, 0.075 L
Presión de operación max	2.99 MPa
Temperatura de operación max	250 °C

■ Fuente de alimentación



Figura 4.4: Fuente de alimentación 1.

Tabla 4.3: Especificaciones de la fuente 1.

Especificaciones	Datos técnicos
Modelo	LW-3010KDS
Voltaje de salida	30 V
Corriente de salida	10 A

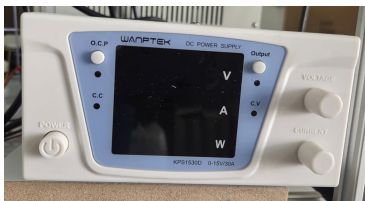


Figura 4.5: Fuente de alimentación 2.

Tabla 4.4: Especificaciones de la fuente 2.

Especificaciones	Datos técnicos
Modelo	KPS1530D
Voltaje de salida	15 V
Corriente de salida	30 A

■ Tanque



Figura 4.6: Tanque de almacenamiento.

Tabla 4.5: Especificaciones del tanque.

Especificaciones	Datos técnicos
Material	Acero inoxidable
Estructura	Cilíndrica
Capacidad	18 L

■ Bomba de diafragma



Figura 4.7: Bomba de diafragma.

■ Sensor de flujo



Figura 4.8: Sensor de flujo.

■ Sensor de temperatura



Figura 4.9: Sensor de temperatura.

■ Enfriador líquido

Tabla 4.6: Especificaciones de la bomba.

Especificaciones	Datos técnicos
Voltaje	12V
Potencia(max)	60W
Presión(max)	0.8 MPa
Flujo(max)	5 L/min

Tabla 4.7: Especificaciones del sensor de flujo.

Especificaciones	Datos técnicos
Material	POM Food Grade
Rango de flujo	0.3 a 3 L
Conexión	G1/4
Estructura	Recta, 27.6 mm * 62mm
Conversión de flujo	1L=7055 pulsos
Presión	0.8 MPA

Tabla 4.8: Especificaciones del sensor de temperatura.

Especificaciones	Datos técnicos
Modelo	DS18B20
Rango de temperatura	-55 a 125 °C
Material	acero inoxidable
Precisión	±0.5 °C
Voltaje de funcionamiento	3.3 a 5 V
Resolución	9 a 12 bits



Figura 4.10: *Enfriador líquido.*

Tabla 4.9: *Especificaciones del enfriador líquido.*

Especificaciones	Datos técnicos
Modelo	CW-9060032-WW
Tamaño	240 mm
Material	cobre y aluminio
Temperatura de operación max	60°C
Voltaje de funcionamiento	12 V

■ Sensor de flujo de gas



Figura 4.11: *Sensor de flujo de gas.*

Tabla 4.10: *Especificaciones del sensor de gas.*

Especificaciones	Datos técnicos
Modelo	FMA-A2310 OMEGA
Flujo max de medición	15 SLPM
Condiciones de ref	70 F , 29.92"
Presión max	250 PSIG
Voltaje de funcionamiento	24 V

4.1.2. Caracterización

En este apartado se presenta la caracterización de la bomba encargada de la circulación del electrolito. Así como del sensor de flujo instalado en el circuito de agua de enfriamiento, ambas caracterizaciones son fundamentales para el buen desempeño del control y del monitoreo del sistema térmico.

■ Bomba de diafragma

Para esta caracterización se empleó una bomba de diafragma (Fig 4.7) con velocidad regulable, alimentada mediante una fuente de voltaje variable (Fig 4.4). Se aplicaron incrementos de 1 V en un rango de 3 V a 7 V, registrando el caudal volumétrico asociado a cada valor de voltaje. Los datos obtenidos presentan un comportamiento lineal, lo cual permitió obtener un polinomio de ajuste para el cálculo del flujo en función del voltaje aplicado (Fig 4.12). Este intervalo de voltaje se definió considerando que 3 V corresponde al voltaje mínimo de arranque de la bomba, mientras que 7 V se estableció como el límite superior, ya que valores mayores incrementan el caudal y, en

consecuencia, la presión del sistema, lo que puede provocar fugas de electrolito en el electrolizador.

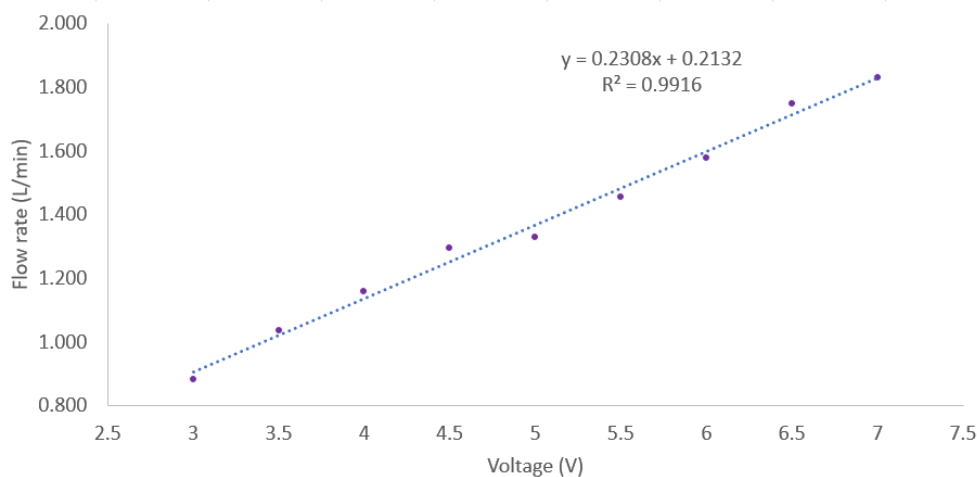


Figura 4.12: Polinomio de ajuste de la bomba electrolito.

■ Sensor de flujo

Se desarrolló un código en Arduino (Figura 4.13) para medir el caudal en L/min del sensor de flujo de HHO. Posteriormente, mediante instrumentos de medición, se verificó si los valores leídos por el sensor eran precisos o si era necesario realizar una calibración. Además, se realizó una caracterización empleando una metodología similar a la de la bomba; se obtuvo un polinomio lineal que relaciona la frecuencia de los pulsos del sensor con respecto al flujo (Figura ??).

```

1  volatile int rpmcont = 0;
2  const int pin_sen = 2; // Sensor conectado al pin 2 (interrupt 0)
3
4  void rpm() {
5    rpmcont++;
6  }
7
8  void setup() {
9    Serial.begin(9600);
10   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin_sen), rpm, RISING);
11 }
12
13 void loop() {
14   rpmcont = 0;
15   delay(500);
16
17   detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin_sen));
18
19
20   float plusosminuto = 7055.0;
21   float litros = ((rpmcont*2) * 60.0) / pulsosminuto;
22
23   Serial.print(litros);
24   Serial.println(" L/min");
25
26
27   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin_sen), rpm, RISING);
28

```

Figura 4.13: Código de arduino para el sensor de flujo.

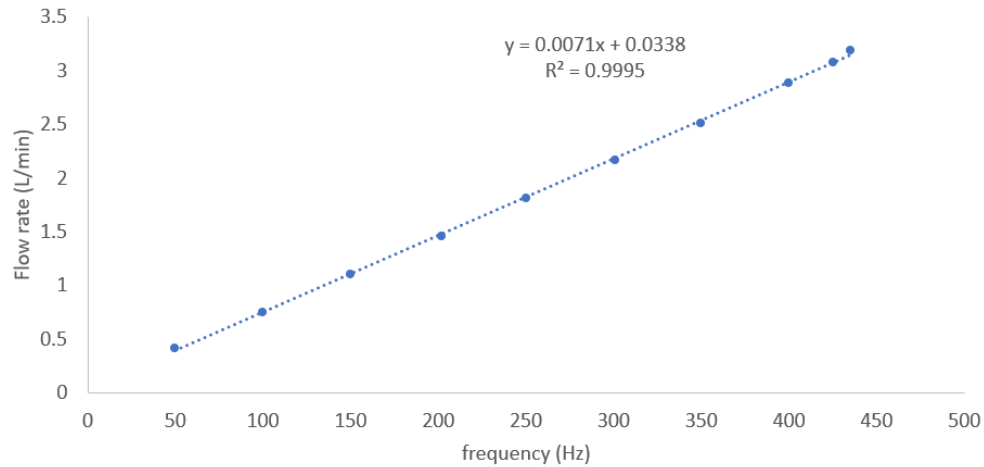


Figura 4.14: Polinomio de ajuste del sensor de flujo.

■ Sensor de temperatura

Para medir la temperatura, se desarrolló un programa en Arduino para la lectura simultánea de cuatro sensores, cuyas mediciones fueron calibradas y comparadas con termopares y termómetros de referencia, garantizando la confiabilidad de los datos durante la operación del sistema.

```

ds18b20PWMAV.ino
1 #include <OneWire.h>
2 #include <DallasTemperature.h>
3
4 // Pines de datos de los sensores
5 OneWire ourWire1(3); // Sensor 1 (agua de enfriamiento de entrada al intercambiador)
6 OneWire ourWire2(4); // Sensor 2 Entrada electrolito al intercambiador
7 OneWire ourWire3(5); // Sensor 3 Salida del electrolito del intercambiador/entrada al electrolizador
8 OneWire ourWire4 (7); //Sensor 4 Salida del agua de enfriamiento
9
10 DallasTemperature sensors1(&ourWire1);
11 DallasTemperature sensors2(&ourWire2);
12 DallasTemperature sensors3(&ourWire3);
13 DallasTemperature sensors4(&ourWire4);
14
15
16 // Pines de salida PWM
17 #define PWM_OUT1 9
18 #define PWM_OUT2 10
19 #define PWM_OUT3 11
20 #define PWM_OUT4 6
21
22 void setup() {
23   Serial.begin(9600);
24
25   // Iniciar sensores
26   sensors1.begin();
27   sensors2.begin();
28   sensors3.begin();
  
```

Figura 4.15: Código de Arduino para sensores de temperatura.

■ Intercambiador de calor

En esta etapa se muestra la versión inicial del montaje del sistema de enfriamiento, como se muestra en la Figura 4.16, con el propósito de evaluar la capacidad de transferencia de calor entre dos fluidos: agua caliente (simulando el electrolito del electrolizador) y agua de enfriamiento. Por razones de seguridad y para evitar el uso innecesario del electrolito, se empleó únicamente agua como fluido caliente.

Las temperaturas registradas, detalladas en la Tabla 4.11, muestran que el agua de enfriamiento aumentó aproximadamente $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ tras pasar por el intercambiador, mientras que el fluido caliente disminuyó entre $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a su temperatura inicial. Estos resultados confirman una buena eficiencia térmica del intercambiador de calor.

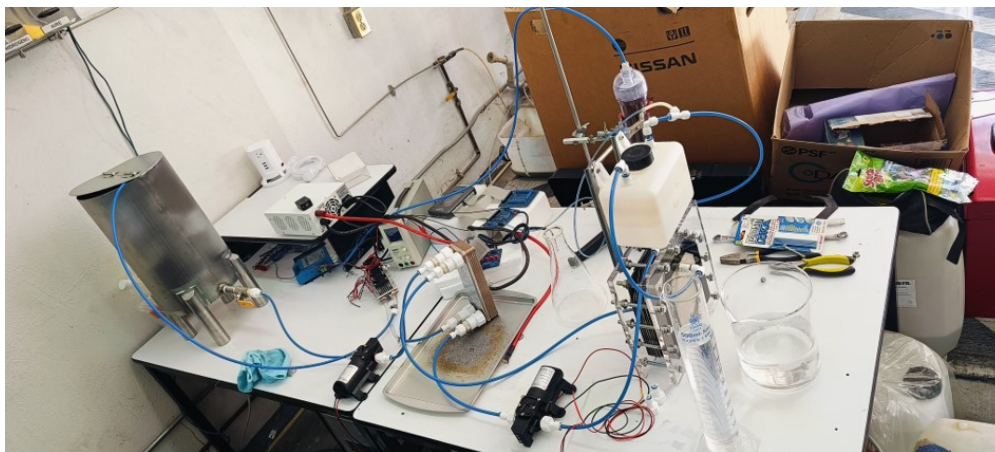


Figura 4.16: Sistema provisional.

Tabla 4.11: *Datos experimentales del intercambiador de calor.*

Prueba	Entrada KOH	Salida KOH	ΔT_{KOH}	Entrada H_2O	Salida H_2O	$\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}$	Equilibrio	Tiempo (min)
Flujo volumétrico (H_2O) = 7 V – 1.66 L/min								
1	60	33.07	26.3	28	33.16	5.16	33	6.6
2	62	33.97	28	28	33.92	5.92	34	5.8
3	66	34.44	31.56	28	34.02	6.02	33.5	5.33
4	66.5	34.56	31.94	28	33.93	6.3	33.5	5.4
5	69	33.88	35.12	26.28	33.92	7.64	34	6.66
Flujo volumétrico (H_2O) = 6 V – 1.4 L/min								
6	60	32.56	27.44	27.95	32.41	4.46	32.5	7
7	64	34.23	29.77	28.35	33.51	5.16	34	7.5
8	65	33.67	31.33	27.68	33.38	5.7	34	7.5
9	67.9	33.35	34.55	27.5	32.92	5.42	33	6.66
10	69.7	33.9	35.8	27.9	33.61	5.71	34	7.66

4.1.3. Sistema de control de la bomba

Para el accionamiento de la bomba de diafragma se empleó una señal de control tipo PWM (Pulse Width Modulation) generada por la tarjeta myRIO. Este dispositivo proporciona una salida digital con niveles de 0 a 3.3 V. Esta señal no es capaz de suministrar directamente la potencia requerida por la bomba, por lo que se empleó un módulo basado en un MOSFET de potencia (D4184) como etapa de acoplamiento (Figura 4.17).

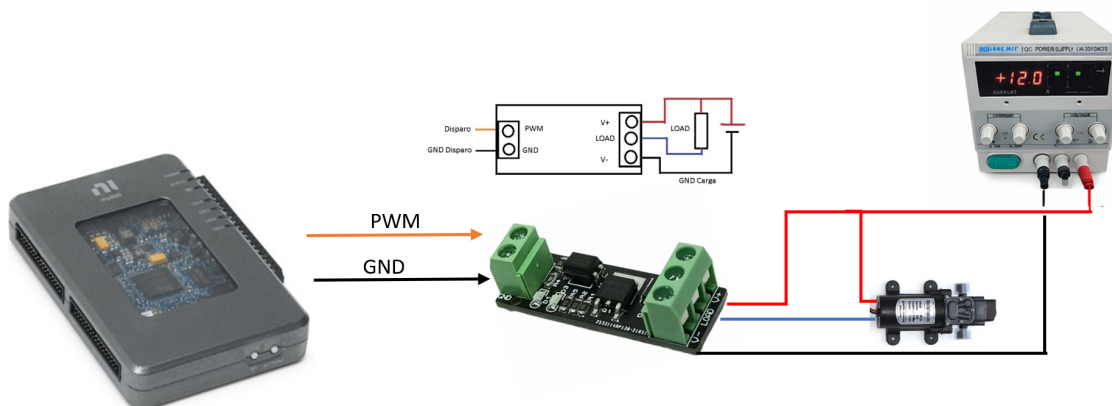


Figura 4.17: Instrumentación del sistema de control de la bomba.

La conexión física del sistema se implementó de la siguiente manera: la salida PWM de la myRIO se conectó a la entrada de control (compuerta) del módulo MOSFET, mientras que la bomba de diafragma se alimentó mediante una fuente externa de 12 V, conectada al MOSFET. De este modo, el transistor actúa como un interruptor electrónico que permite o interrumpe el paso de corriente hacia la bomba en función de la señal recibida. Cuando la señal PWM está en nivel alto (3.3 V), el MOSFET entra en conducción, permitiendo el suministro de 12 V a la bomba; por el contrario, cuando la señal está en nivel bajo (0 V), el MOSFET se apaga, interrumpiendo la alimentación. Este proceso ocurre de manera cíclica a la frecuencia definida del PWM, generando una conmutación rápida de la bomba.

4.1.4. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos del sistema, como se muestra en la Figura 4.18, se emplearon dos tarjetas Arduino con el objetivo de obtener lecturas adecuadas de los sensores de temperatura y de flujo. Así como evitar conflictos de temporización entre los distintos tipos de señales involucradas.

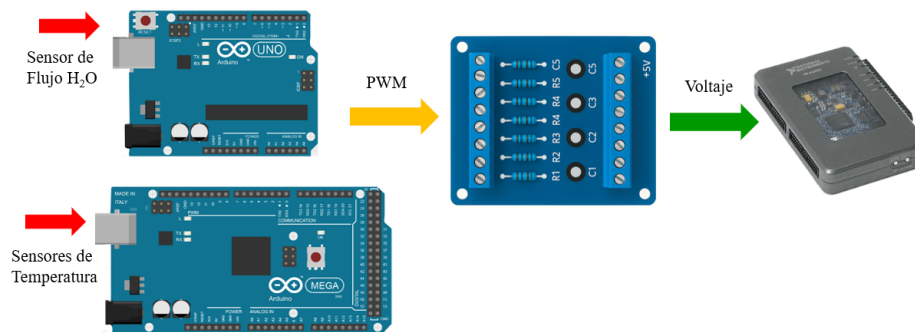


Figura 4.18: Código de Arduino para sensores de temperatura.

Los sensores de temperatura DS18B20 generan señales digitales y se comunican mediante el protocolo One-Wire. El cual requiere una temporización precisa, en el orden de microsegundos durante la transmisión y recepción de datos. Por esta razón, los sensores de temperatura se conectaron a un primer Arduino. De manera similar, el sensor de flujo genera una señal digital en forma de pulsos cuya frecuencia es proporcional al caudal. Estos pulsos deben detectarse mediante interrupciones para evitar la pérdida de información, lo que exige una atención inmediata por parte del microcontrolador, debido a que tanto el protocolo One-Wire como la lectura por interrupciones requieren un control preciso del tiempo, no resulta conveniente integrar ambos tipos de sensores en una sola tarjeta Arduino, ya que las interrupciones del sensor de flujo pueden interferir con la temporización del bus One-Wire, provocando errores de lectura o pérdida de pulsos.

Por esta razón, el sensor de flujo se conectó a un segundo Arduino dedicado exclusivamente a la adquisición de los pulsos y al cálculo del caudal correspondiente. Una vez adquiridos, tanto los valores de temperatura como los de flujo son procesados en sus respectivos Arduino y convertidos en señales PWM proporcionales a las magnitudes medidas.

Las salidas PWM de ambos Arduino se conectan a filtros pasa-bajas RC, cuya función es eliminar las componentes de alta frecuencia de las señales digitales y obtener voltajes continuos equivalentes. Estos voltajes se leen posteriormente en las entradas analógicas de la tarjeta myRio.

La corriente suministrada al electrolizador se midió mediante un sensor tipo shunt, constituido por una resistencia de bajo valor conectada en serie con la carga. La caída de voltaje generada en esta resistencia, proporcional a la corriente según la ley de Ohm, fue amplificada mediante una etapa de acondicionamiento de señal y posteriormente adquirida a través de una entrada analógica de la tarjeta myRIO, permitiendo el monitoreo de la corriente dentro del sistema de adquisición y control implementado en LabVIEW.

4.1.5. Programación en Labview

Se desarrolló un programa en LabVIEW para adquirir, procesar, visualizar y monitorear las variables del sistema. Las señales provenientes de los sensores de temperatura, flujo y corriente son adquiridas como señales analógicas y, posteriormente, se les aplica un escalamiento mediante ecuaciones de calibración para convertirlas a unidades físicas: C para temperatura, m^3/s para flujo y A para la corriente.

Dentro del código se integró un controlador PI junto con una estrategia de control adaptable para la regulación de temperatura, además de incorporar la opción de almacenamiento de datos para su análisis posterior (Figura 4.19).

Una vez implementada la programación por bloques, las variables se monitorean en tiempo real desde la interfaz de LabVIEW mediante indicadores y gráficas, lo que permite observar su comportamiento durante la operación y ajustar las ganancias de los controladores.

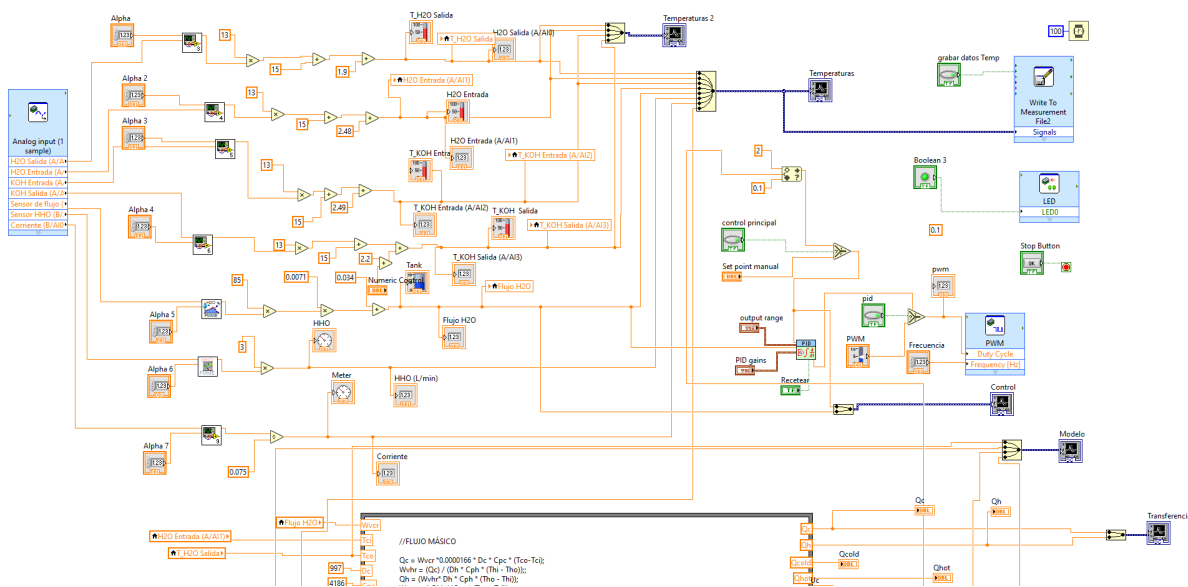


Figura 4.19: Diagrama de bloques en Labview.

4.2. Procedimiento para el desarrollo experimental en lazo abierto

Una vez instrumentado el sistema, se realizaron los siguientes pasos para el análisis de la producción de HHO en lazo abierto en función de la temperatura (Figura 4.21).

- Inicialmente, se prepararon soluciones del electrolito (KOH) a concentraciones de porcentaje masa-masa ($\%m/m$) de 10 %, 15 % y 30 % en 1800 ml de agua desionizada.

Los gramos de KOH de grado analítico requeridos para estos volúmenes se calcularon mediante la Ecuación (4.1), resultando en **200.00 g, 317.64 g y 771.00 g**, para las concentraciones 10 %, 15 % y 30 %, respectivamente.

$$\% m/m = \frac{g_{KOH}}{g_{KOH} + g_{H_2O}} \times 100 \therefore g_{KOH} = \frac{g_{H_2O}}{\frac{100}{\% m/m} - 1}. \quad (4.1)$$



Figura 4.20: Solución KOH.

- Posteriormente, la solución del 10 % se vierte en el tanque del electrolizador y se opera al inicio de la prueba a temperatura ambiente, incrementando de acuerdo con la energía generada por el proceso, y se finaliza la prueba a una temperatura final de 60 °C, con una corriente variable hasta un máximo de 30 A. Se realizaron 4 pruebas bajo estas condiciones.
- Se procede a realizar el paso anterior para las otras dos concentraciones (15 % y 30 %)
- Finalmente, se analizan los datos obtenidos en las pruebas experimentales. Se evalúa la producción de HHO en función de la corriente suministrada y de las temperaturas de operación.

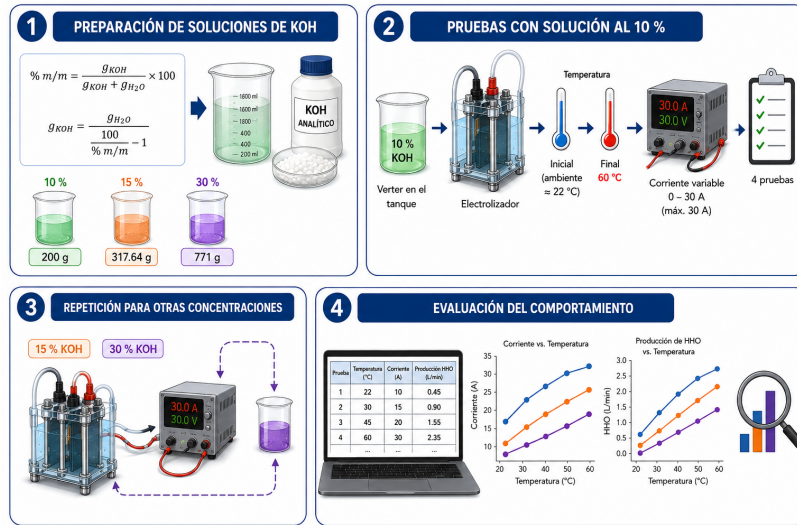


Figura 4.21: Metodología para el análisis de la producción de HHO.

4.3. Modelado del intercambiador de calor de placas

Para modelar la temperatura del electrolito en el intercambiador de calor se empleó el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias presentado en la Ecuación 3.4. Donde las temperaturas de entrada del agua de enfriamiento y del electrolito son T_{ci} y T_{hi} , respectivamente. T_{co} es la temperatura de salida del agua de enfriamiento, T_{ho} es la temperatura de salida del electrolito. Posteriormente, se parametrizó con los valores del hidróxido de potasio presentados en la Tabla 4.12 y se realizaron diferentes simulaciones fuera de línea, validando el modelo parametrizado con datos experimentales.

Tabla 4.12: Datos de reparametrización el modelo.

Parámetro	Valor
Área de transferencia A_c	0.028 m^2
Volumen V_c	0.1135 L
Volumen V_h	0.075 L
Flujo volumétrico del electrolito Wv_h	1.74 L/min
Densidad del agua ρ_c	989.36 kg/m^3
Densidad del electrolito ρ_h	1102 kg/m^3
Calor específico del agua Cp_c	$4180 \text{ J/K}^\circ\text{C}$
Calor específico del electrolito Cp_h	$3684 \text{ J/K}^\circ\text{C}$

4.4. Diseño del control

Para el desarrollo y validación de la regulación de la temperatura en el intercambiador de calor se propone un control en cascada. En el sistema se identifican dos lazos de control jerárquicamente organizados: un lazo externo (principal) y un lazo interno (secundario).

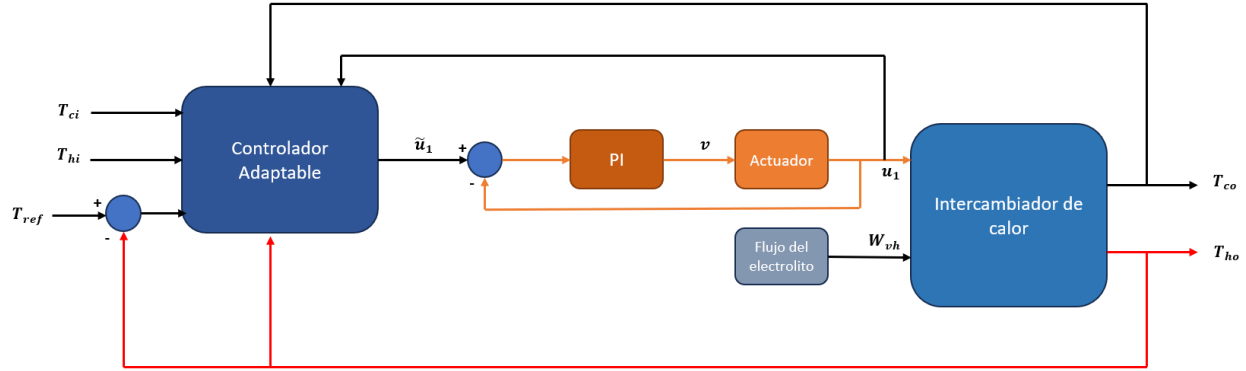


Figura 4.22: Diagrama de control en cascada para la regulación de temperatura.

El **lazo externo** tiene como variable controlada la temperatura de salida del fluido caliente (electrolito) T_{ho} . La diferencia entre la temperatura de referencia T_{ref} y la temperatura medida genera una señal de error que es procesada por el controlador adaptable. Como resultado, se obtiene la señal $\tilde{u}_1$, la cual representa el flujo requerido teóricamente para llevar la temperatura al valor deseado. Esta señal no actúa directamente sobre el proceso físico, sino que funciona como referencia para el lazo interno.

El **lazo interno**, conformado por un controlador PI y el actuador, tiene como objetivo que la variable manipulada v , que corresponde al voltaje aplicado al actuador, garantice el flujo requerido $\tilde{u}_1$ por el control adaptable para la regulación de la temperatura. Como resultado de esta acción de control se obtiene la variable u_1 , que representa el flujo real generado por el sistema después de pasar por todo el lazo de control interno.

4.4.1. Control Proporcional-Integral (Método Zingler-Nichols)

Para calcular las ganancias del control PI se utilizó el Método de Zingler-Nichols. Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_c , en donde la salida presenta oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica K_c y el periodo P_c correspondiente se determinan experimentalmen-

te (véase la Figura 4.23). Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p y T_i de acuerdo con las fórmulas presentadas en la Tabla 4.13.

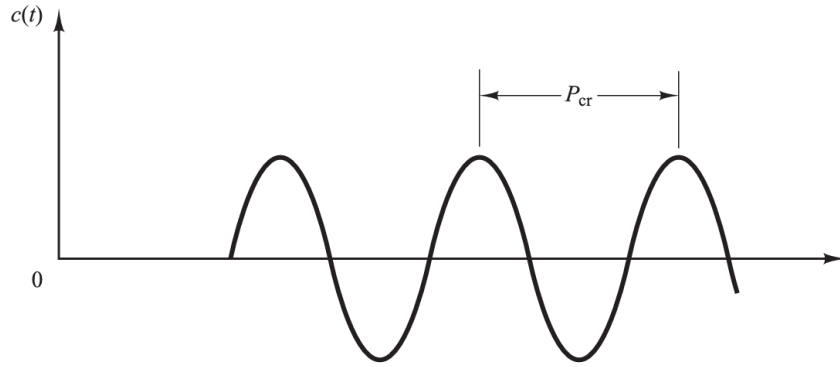


Figura 4.23: Oscilación sostenida con periodo P_c .

Tabla 4.13: *Parámetros de sintonización de controladores según Ziegler-Nichols*

Controlador	K_p	τ_i
PI	$0.45K_u$	$\frac{P_u}{1.2}$

Obsérvese que el controlador PI sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols se obtiene la Ecuación 4.2 :

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right). \quad (4.2)$$

4.4.2. Control adaptable

Para el diseño de la ley de control adaptable, se emplea el modelo no lineal dado en la Ecuación (4.3) [54].

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t)) + G\tilde{u}(t), \\ y(t) &= \hat{h}(x(t)), \end{aligned} \quad (4.3)$$

donde x representa las variables de estado en $\mathbb{R}^n$, $f = [f_1 \ f_2]^T$ y $G = \text{diag}[g_1, g_2]$, $\tilde{u} = [\tilde{u}_1 \ \tilde{u}_2]^T$ son las entradas de control, y es el vector de salidas en $\mathbb{R}^p$. De tal forma, que el modelo del intercambiador de calor puede ser representado como se muestra en la Ecuación (4.4).

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_c A_c}{C_{p_c} \rho_c V_c} T_{ho}(t) - T_{co}(t) \\ \frac{\dot{U}_h A_h}{C_{p_h} \rho_h V_h} T_{co}(t) - T_{ho}(t) \end{bmatrix}}_f + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} & 0 \\ 0 & \frac{T_{hi}(t) - T_{ho}(t)}{V_h} \end{bmatrix}}_G \underbrace{\begin{bmatrix} W_{vc} \\ W_{vh} \end{bmatrix}}_{\tilde{u}}, \quad (4.4)$$

$$y = \hat{h}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ h(x) \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

Donde $\dot{x} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2) = (\dot{T}_{co}, \dot{T}_{ho})$, W_{vc} y W_{vh} representan los flujos volumétricos del agua de enfriamiento y del electrolito, respectivamente. T_{ci} y T_{hi} son las temperaturas de entrada del agua de enfriamiento y del electrolito. Finalmente, $h(x) = -\frac{W m_h C_{p_h} (x_2 - T_{hi})}{U_h A_h} + x_1$.

Para el diseño de la ley de control, se asumen incertidumbres constantes (d_1 y d_2) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1 + g_1 \tilde{u}_1 + d_1, \\ \dot{x}_2(t) &= f_2 + g_2 \tilde{u}_2 + d_2. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Usando la representación dada en la Ecuación (4.6), el modelo del intercambiador de calor puede ser representado como se muestra en la Ecuación (4.7):

$$\begin{aligned} \dot{T}_{co}(t) &= \frac{\dot{U}_c A_c}{C_{p_c} \rho_c V_c} (T_{ho}(t) - T_{co}(t)) + \frac{W_{vc}}{V_c} (T_{ci}(t) - T_{co}(t)) + d_1, \\ \dot{T}_{ho}(t) &= \frac{\dot{U}_h A_h}{C_{p_h} \rho_h V_h} (T_{co}(t) - T_{ho}(t)) + \frac{W_{vh}}{V_h} (T_{hi}(t) - T_{ho}(t)) + d_2. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Dado que el objetivo principal es regular la temperatura del agua caliente (T_{ho}), a partir de la segunda variable de estado se define el error. De tal forma, el error se define como $e_2 = y_2 - r$, donde r es la referencia. Y la dinámica del error de la variable controlada se define por $\dot{e}_2 = \dot{y}_2$.

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_2 &= \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial h}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial h}{\partial x_2} \dot{x}_2, \\
 &= \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} f_1 + \frac{\partial h}{\partial x_2} f_2 \right) + \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} g_1 \tilde{u}_1 + \frac{\partial h}{\partial x_2} g_2 \tilde{u}_2 \right) + \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} d_1 + \frac{\partial h}{\partial x_2} d_2 \right), \\
 &= \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \left(\frac{\hat{U}_c A_c}{C p_c \rho_c V_c} T_{ho}(t) - T_{co}(t) \right) + \frac{\partial h}{\partial x_2} \left(\frac{\hat{U}_h A_h}{C p_h \rho_h V_h} T_{co}(t) - T_{ho}(t) \right) \right) \\
 &\quad + \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) W v_c + \frac{\partial h}{\partial x_2} \left(\frac{T_{hi}(t) - T_{ho}(t)}{V_h} \right) W v_h \right) \\
 &\quad + \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} d_1 + \frac{\partial h}{\partial x_2} d_2 \right). \tag{4.8}
 \end{aligned}$$

Reescribiendo la Ecuación (4.8) con un cambio de variable, la Ecuación toma la siguiente forma.

$$\dot{e}_2 = l_k f + l_{k2} g_2 \tilde{u}_2 + l_{k1} g_1 \tilde{u}_1 + l_k \theta, \tag{4.9}$$

donde

- $l_k = \begin{bmatrix} l_{k1} & l_{k2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x_1} & \frac{\partial h}{\partial x_2} \end{bmatrix}.$
- $f = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\hat{U}_c A_c}{C p_c \rho_c V_c} T_{ho}(t) - T_{co}(t) & \frac{\hat{U}_h A_h}{C p_h \rho_h V_h} T_{co}(t) - T_{ho}(t) \end{bmatrix}^T.$
- $\theta = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 \end{bmatrix}^T.$

Donde $l_{ki} g_i$ depende de la variable de estado x . De tal forma se asume que $l_{ki} g_i$ y g_i existen para cada rango de operación de la variable de estado. De tal forma, la ecuación anterior puede reescribirse como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_2 &= l_{k1} g_1 \left[(l_{k1} g_1)^{-1} l_k f + (l_{k1} g_1)^{-1} l_{k2} g_2 \tilde{u}_2 + \tilde{u}_1 + (l_{k1} g_1)^{-1} (l_k \theta) \right], \\
 &= \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right) \left[\left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right)^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2} \right) \left(\frac{\hat{U}_c A_c}{C p_c \rho_c V_c} T_{ho}(t) - T_{co}(t) \right) + \dots \right. \\
 &\quad \left. \dots \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right)^{-1} \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_2} \right) \left(\frac{T_{hi}(t) - T_{ho}(t)}{V_h} \right) (W v_h) \right) + (W v_c) + \dots \right. \\
 &\quad \left. \dots + \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right)^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2} \right) \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \right]. \tag{4.10}
 \end{aligned}$$

Dado que θ es un parámetro desconocido, como se menciona en el lema de Barbalat, la dinámica del error en lazo cerrado para una ley de control adaptable con un parámetro desconocido se calcula de la siguiente manera [55].

$$\dot{e} = -e + \Theta\psi, \quad (4.11)$$

donde Θ es el parámetro y ψ es una función acotada en el tiempo t tal que puede representarse de la siguiente forma.

$$\dot{e}_2 = -Ce_2 + (\theta - \hat{\theta})^T l_k^T, \quad (4.12)$$

donde $C > 0$ es una constante positiva.

Una vez que la dinámica del error en lazo cerrado ha sido propuesta para la ley de control adaptable con un parámetro desconocido, se sustituye en la Ecuación (4.10) de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} -Ce_2 + (\theta - \hat{\theta})^T l_k^T &= l_{k1}g_1 \left[(l_{k1}g_1)^{-1}l_k f + (l_{k1}g_1)^{-1}l_{k2}g_2\tilde{u}_2 \right. \\ &\quad \left. + \tilde{u}_1 + (l_{k1}g_1)^{-1}(l_k\theta) \right]. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Reescribiendo la Ecuación (4.13):

$$\begin{aligned} -C(y_2 - r) + \left(\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{pmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x_1} & \frac{\partial h}{\partial x_2} \end{bmatrix}^T &= \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right) \left[\left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right)^{-1} \right. \\ &\quad \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2} \right) \left(\frac{\frac{\dot{U}_c A_c}{C_{pc} \rho_c V_c} T_{ho}(t) - T_{co}(t)}{\frac{\dot{U}_h A_h}{C_{ph} \rho_h V_h} T_{co}(t) - T_{ho}(t)} \right) + \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \dots \right. \\ &\quad \left. \dots \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right)^{-1} \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_2} \right) \left(\frac{T_{hi}(t) - T_{ho}(t)}{V_h} \right) (Wv_h) \right) \\ &\quad \left. + (Wv_c) + \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \right) \left(\frac{T_{ci}(t) - T_{co}(t)}{V_c} \right) \right)^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2} \right) \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \right]. \end{aligned}$$

Resolviendo para $\tilde{u}_1$ de la Ecuación (4.13), la señal de control puede ser representada como se muestra en la Ecuación (4.15).

$$\begin{aligned}
 \tilde{u}_1 &= -C(l_{k1}g_1)^{-1}e_2 - (l_{k1}g_1)^{-1}l_k f - (l_{k1}g_1)^{-1}l_{k2}g_2\tilde{u}_2 - (l_{k1}g_1)^{-1}(l_k\hat{\theta}), \\
 &= -C\left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1}\right)\left(\frac{T_{ci}(t)-T_{co}(t)}{V_c}\right)\right)^{-1}(y_2 - r) - \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1}\right)\left(\frac{T_{ci}(t)-T_{co}(t)}{V_c}\right)\right)^{-1} \dots \\
 &\dots \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2}\right)\left(\frac{\frac{\dot{V}_c A_c}{C_{pc}\rho_c V_c}T_{ho}(t)-T_{co}(t)}{\frac{\dot{V}_h A_h}{C_{ph}\rho_h V_h}T_{co}(t)-T_{ho}(t)}\right)\right) - \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1}\right)\left(\frac{T_{ci}(t)-T_{co}(t)}{V_c}\right)\right)^{-1} \dots \\
 &\dots \left[\left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_2}\right)\left(\frac{T_{hi}(t)-T_{ho}(t)}{V_h}\right)^T(W_{vh})\right) - \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x_1}\right)\left(\frac{T_{ci}(t)-T_{co}(t)}{V_c}\right)\right)^{-1}\left(\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2}\right)\begin{pmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{pmatrix}\right],
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$\tilde{u}_2 = -C_2g_2^{-1}e_{2e} - (g_2)^{-1}f_2 + (g_2)^{-1}\dot{x}_{1d} - (g_2)^{-1}\hat{d}_2, \tag{4.15}$$

Para estimar el parámetro θ , se define la siguiente función de Lyapunov, considerando que $\dot{V} \leq 0$.

$$V = \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2q}(\theta - \hat{\theta})^T(\theta - \hat{\theta}), \tag{4.16}$$

$$\dot{V} = e_2\dot{e}_2 + \frac{1}{q}(\theta - \hat{\theta})^T(-\dot{\hat{\theta}}). \tag{4.17}$$

Dado que V es una función continua de e y $\hat{\theta}$, esto asegura que $V(0)$ está acotada para cualquier valor de $e(0)$ y $\hat{\theta}(0)$, i.e., $V(0) < \infty$.

Sustituyendo la Ecuación (4.12) en (4.17):

$$\dot{V} = e_2\left(-Ce_2 + (\theta - \hat{\theta})^T \cdot l_k^T\right) + \frac{1}{q}(\theta - \hat{\theta})^T(-\dot{\hat{\theta}}), \tag{4.18}$$

$$\dot{V} = -Ce_2^2 + e_2(\theta - \hat{\theta})^T l_k^T + \frac{1}{q}(\theta - \hat{\theta})^T(-\dot{\hat{\theta}}), \tag{4.19}$$

$$\dot{V} = -Ce_2^2 + \frac{1}{q}(\theta - \hat{\theta})^T(q l_k^T e_2 - \dot{\hat{\theta}}). \tag{4.20}$$

A partir de la Ecuación (4.20), se deduce que $\dot{V} \leq 0$ and $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$. De forma que la ley de control adaptable queda como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 (q l_k^T e_2 - \dot{\hat{\theta}}) &= 0, \\
 \dot{\hat{\theta}} &= (q l_k^T e_2), \\
 &= \left(q \left[\frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial h}{\partial x_2}\right]^T (y_2 - r)\right),
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

donde q es el término que representa la velocidad de adaptación, el cual debe ser $q > 0$.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Implementación de un sistema de enfriamiento en un electrolizador alcalino

El sistema general (Figura 5.1) se encuentra conformado por dos circuitos principales: el primero corresponde al circuito de circulación del electrolito (borde rojo), mientras que el segundo está destinado a la circulación del agua de enfriamiento (borde verde).

El sistema está conformado por un electrolizador alcalino, un intercambiador de calor y dos bombas de diafragma encargadas de la recirculación del electrolito y del agua de enfriamiento. Para el monitoreo térmico, se emplean cuatro sensores de temperatura instalados en las entradas y salidas del intercambiador, cuyas mediciones permiten evaluar el comportamiento dinámico de la temperatura y su relación con el modelo propuesto. Así mismo, se complementa con un sensor de flujo para el control térmico, dos columnas de secado para el tratamiento del gas generado. La parte posterior del sistema (Figura 5.2) integra 4 fuentes de alimentación y tarjetas electrónicas (Arduino, filtro y myRIO) destinadas a la adquisición de datos. En la Figura 5.4 se muestra la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, utilizada para la adquisición, visualización y monitoreo en tiempo real de las variables del sistema durante los experimentos.

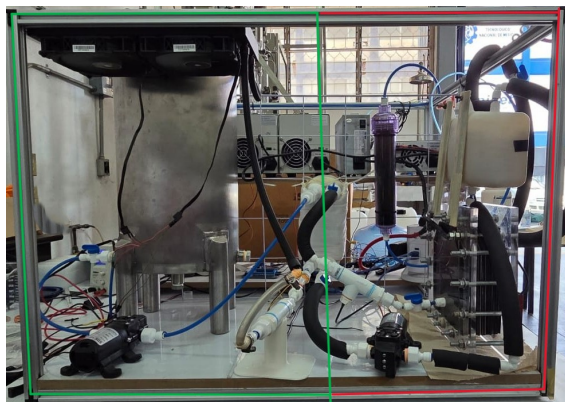


Figura 5.1: Vista frontal del sistema instrumentado.

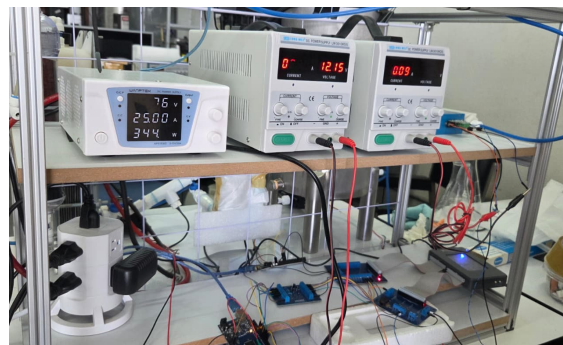


Figura 5.2: Vista posterior del sistema instrumentado.

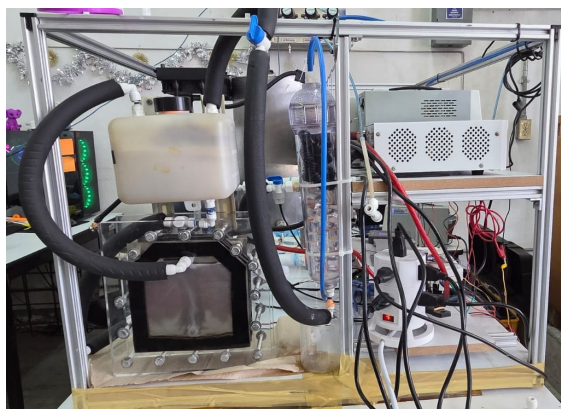


Figura 5.3: Vista lateral del sistema.

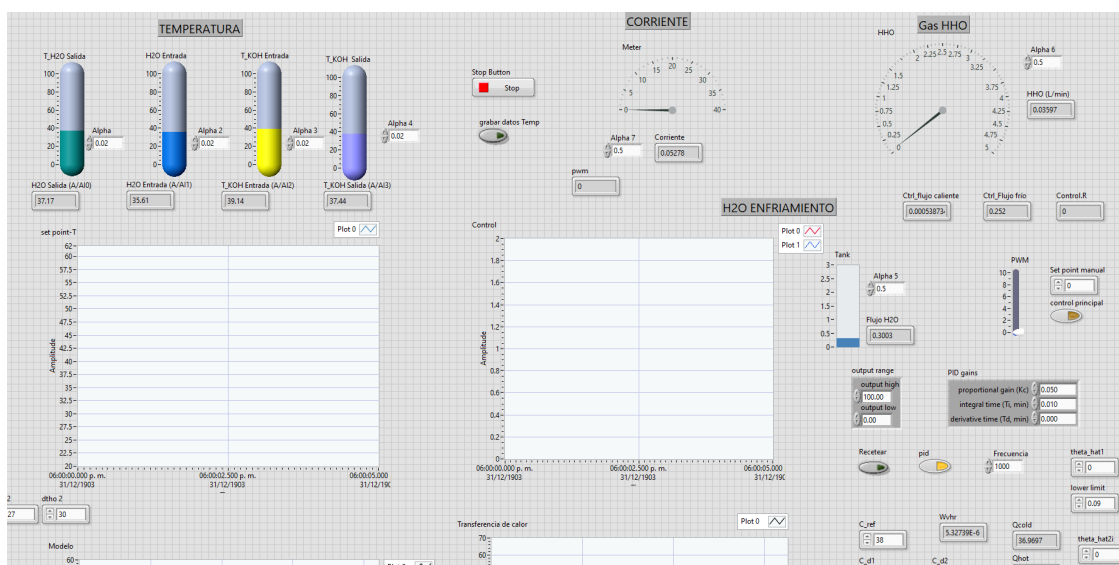


Figura 5.4: Interfaz de LabVIEW.

5.2. Producción de HHO en función de la temperatura (Lazo abierto)

En este apartado se describe el análisis de resultados con base en la producción de HHO en lazo abierto, en función de la temperatura a una concentración del electrolito (KOH) de 10 %, 15 % y 30 % en masa.

5.2.1. Producción de HHO a una concentración del 10 % masa de KOH

Los resultados experimentales de la producción de oxihidrógeno en función de la temperatura se presentan en la Figura 5.5, donde se muestran cuatro pruebas experimentales realizadas bajo las condiciones de operación mencionadas anteriormente, la única diferencia entre ellas es la temperatura inicial del electrolito. Se observa que en las pruebas 1 y 2 la mayor producción de HHO se alcanza a temperaturas menores que en las pruebas 3 y 4, debido a que en estas primeras la corriente mantuvo valores ligeramente más altos durante el experimento.

En cada prueba se observa que la producción de HHO aumenta gradualmente conforme se incrementa la temperatura (Figura 5.5), y se estabiliza en una temperatura aproximadamente de 38 °C, misma en la que la corriente tiende a estabilizarse en un rango aproximado entre 28 A y 30 A (Figura 5.6), alcanzando valor máximo en la producción de HHO de 1.4311 SLPM.

Tomando como ejemplo la prueba número cuatro, se observa que la dinámica del sistema evidencia una relación directa entre la corriente suministrada y la producción de HHO. Es decir, que, al incrementar la corriente, la producción de HHO también aumenta, como se muestra en la Figura 5.7.

El análisis de varianza y desviación estándar mostró que la producción de HHO presenta baja variabilidad (varianza = 0.0105 SLPM², desviación estándar = 0.1024 SLPM), mientras que la corriente exhibe mayor dispersión (varianza = 4.1895 A², desviación estándar = 2.0468 A). Esto indica que, a pesar de las fluctuaciones en la corriente, la producción de HHO tiende a variar en menor proporción. Además, en la Figura 5.8 se observa que, a partir de aproximadamente 27 A, la producción de HHO se concentra en valores cercanos al máximo (~1.43 SLPM), lo que define un rango de operación de mayor eficiencia del sistema.

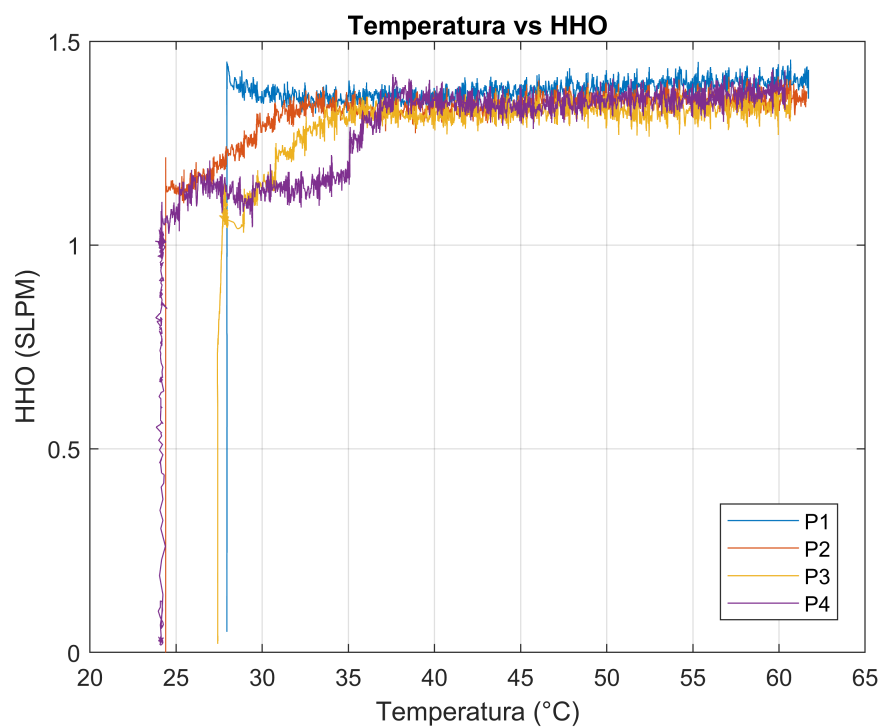


Figura 5.5: Temperatura vs Producción HHO (10 % KOH).

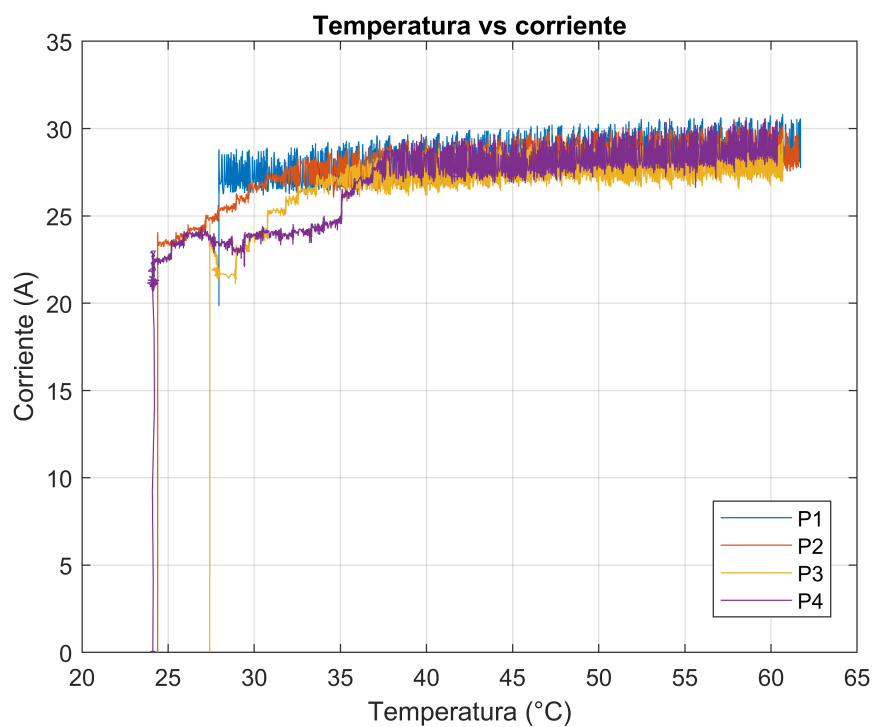


Figura 5.6: Temperatura vs Corriente (10 % KOH).

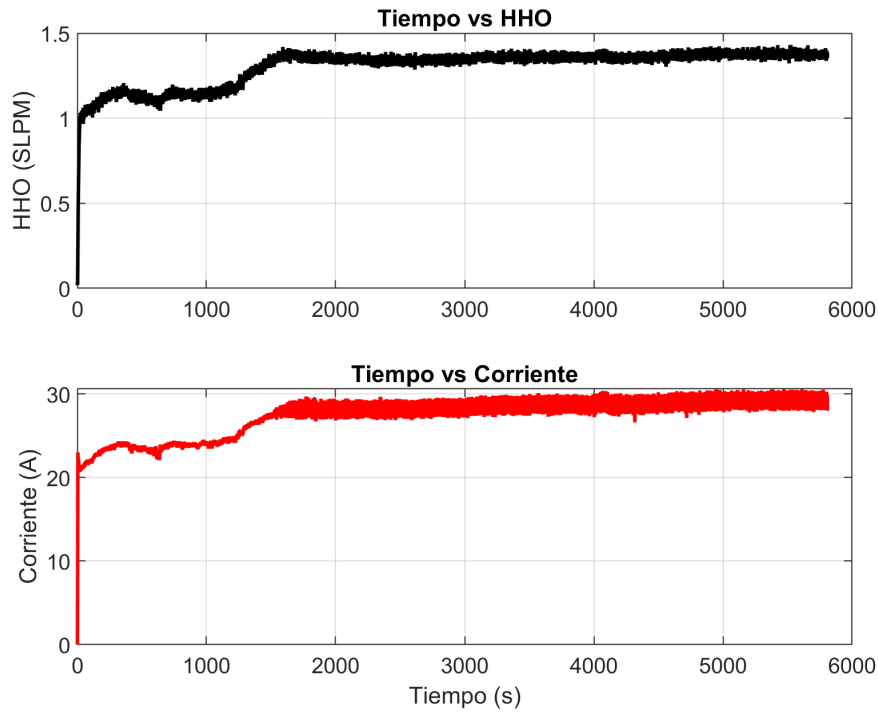


Figura 5.7: Dinámica de la corriente y la producción (10 % KOH).

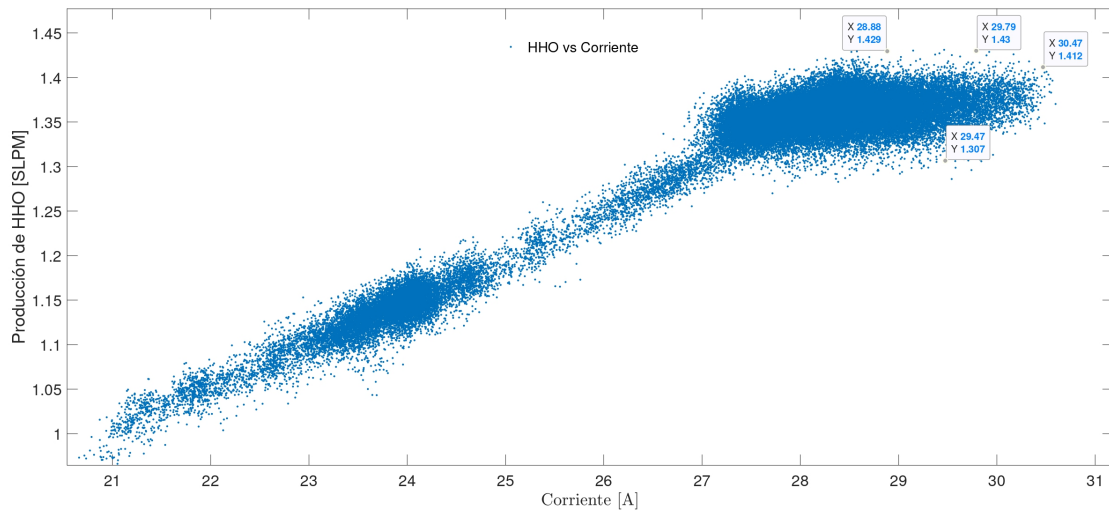


Figura 5.8: Producción de HHO vs Corriente al 10 % en masa de KOH.

Después del desarrollo y análisis de las pruebas realizadas y presentadas en las Figuras 5.5 y 5.6, se desarrollaron nuevas pruebas experimentales debido a que se detectó un desgaste en el cable de alimentación de corriente del sistema de electrólisis. En la Figura 5.9 se muestran las dos pruebas adicionales realizadas bajo las condiciones descritas en el *Apartado 4.2*.

Los resultados obtenidos en la Figura 5.9 muestran un incremento en la producción total de HHO (≈ 1.98) en comparación con las pruebas realizadas con anterioridad (≈ 1.43), mostradas en la Figura 5.5. En las nuevas pruebas se mantuvo el comportamiento observado en las pruebas iniciales. Como se observa en la Figura 5.9, aunque las pruebas adicionales presentaron una mayor producción de HHO, los valores máximos se alcanzaron, al igual que en las pruebas iniciales, una vez que la temperatura del electrolito superó los 38 °C.

Asimismo, en la Figura 5.10 se presenta el comportamiento de la corriente durante la operación del sistema, donde se observa una estabilización de esta variable a partir de los 38 °C, indicando un estado de operación más estable conforme aumenta la temperatura del electrolito

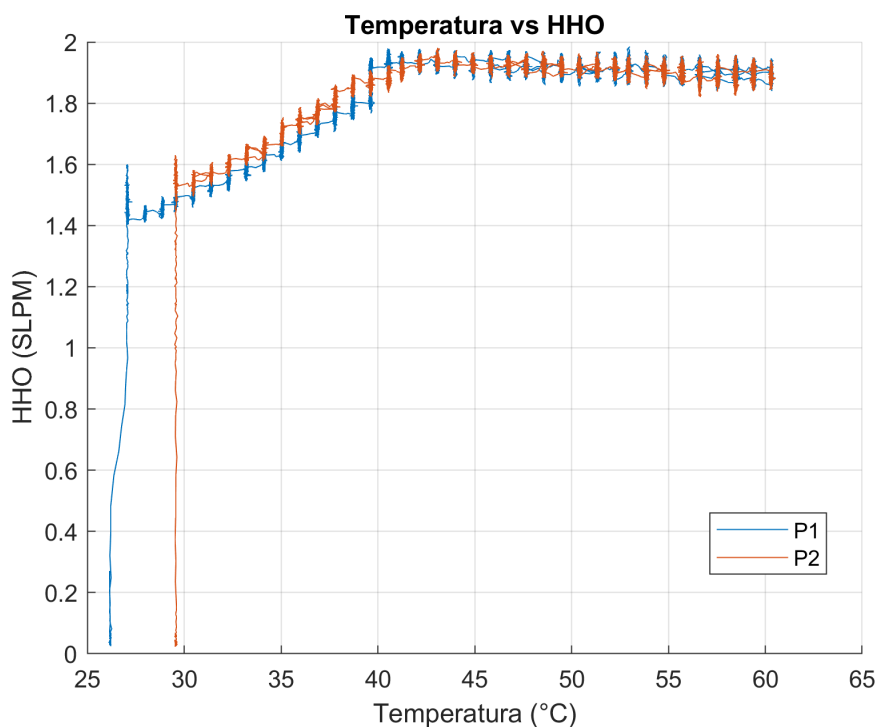


Figura 5.9: Temperatura vs Producción de HHO (10 % KOH)-Prueba adicional.

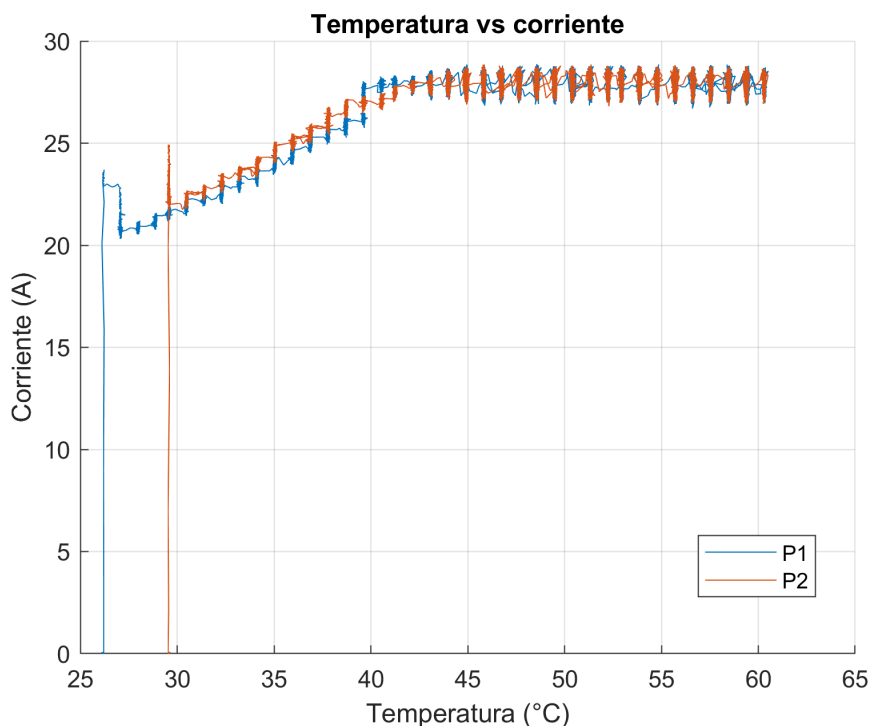


Figura 5.10: Temperatura vs Corriente (10 % KOH)-Prueba adicional.

5.2.2. Producción de HHO a una concentración del 15 % masa de KOH

Al igual que en el punto anterior se realizaron cuatro pruebas experimentales bajo las condiciones de operación descritas en el *Apartado 4.2*. Los resultados obtenidos de la producción de HHO y la corriente en función de la temperatura se muestran en las Figuras 5.11 y 5.12, respectivamente.

En la Figura 5.11 se observa que la producción de HHO aumenta gradualmente conforme se incrementa la temperatura, hasta alcanzar una condición de estado estacionario alrededor de 44 °C. No obstante, la prueba 3 (P3, línea amarilla) presenta un comportamiento distinto, ya que la producción se estabiliza a una temperatura menor de 34 °C. Asimismo, se aprecia que en las pruebas 2 y 3 (líneas naranja y amarilla, respectivamente) los valores máximos de producción de HHO se alcanzan a temperaturas inferiores en comparación con las pruebas 1 y 4 (líneas azul y morada, respectivamente). El valor máximo de producción de HHO que se obtuvo durante el experimento fue de 2.115.

Con el fin de comparar el desempeño de una concentración de KOH del 15 % m/m con la de 10 % m/m, se evaluó la producción de HHO a 38 °C, temperatura en la que, para el 10 % m/m, se alcanzaban los valores máximos de producción y que se encuentra dentro

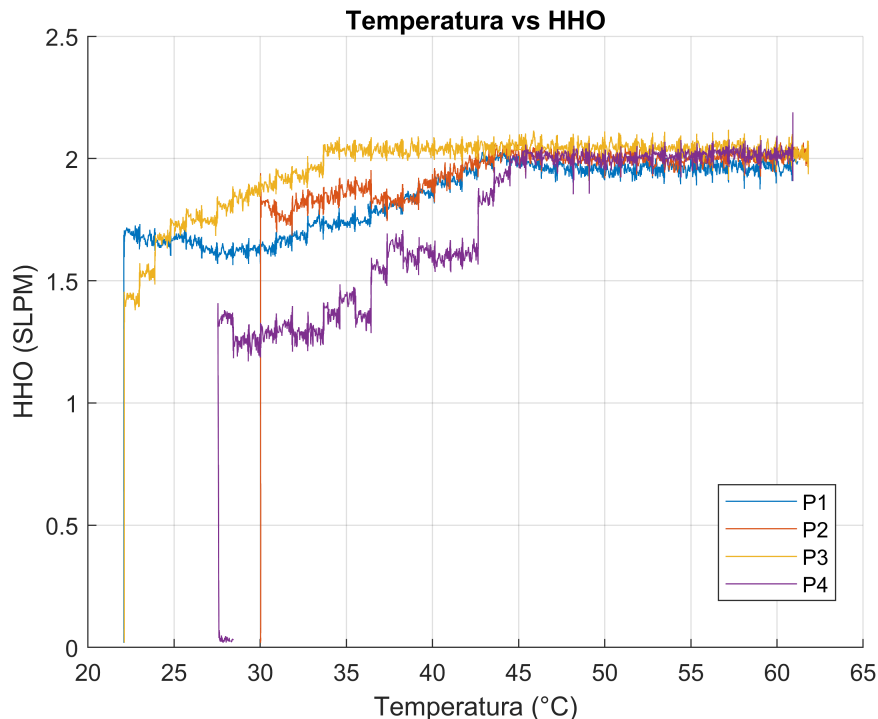


Figura 5.11: Temperatura vs Producción HHO (15 % KOH).

del intervalo de estabilización observado para el 15 % m/m (34 y 44 °C). Los resultados obtenidos ($P1 = 1.785$, $P2 = 1.835$, $P3 = 2.037$ y $P4 = 1.530$ SLPM) muestran que, a esta temperatura, la producción de HHO es cercana a su valor máximo o superior a la alcanzada con una concentración de KOH del 10 % m/m.

En la Figura 5.12 se observa que la corriente se estabiliza hasta una temperatura de 44 °C. De igual forma, en las pruebas 2 y 3 se observa que la corriente es más alta a menores temperaturas, en comparación con las pruebas 1 y 4.

La relación observada entre la corriente eléctrica y la producción de gas es consistente con lo establecido por las leyes de la electrólisis de Faraday, las cuales indican que la cantidad de sustancia producida en un proceso electroquímico es directamente proporcional a la corriente eléctrica que circula por el sistema [56]. En consecuencia, el aumento de la corriente se refleja directamente en un incremento de la producción de HHO.

En la Figura 5.13 se observa que la dinámica de la producción de HHO y la corriente es similar, por tanto, están directamente relacionadas; ambas alcanzan el estado estacionario en 3000 s.

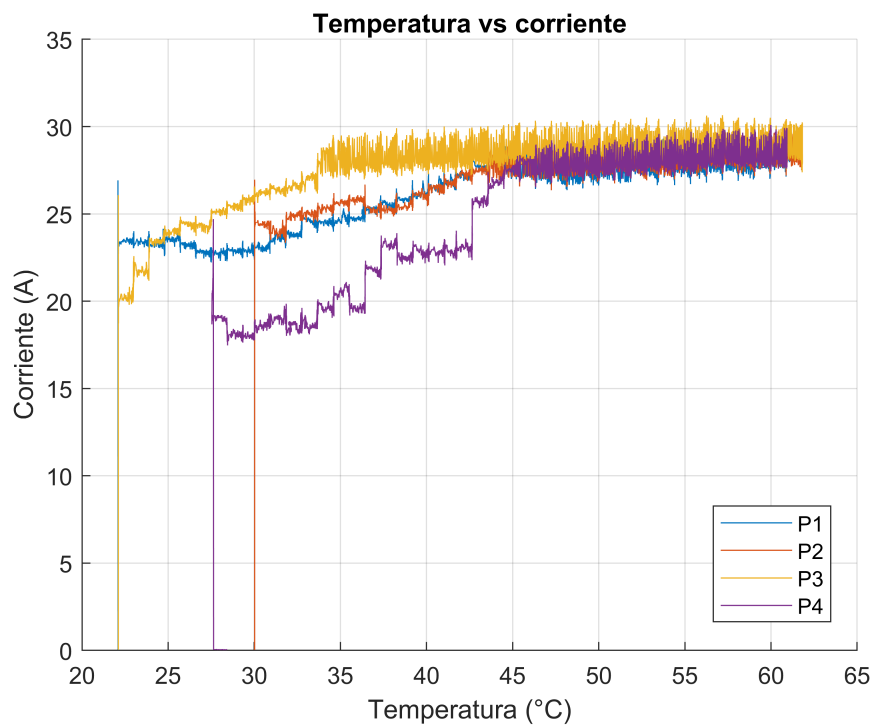


Figura 5.12: Temperatura vs Corriente (15 % KOH).

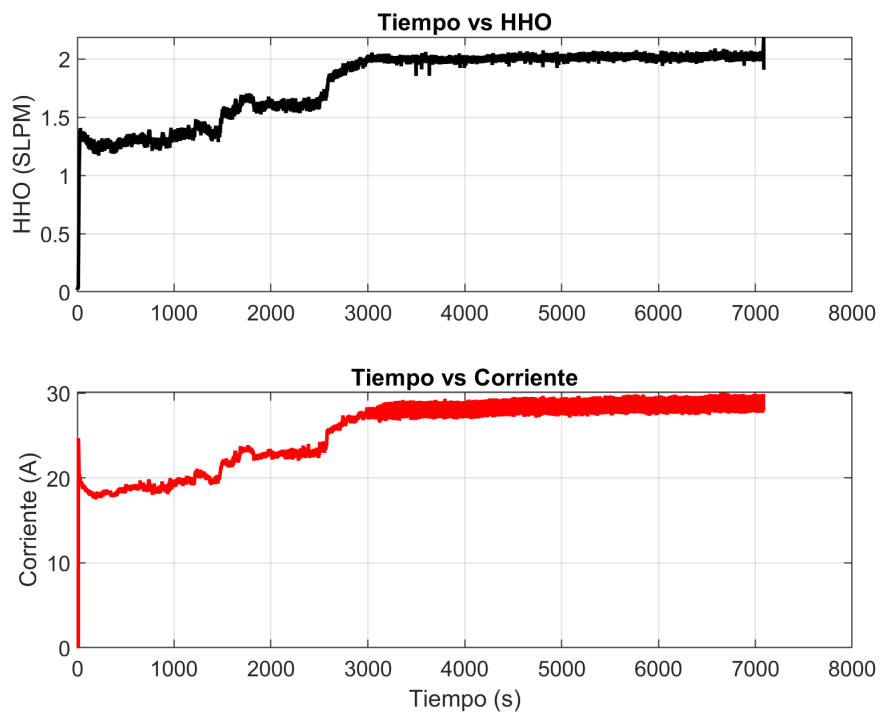


Figura 5.13: Dinámica de la corriente y la producción de HHO (15 % KOH).

La Figura 5.14 muestra la producción de HHO vs. la corriente suministrada. Señalando que la varianza de la señal de la producción de HHO fue de 0.0837 SLPM^2 y la desviación estándar de 0.2893 SLPM . Mientras que la varianza y desviación estándar de la corriente fueron 13.9913 A^2 y 3.7405 A , respectivamente. Y las mayores producciones de HHO se obtienen entre 27 A y 30 A de corriente.

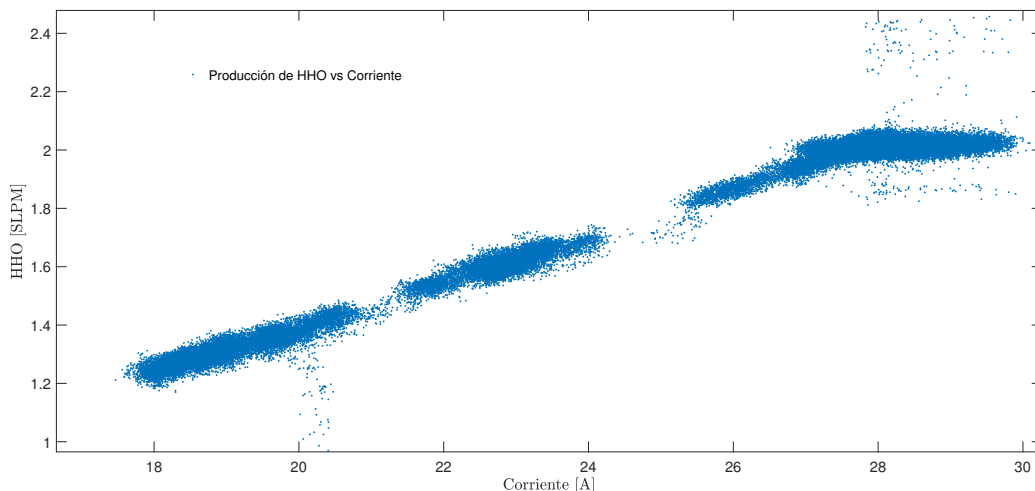


Figura 5.14: Producción de HHO vs Corriente al 15 % en masa de KOH.

5.2.3. Producción de HHO a una concentración del 30 % masa de KOH

Los resultados experimentales para la concentración del 30 % en masa de KOH, bajo las condiciones de operación descritas en el *Apartado 4.2* e iniciando a distintas temperaturas, la Figura 5.15 y Figura 5.16 muestran la producción de HHO y la corriente en función de la temperatura, respectivamente.

En comparación con los datos obtenidos para concentraciones de 10 % y 15 %, tanto la corriente como la producción de HHO presentan un comportamiento diferente. En las pruebas mencionadas anteriormente, conforme aumenta la temperatura, también aumenta la corriente de alimentación y, por ende, la producción de HHO. Sin embargo, cuando el electrolito se encuentra a una concentración del 30 %, se observa que, aunque la corriente se mantiene relativamente estable alrededor de los 30 A con pequeñas fluctuaciones, la producción de HHO disminuye ligeramente conforme la temperatura aumenta. El valor máximo y mínimo de la producción de HHO durante el experimento fue de 1.98 SLPM y 1.6 SLPM , respectivamente.

De acuerdo con la Figura 5.16, la corriente no muestra una dependencia significativa con

la temperatura dentro del rango analizado (aproximadamente 25 °C a 60 °C), manteniéndose prácticamente constante. En contraste, la producción de HHO presenta una tendencia ligeramente descendente a temperaturas más elevadas, lo que podría indicar la presencia de efectos asociados a cambios en las propiedades del electrolito [57], variaciones en la conductividad efectiva [58], mayor generación de burbujas [59] o limitaciones en la transferencia de masa [23]. A una concentración de 30 % en masa de KOH, la resistencia del electrolito es significativamente menor que en soluciones de 10 % y 15 %, lo que provoca que el sistema demande una corriente superior al límite de la fuente desde temperaturas iniciales.

Tomando como ejemplo la prueba 4, en la Figura 5.17 se observa que la corriente se mantiene prácticamente constante desde el primer instante (~ 30 A). Este comportamiento se debe que a altas concentraciones de KOH la conductividad iónica del electrolito es significativamente mayor, lo que implica una menor resistencia óhmica del medio. Con respecto en la producción de HHO se observa más a detalle a partir de 2000 s una disminución de la producción conforme transcurre el tiempo.

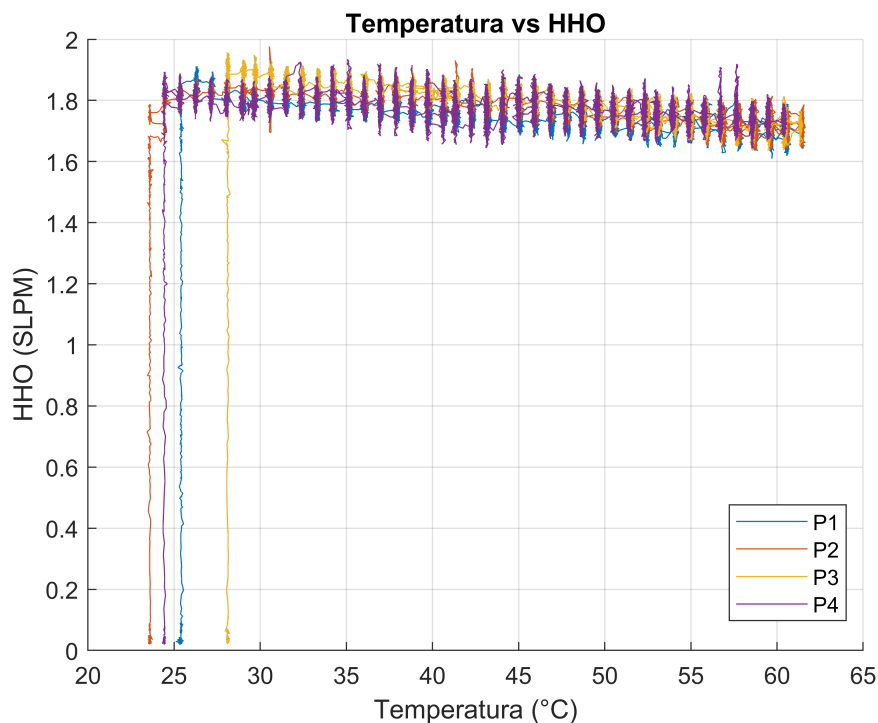


Figura 5.15: Temperatura vs Producción HHO (30 % KOH).

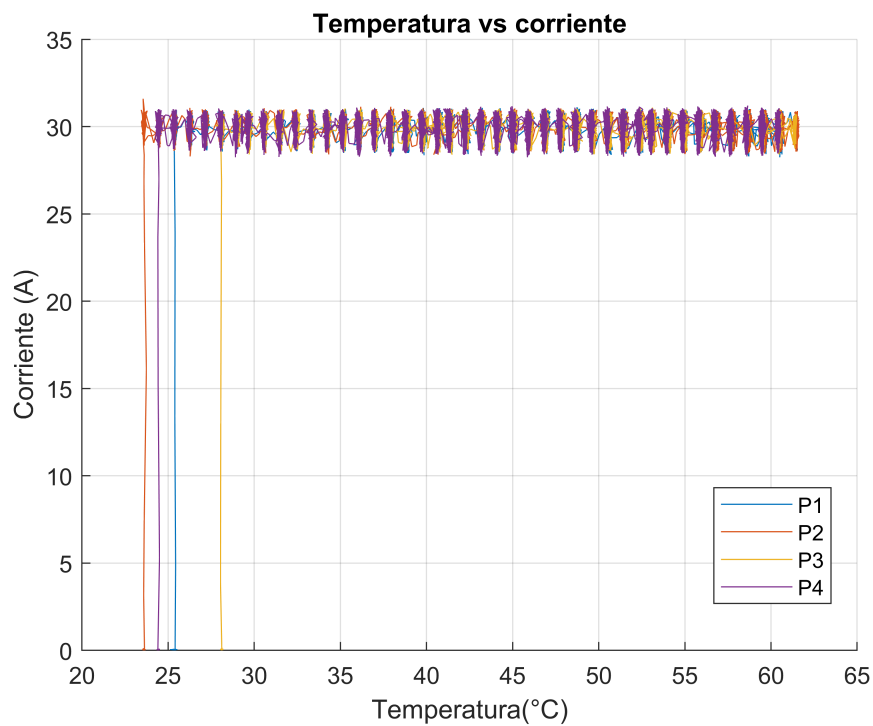


Figura 5.16: Temperatura vs Corriente (30 % KOH).

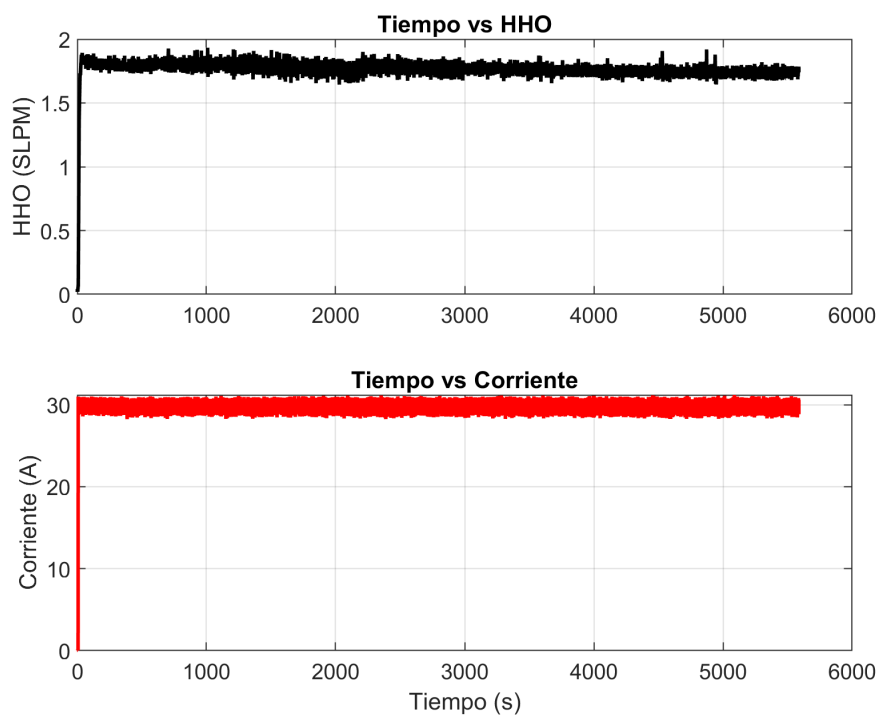


Figura 5.17: Dinámica de la corriente y la producción de HHO (30 % KOH).

En la gráfica Corriente vs HHO mostrada en la Figura 5.18 se observa una concentración de los datos en el intervalo aproximado de 29.5–31.5 A, donde la producción de HHO se mantiene mayormente entre 1.7–1.9 SLPM. Esto confirma que el sistema opera en un régimen prácticamente estacionario, coherente con lo mencionado anteriormente: a alta concentración de KOH, la conductividad del electrolito es elevada y la resistencia óhmica es baja, por lo que la corriente se estabiliza rápidamente y se mantiene casi constante.

Sin embargo, aunque la corriente presenta una variación muy pequeña (dispersión horizontal reducida), la producción de HHO presentó una ligera dispersión vertical. Esto indica que el caudal de gas no depende únicamente del valor instantáneo de la corriente, sino también de fenómenos interfaciales dinámicos. Tal como se explicó previamente, a densidades de corriente altas se intensifica la generación de burbujas en la superficie del electrodo.

La varianza de los datos, con base en la producción de HHO, fue de 0.0030 SLPM² y la desviación estándar de 0.0547 SLPM. Mientras que la varianza y la desviación estándar de la corriente fueron 0.2183 A² y 0.4672 A, respectivamente.

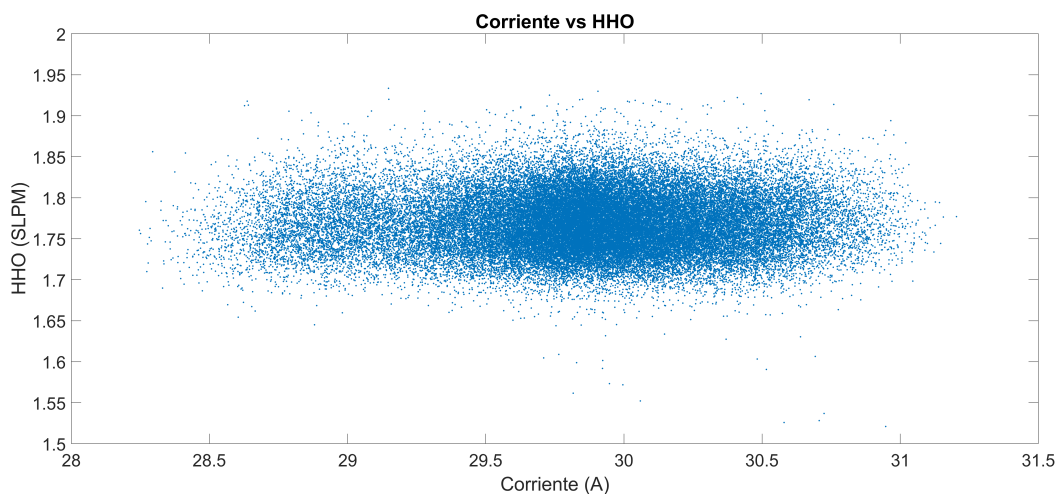


Figura 5.18: Producción de HHO vs corriente al 30 % en masa de KOH.

5.2.4. Datos generales de la producción de HHO a distintas concentraciones (10 %, 15 %, 30 %)

En la Tabla 5.1 se presentan los datos generales obtenidos en cada una de las pruebas realizadas para concentraciones de KOH del 10 %, 15 % y 30 % en masa, así como las pruebas 5 y 6 efectuadas para la concentración del 10 %. En términos generales, se observa que los mayores valores de producción de oxihidrógeno (HHO) se obtienen con una concentración del 15 %, alcanzando un valor máximo de 2.20 SLPM.

Se aprecia que, al incrementar la concentración de 10 % a 15 %, la producción de HHO aumenta, sin embargo, al elevarla hasta 30 % dicha producción disminuye, los valores obtenidos a esta concentración son cercanas a las pruebas adicionales.

Por otra parte, los valores promedio de producción de HHO obtenidos para la concentración de 30 % son inferiores a los registrados para las concentraciones de 15 % y 10 % (pruebas adicionales). Esto se debe a que, en las pruebas realizadas al 30 %, la producción de HHO disminuye conforme aumenta la temperatura del electrolito, lo que reduce el valor promedio calculado para toda la prueba. Sin embargo, al considerar únicamente el intervalo de temperatura comprendido entre 24 °C y 36 °C, donde la producción permanece prácticamente constante antes de iniciar su descenso (Figura 5.15), se obtienen valores promedio de 1.81, 1.821, 1.87 y 1.80 SLPM para las pruebas P1, P2, P3 y P4, respectivamente.

Por otra parte, el comportamiento de la corriente (I) eléctrica muestra que, a una concentración del 30 %, se obtienen valores promedio más elevados y una menor dispersión, lo que indica una mayor estabilidad en la operación del sistema. No obstante, este aumento en la corriente no se tradujo en una mayor producción de HHO, lo cual puede atribuirse a efectos asociados con la resistencia del electrolito o condiciones operativas del sistema como fugas.

Asimismo, el análisis de la varianza indica que la condición correspondiente al 15 % presenta una mayor variabilidad tanto en la producción de HHO como en la corriente debido a que hay un intervalo de operación más grande en comparación con las demás pruebas.

Tabla 5.1: *Resultados experimentales para diferentes concentraciones de KOH.*

Conc.	Prueba	Max HHO	Min HHO	Prom HHO	σ^2 HHO	σ HHO	Max I	Min I	Prom I	σ^2 I	σ I
10 %	1	1.4549	0.0505	1.380	0.0016	0.0398	30.80	19.84	28.31	0.6169	0.7854
10 %	2	1.4136	0.5078	1.340	0.0019	0.0435	30.21	22.98	27.80	1.1561	1.0752
10 %	3	1.3924	0.5628	1.300	0.0042	0.0647	29.45	21.10	27.11	1.9514	1.3969
10 %	4	1.4311	0.59	1.306	0.0099	0.099	30.5	20.66	27.25	4.251	2.0618
10 %	5	1.9845	0.0262	1.827	0.0276	0.1661	28.86	20.67	26.66	5.7011	2.3877
10 %	6	1.9792	0.0237	1.862	0.0165	0.1284	28.86	22.07	27.15	3.3910	1.8415
15 %	1	2.0500	0.50	1.880	0.0181	0.1346	29.80	21.08	26.68	3.6824	1.919
15 %	2	2.0800	0.062	1.960	0.0064	0.0800	29.92	23.34	27.38	1.6040	1.266
15 %	3	2.1170	0.0872	1.980	0.0168	0.1290	30.60	18.74	27.89	3.3200	1.820
15 %	4	2.2000	0.0931	1.790	0.0825	0.2873	30.09	17.46	25.33	13.990	3.740
30 %	1	1.9100	0.0431	1.730	0.0060	0.0773	31.11	13.39	29.87	0.1987	0.4458
30 %	2	1.9800	0.0361	1.760	0.0045	0.0672	31.60	16.12	29.86	0.1835	0.4280
30 %	3	1.9562	0.0540	1.780	0.0054	0.0736	31.09	26.85	29.87	0.1850	0.4300
30 %	4	1.9335	0.0522	1.770	0.0030	0.0547	31.20	23.66	29.86	0.2183	0.4670

5.3. Validación del modelo

Una vez caracterizado el modelo, se realizaron comparaciones con datos experimentales, como se muestra en la Figura 5.19.

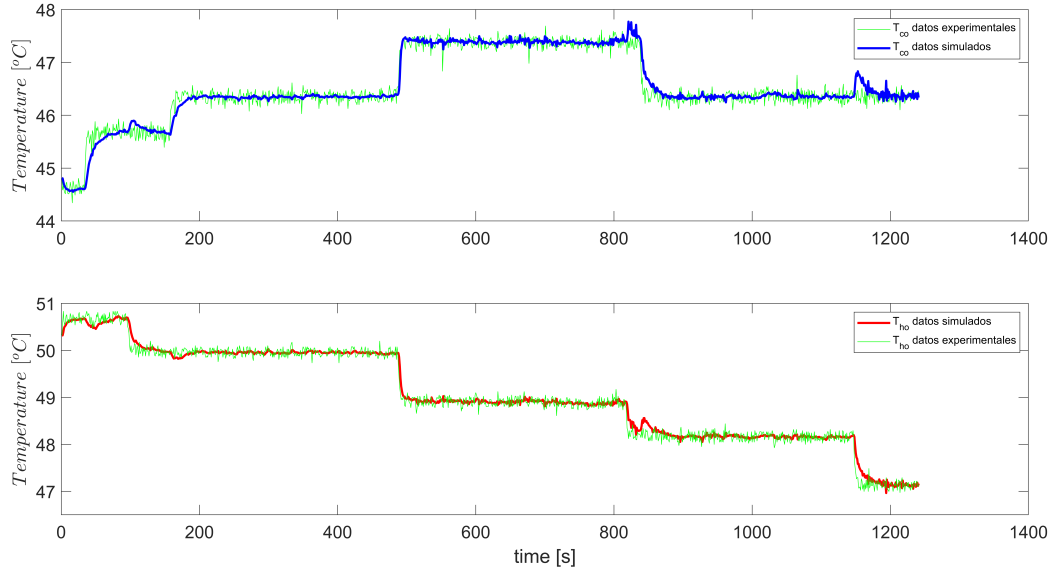


Figura 5.19: Simulación de temperaturas y comparación con datos experimentales.

Como se observa en la Figura 5.19, el modelo se aproxima a los datos experimentales con precisión; los errores medios absolutos para la temperatura de salida del agua de enfriamiento fueron de 0.1051 °C y para la temperatura de salida del electrolito fueron de 0.0878 °C. Y el error cuadrático medio fue de 0.0210 y 0.0138 para las temperaturas de salida del agua de enfriamiento y del electrolito, respectivamente.

Una vez validado el modelo de transferencia de calor para el enfriamiento del electrolito, se procedió con el diseño de la ley de control y su simulación para verificar su aplicabilidad en el proceso.

5.4. Sintonización PI

Para el control del flujo (lazo interno) se obtuvo experimentalmente una $K_c = 0.2$ y un $P_c = 2$ (Figura 5.20).

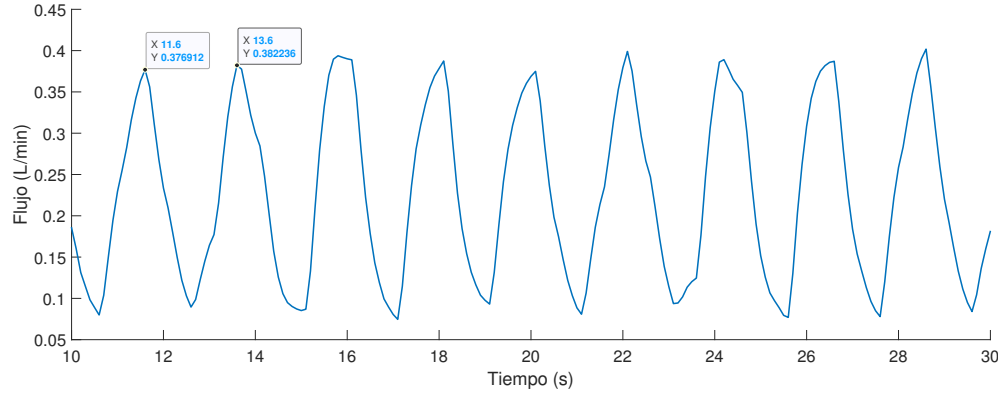


Figura 5.20: Oscilación sostenida experimental.

Se realizaron tres sintonizaciones del controlador (Tabla 5.2). La primera sintonización, basada en el método de Ziegler–Nichols, presentó un comportamiento estable, pero con una respuesta lenta (1450s) como se muestra en la Figura 5.21. En la segunda, al reducir las ganancias en un 50 %, se mantuvo la estabilidad y se mejoró el tiempo de respuesta, con un valor de alrededor de 1150 s (Figura 5.22). Finalmente, en la tercera sintonización (Figura 5.23) se ajustó el tiempo integral, logrando una respuesta más rápida sin sobretiros, con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 10 s.

Tabla 5.2: *Sintonización experimental*

Sintonización	K_p	τ_i
1	0.09	1.66
2	0.05	0.833
3	0.05	0.01

$$G_c(s) = 0.05 \left(1 + \frac{1}{0.01s} \right) \quad (5.1)$$

En la Figura 5.24 se muestra la respuesta de control ante distintos cambios de referencia.

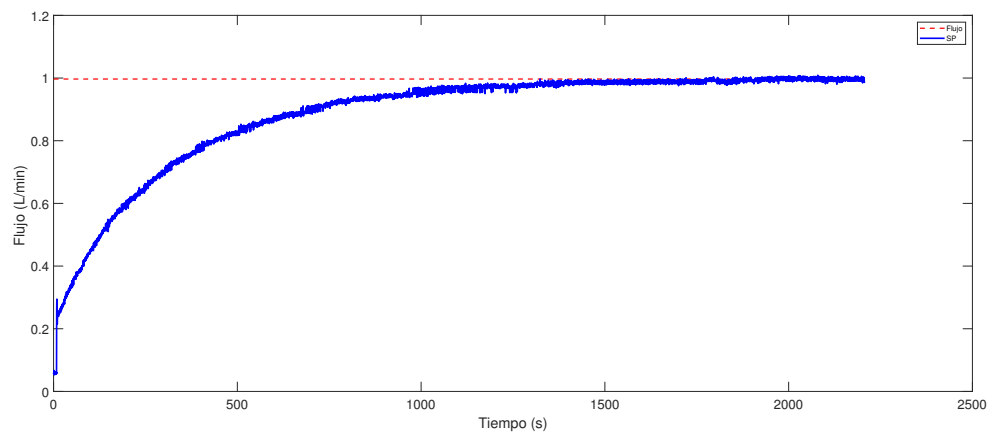


Figura 5.21: Primera sintonización.

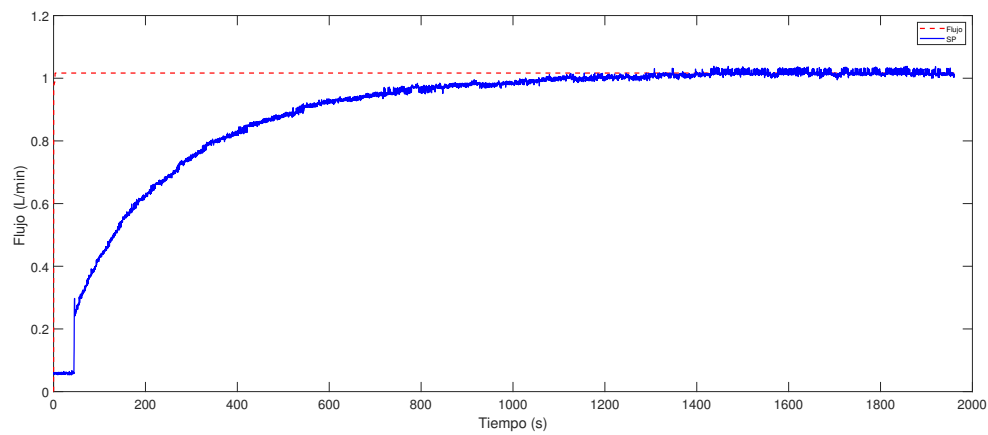


Figura 5.22: Segunda sintonización.

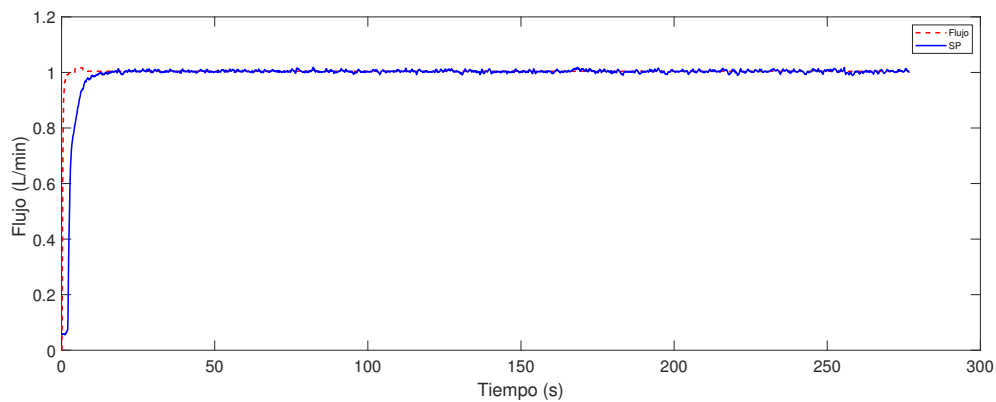


Figura 5.23: Tercera Sintonización.

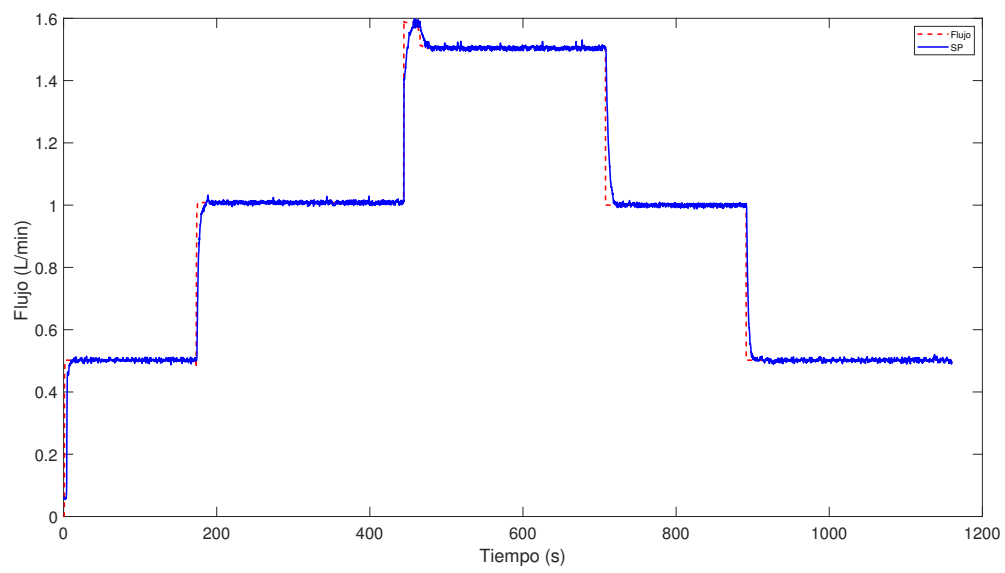


Figura 5.24: Respuesta al escalón, control PI.

5.5. Puntos de operación para la regulación de temperatura (Control en cascada)

A continuación, se presentan las respuestas del controlador en los distintos puntos de operación, definidos a partir de los resultados obtenidos en lazo abierto descritos en el *Apartado 5.2* para cada concentración.

5.5.1. Control de temperatura a una concentración del electrolito del 10 %

En esta sección se presentan los resultados de la regulación de la temperatura del electrolito en el electrolizador alcalino. De las pruebas realizadas en lazo abierto, se eligió un intervalo de temperatura entre 41 °C y 38 °C para el desarrollo de las pruebas en lazo cerrado, ya que se observó que son las temperaturas mínimas a las que se alcanza una producción estable de HHO. En la **Figura 5.25 (inciso a)** se muestra el control de la temperatura del electrolito en diferentes puntos de operación. El tiempo de muestreo fue de 10 muestras por segundo. Una vez que se pone en operación la ley de control, la temperatura tarda en llegar a la referencia aproximadamente 75 s. Una vez que el actuador ejerce la acción de control, la temperatura llega a la referencia de 41 °C, el error cuadrático medio calculado para este punto de operación sin considerar el transitorio fue de 0.3039. Una vez que se realizó en segundo cambio de referencia a 40 °C. En este punto de operación se observa que la regulación de la temperatura es adecuada, el error cuadrático medio (ECM) calculado para este punto de operación sin considerar el transitorio fue de 0.1664.

Finalmente, se realizó un último cambio de referencia a 38 °C; la acción de control se ejecutó sobre la variable controlada, el tiempo que tardó en llegar a la referencia fue de 84 s. El ECM en este punto de operación fue de 0.0170 °C.

La temperatura del agua de enfriamiento se mantuvo entre 33.5 °C y 36.5 °C, mostrando un comportamiento estable a partir de los 200 s. Es decir, no se presentan variaciones bruscas de temperatura, a diferencia de lo observado en los intervalos de 0 a 200 s y de 1570 a 1610 s, como se aprecia en el **inciso (b)** de la Figura 5.25.

Por otra parte, el **inciso (c)** muestra el esfuerzo de control de la variable manipulada, correspondiente al flujo de agua de enfriamiento. El actuador utilizado es una bomba de diafragma, la cual presentó un retardo en su respuesta. Sin embargo, una vez que entra en operación, el ajuste del flujo se realiza rápidamente. Este comportamiento se observa ante los cambios en la referencia de temperatura. En el segundo 228, al establecerse una referencia de

40 °C, el flujo incrementa hasta alcanzar el nuevo punto de operación, estabilizándose alrededor del segundo 437. De manera similar, cuando se realiza el cambio de referencia a 38 °C en el segundo 1108, el flujo comienza a incrementarse y, una vez que la temperatura alcanza el valor deseado, se observa una disminución del flujo en el segundo 1247, manteniendo un comportamiento más estable a partir de ese momento.

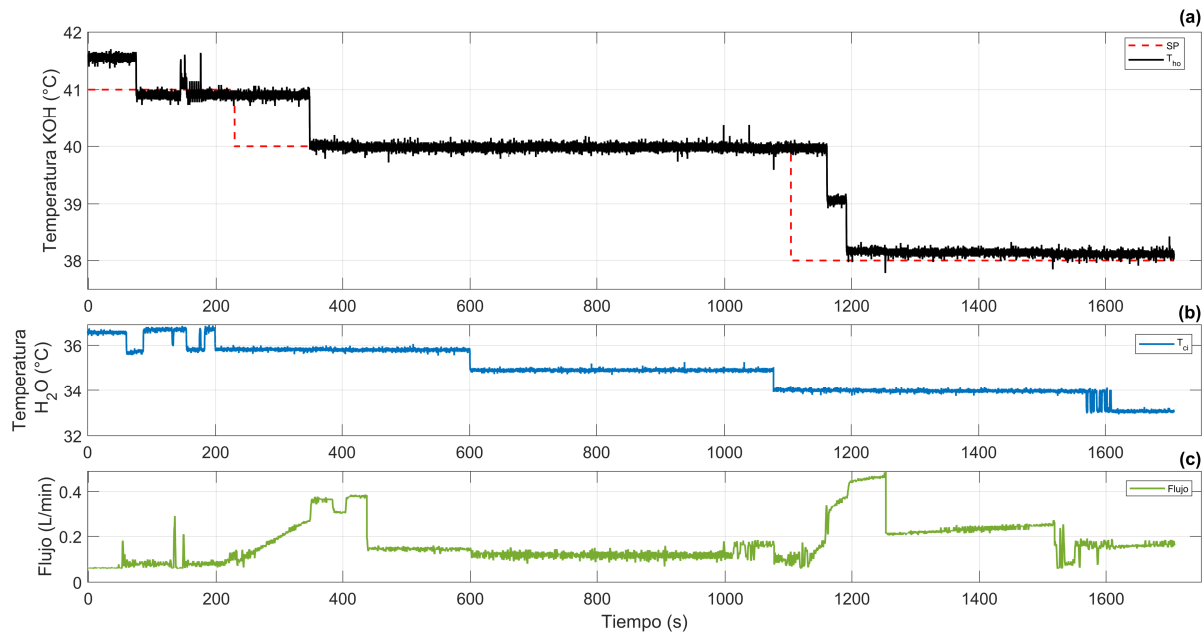


Figura 5.25: Concentración 10 % KOH- a) Control de temperatura del KOH, b) Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, b) Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, c) Esfuerzo de control.

La ganancia del controlador para la regulación de la temperatura a esta concentración fue $C = 0.003$, con un valor de la velocidad de adaptación de $q = 0.223$.

Se observa en la Figura 5.26 la producción de HHO en función de la temperatura en un intervalo de 37.5 °C a 42 °C. Se observa un mayor carga de datos en los tres puntos de operación del control de 38 °C, 40 °C y 41 °C, por otra parte, el de 39 °C y 41.5°C son los flujos de HHO en los transitorios.

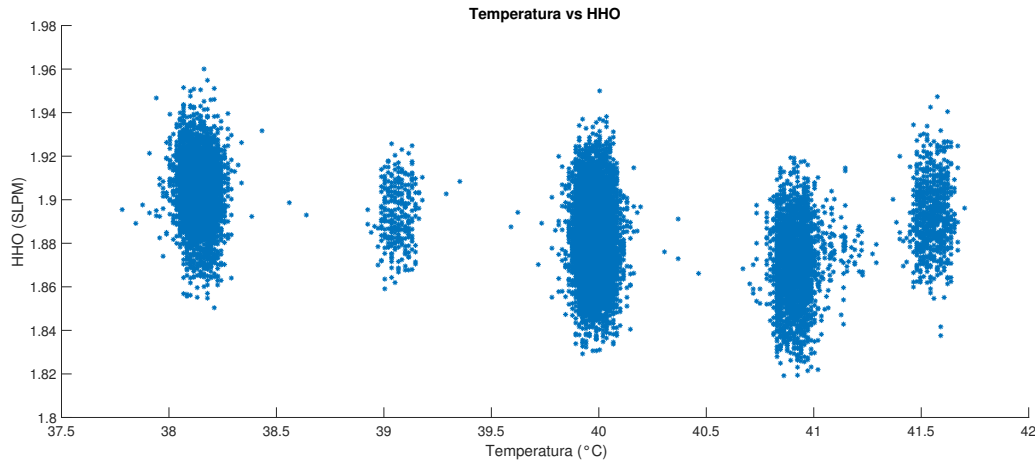


Figura 5.26: Producción de HHO en distintos puntos de operación (10 % KOH).

- A 38 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 1.8743 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0137$, $HHO_{max} = 1.96004$, $HHO_{min} = 1.8428$.
- A 40 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 2.0600 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0144$, $HHO_{max} = 1.9302$, $HHO_{min} = 1.8376$.
- A 41.0 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 1.7897 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0134$, $HHO_{max} = 1.9279$, $HHO_{min} = 1.8643$.
- A 41.5 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 2.9730 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0172$, $HHO_{max} = 1.9473$, $HHO_{min} = 1.8789$.

5.5.2. Control de temperatura a una concentración del electrolito del 15 %

Para esta concentración, la regulación de la temperatura del electrolito se realizó en los puntos de operación de 38 °C, 40 °C y 41 °C. Si bien en el *Apartado 5.2.2* se observó que tanto la corriente como la producción de HHO alcanzaban su estabilización alrededor de 44 °C y 34°C con una producción de 2.115 SLPM, sin embargo, a una temperatura de 38°C se obtuvieron valores cercanos a la producción máxima, por ende se decidió operar a temperaturas menores a 44 °C y mayores a 34 °C, además de tener un punto de comparación con la concentración al 10 %KOH.

Como se muestra en la **Figura 5.27** para llegar al primer punto de referencia de 38 °C tarda aproximadamente 107 segundos. El error cuadrático medio (ECM) calculado para este punto de operación, sin considerar el transitorio, fue de 0.2627. Para el segundo punto de operación, el tiempo transcurrido para alcanzar la referencia de 40 °C fue de 196 s y para el tercer punto de operación, de 41 °C, el tiempo fue de 220 s. El ECM que presenta el segundo y el tercer punto de operación es de 0.0093 y 0.0149, respectivamente.

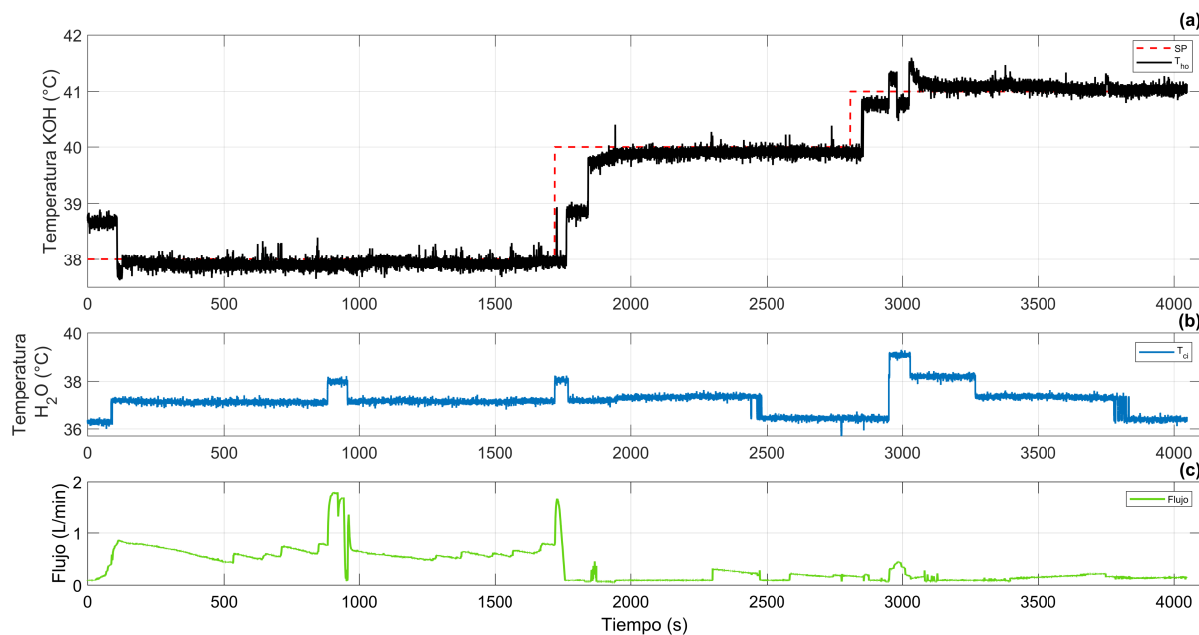


Figura 5.27: Concentración 15 % KOH- a) Control de temperatura del KOH, b) Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, b) Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, c) Esfuerzo de control.

En el **inciso (c)** de la misma figura se muestra el esfuerzo de control durante el experimento. Se observa que, conforme transcurre el tiempo, el flujo de agua de enfriamiento tiende

a disminuir gradualmente, operando en un intervalo aproximado de 1.8 L/min a 0.08 L/min. Asimismo, se identifican dos sobretiros de mayor magnitud en los segundos 907 y 1730, y uno menor alrededor del segundo 2982. Este comportamiento se atribuye a incrementos en la temperatura del agua de enfriamiento, como se aprecia en el **inciso (b)**. La temperatura del agua de enfriamiento durante el experimento se mantuvo entre 36 °C y 39 °C. La ganancia del controlador para la regulación de la temperatura a esta concentración fue $C = 0.01$ y la velocidad de adaptación fue $q = 0.223$.

En la Figura 5.28 se presenta la producción de HHO en función de la temperatura, en un intervalo de 37.5 °C a 42 °C. Se observa una mayor concentración de datos en los tres puntos de operación del sistema de control, así como en valores intermedios cercanos a las referencias, tales como 38.5 °C, 39.5 °C y 41.5 °C.

- A 38 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 0.0019$, $HHO_{Std} = 0.0439$, $HHO_{max} = 2.0973$, $HHO_{min} = 1.9055$.
- A 40 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 1.5418 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0124$, $HHO_{max} = 2.0019$, $HHO_{min} = 1.9183$.
- A 41.0 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 1.6619 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0129$, $HHO_{max} = 2.0777$, $HHO_{min} = 1.9300$.

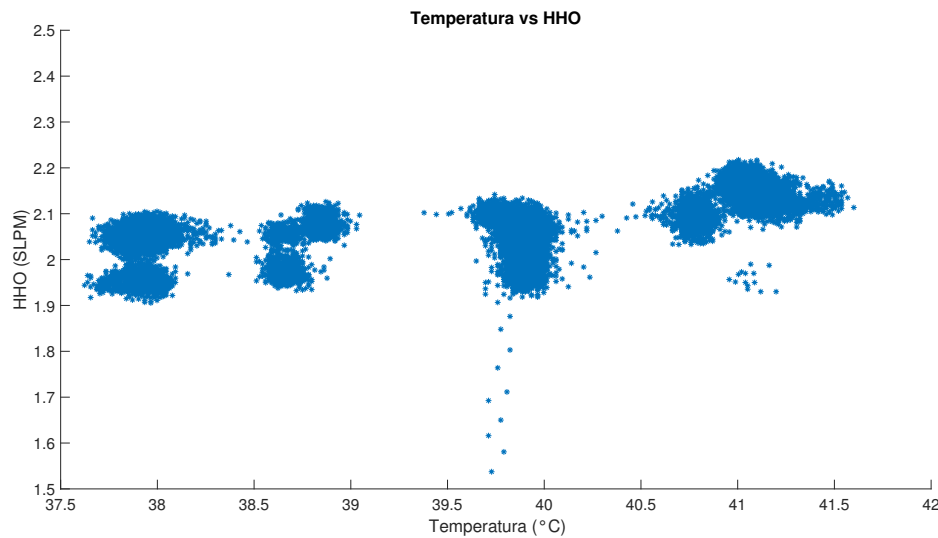


Figura 5.28: Producción de HHO en distintos puntos de operación (15 % KOH).

5.5.3. Control de temperatura a una concentración del electrolito del 30 %

En esta sección se presentan los resultados obtenidos sobre la regulación de la temperatura del electrolito en el electrolizador alcalino. De las pruebas realizadas en lazo abierto se eligió un intervalo de temperatura entre 36 °C y 29 °C para operar el sistema en lazo cerrado, como se muestra en la Figura 5.29, **inciso (a)**) debido a que se observó que, al regular a menores temperaturas en comparación con las concentraciones de 15 % y 10 % se obtiene la mayor producción de HHO.

El tiempo de muestreo fue de 10 muestras por segundo. Una vez que se pone en operación la ley de control, la temperatura tarda en llegar a cada referencia (36 °C, 34 °C, 32 °C, 29 °C) aproximadamente entre 90 s y 100 s cuando se realiza un cambio de ésta. Los ECMs de los cuatro puntos de operación fueron 2.0943, 0.5388, 0.1066 y 0.0030, respectivamente.

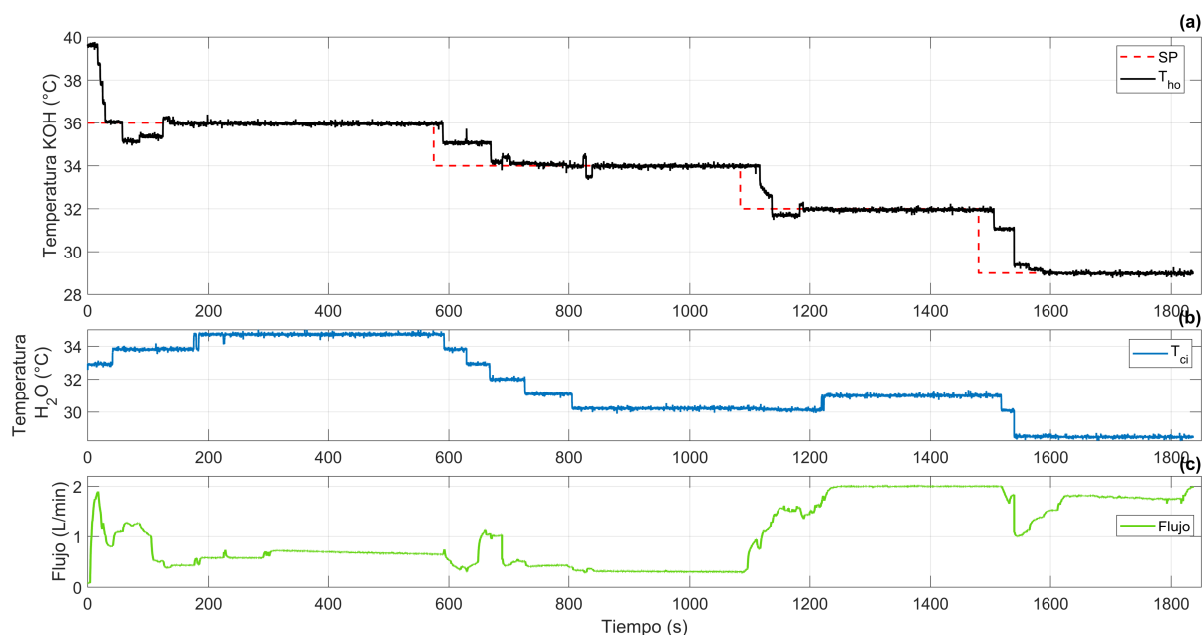


Figura 5.29: Concentración 30 % KOH- a) Control de temperatura del KOH, b) Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, b) Temperatura de entrada del agua de enfriamiento, c) Esfuerzo de control.

En el **inciso (c)** de la misma figura se muestra el esfuerzo de control a lo largo del experimento. Se observa que, ante cambios en la referencia, el flujo de agua de enfriamiento puede aumentar o disminuir; sin embargo, esta respuesta no depende únicamente del cambio de temperatura del electrolito deseado, sino también de la temperatura del agua de enfriamiento. Por ejemplo, al cambiar la referencia de 36 °C a 34 °C (segundo 584), se esperaría

un aumento en el esfuerzo de control; no obstante, este disminuye debido a que la temperatura del agua de enfriamiento también desciende, favoreciendo así el enfriamiento hasta estabilizarse alrededor del segundo 800 (**inciso (b)**), tiempo en el que también el esfuerzo de control se estabiliza.

La ganancia del controlador para la regulación de la temperatura a esta concentración fue $C=0.02$, con una velocidad de adaptación $q=0.223$.

En la Figura 5.30 se muestra la producción de HHO en función de la temperatura. Se observa una mayor concentración de datos en los puntos de operación del sistema, mientras que el resto corresponde a las etapas transitorias. En cuanto al comportamiento del proceso, se identificó que la producción de HHO disminuye conforme aumenta la temperatura dentro del rango analizado. En este sentido, la mayor producción de HHO se obtuvo en el punto de operación de menor temperatura, que corresponde a 29 °C.

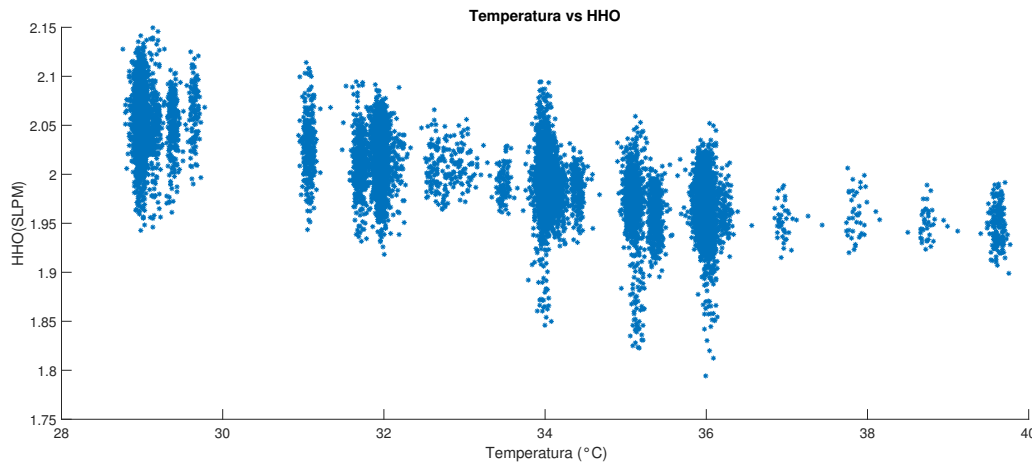


Figura 5.30: Producción de HHO en distintos puntos de operación (30 % KOH).

- A 36 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 0.0015$, $HHO_{Std} = 0.0384$, $HHO_{max} = 2.0520$, $HHO_{min} = 1.7942$.
- A 34 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 0.0011$, $HHO_{Std} = 0.0338$, $HHO_{max} = 2.0158$, $HHO_{min} = 1.8227$.
- A 32 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 3.3624 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0183$, $HHO_{max} = 2.0117$, $HHO_{min} = 1.9141$.

- A 29 °C, los resultados de la varianza, desviación estándar, máximo y mínimo de producción de HHO son los siguientes: $HHO_{Var} = 4.5825 \times 10^{-4}$, $HHO_{Std} = 0.0214$, $HHO_{max} = 2.0303$, $HHO_{min} = 1.8952$.

5.5.4. Eficiencia de Faraday

En la Tabla 5.3 se presenta la eficiencia de Faraday obtenida para cada punto de operación evaluado en las concentraciones de electrolito de 10, 15 y 30 % m/m. Los resultados muestran que la eficiencia se mantuvo elevada en todos los casos, con valores comprendidos entre 96.16 % y 99.48 %. Para la concentración de 10 % m/m, la eficiencia aumentó ligeramente al disminuir la temperatura de referencia de 41 °C a 38 °C, alcanzando un valor máximo de 97.58 %. En la concentración de 15 % m/m se registraron las mayores eficiencias del estudio, con valores cercanos al 99 % y un máximo de 99.48 % a 41 °C. Por su parte, para la concentración de 30 % m/m la eficiencia presentó una tendencia creciente conforme disminuyó la temperatura, alcanzando 99.19 % a 29 °C. Por otra parte, se observó una pequeña diferencia entre el volumen teórico y la producción experimental de HHO, lo que indica que el electrolizador operó con una elevada eficiencia faradaica en las condiciones evaluadas, es decir, que el proceso fue altamente eficiente desde el punto de vista electroquímico, al convertir la energía eléctrica suministrada en productos de electrólisis.

Tabla 5.3: *Eficiencia de Faraday para los diferentes puntos de operación y concentraciones de KOH.*

Concentración (% m/m)	Temperatura (°C)	I_{prom} (A)	Producción de HHO (SLPM)	Volumen teórico (SLPM)	Eficiencia de Faraday (%)
10	41	27.9262	1.8628	1.9349	96.2708
10	40	27.9302	1.8666	1.9352	96.4568
10	38	28.2154	1.9077	1.9550	97.5803
15	41	27.4768	1.9300	1.9400	99.4820
15	40	26.2194	1.9183	1.9400	98.8766
15	38	26.8286	1.9055	1.9400	98.2170
30	36	29.9000	1.9679	2.0466	96.1570
30	34	29.9140	1.9984	2.0480	97.5796
30	32	29.9133	2.0200	2.0479	98.6352
30	29	29.8938	2.0300	2.0466	99.1895

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Instrumentación del sistema

- Los datos obtenidos de la caracterización de la bomba del electrolito presentaron un comportamiento lineal entre el voltaje de alimentación y el flujo, lo que permitió estimar el flujo mediante una función de ajuste.
- El intercambiador de calor mostró alta eficiencia térmica, logrando una reducción de la temperatura de 27 °C a 30 °C respecto a la temperatura máxima alcanzada por el proceso sin control de temperatura.
- Al emplear dos tarjetas Arduino, una para la medición de temperatura y otra para el flujo, se evitaron los conflictos de temporización entre el protocolo One-Wire de los sensores de temperatura y la lectura de los pulsos del sensor de flujo mediante la rutina de interrupciones del microcontrolador. Esta configuración permitió obtener mediciones precisas de ambas variables.
- El emplear señales PWM y un filtro RC como método de conversión digital-analógico, resultó adecuado para comunicar los sensores digitales adquiridos mediante un microcontrolador y las entradas analógicas de la tarjeta myRIO
- Con la implementación de la interfaz gráfica en LabVIEW se logró integrar eficazmente el procesamiento de las señales del sistema de electrolisis. Facilitando la visualización y el almacenamiento de datos en tiempo real, así como la ejecución de estrategias de control.

6.2. Producción de HHO

- Los resultados de producción de HHO en lazo abierto para concentraciones de KOH del 10 %, 15 % y 30 % en masa mostraron valores máximos de flujo de gas de 1.4311 SLPM, 2.115 SLPM y 1.98 SLPM, respectivamente. No obstante, en las pruebas adicionales realizadas con una concentración del 10 % se observó un incremento en la producción de HHO, alcanzando valores máximos de producción de ≈ 1.98 SLPM; sin embargo, tanto la producción de gas como la corriente alcanzaron el estado estable en los mismos puntos de operación que en las pruebas iniciales.
- La producción de HHO, así como la corriente, alcanzaron el estado estacionario, aproximadamente entre 38 °C y 44 °C para las concentraciones de 10 % y 15 %, respectivamente. Mientras que, para una concentración del 30 %, el sistema alcanzó el estado estacionario desde el inicio del experimento. En cuanto a la corriente, el sistema operó en rangos de 22-28 A con concentración del 10 %, de 19-30 A con concentración del 15 %, y alrededor de 30 A con concentración del 30 %.
- Se analizó el efecto de la temperatura en distintas concentraciones, a corriente variable y midiendo la producción de HHO. Se comprobó que la producción de HHO es directamente proporcional a la corriente eléctrica por la dinámica que se presenta durante el experimento.
- Se observó que, a concentraciones de 10 % y 15 %, durante el régimen transitorio la conductividad del electrolito es menor que en estado estacionario, por lo que la corriente suministrada y la producción de HHO también son menores. Una vez alcanzada una temperatura estacionaria, la producción de HHO tiende a estabilizarse junto con la corriente suministrada.
- Asimismo, se identificó que la temperatura no incrementa directamente la producción de gas, sin embargo, influye indirectamente al modificar la conductividad del electrolito. A bajas temperaturas, la movilidad iónica disminuye, incrementando la resistencia interna y limitando la corriente que consume el electrolizador, dado un voltaje fijo en la fuente de alimentación. Conforme la temperatura aumenta, la conductividad mejora, permitiendo alcanzar mayores niveles de corriente y, en consecuencia, una mayor producción de HHO. Por otra parte, se identificó que al aumentar la concentración, también mejora la conductividad y por ende el paso de la corriente como se observó a una concentración del 30 %.

- Al aumentar la temperatura, la corriente y la producción de HHO incrementan. Sin embargo, a una concentración de 30 % la producción de HHO disminuye con la temperatura, aunque la corriente permanece constante. Por tal motivo, a altas concentraciones, es necesario operar el electrolizador a temperaturas más bajas.
- El tiempo que se tomó en llegar al estado estacionario de la corriente y la producción de HHO fue de aproximadamente 1800 s, 3000 s y 1 s para las concentraciones de 10 %, 15 % y 30 %, respectivamente.

6.3. Validación del modelo y control

- El modelo presentó alta precisión, con errores absolutos medios de 0.1051 °C (agua de enfriamiento) y 0.0878 °C (electrolito), y errores cuadráticos medios de 0.0210 °C y 0.0138 °C. Confirmando su validez para el diseño de un control de temperatura para un sistema electrolítico.
- La operación en lazo cerrado permitió obtener mayores valores promedio de producción de HHO que en lazo abierto para las tres concentraciones de KOH, siendo la diferencia más notable en la concentración del 30 %. Esto se debe a que el controlador mantiene más tiempo al sistema operando cerca del punto de referencia, compensando la disminución de la producción observada en lazo abierto conforme cambian las condiciones de operación, lo que incrementa el promedio de HHO producido. Otra de las posibles causas puede ser que durante el experimento en lazo abierto surgieran pérdidas experimentales (fugas o cambios en las condiciones de medición).
- A una concentración del 10 % de KOH, el intervalo de la varianza de la variable controlada está comprendido entre 0.00017 °C² y 0.0002 °C².
- A una concentración del 15 % de KOH, el intervalo de la varianza de la variable controlada estuvo entre 0.000154 °C² y 0.002 °C².
- A una concentración del 30 % de KOH, el intervalo de la varianza de la variable controlada estuvo entre 0.00045 °C² y 0.0015 °C². Aunque las magnitudes de las varianzas son cercanas, la concentración de 15 % KOH presentó la mayor dispersión de los datos.
- El control cumplió su función de adaptación a pesar de las incertidumbres paramétricas y de diseño, así como de las perturbaciones exógenas que influyen en el sistema,

como el cambio de temperatura debido a la temperatura ambiente y al coeficiente de transferencia.

- La estrategia de control adaptable permitió controlar adecuadamente la temperatura del electrolito sin necesidad de reparametrizar nuevamente el modelo ante las variaciones de los parámetros del sistema dependientes de la temperatura y la concentración, tales como la densidad, la viscosidad, la capacidad calorífica y la conductividad.
- Los resultados de eficiencia de Faraday, comprendidos entre 96.16 % y 99.48 %, indican que la mayor parte de la carga eléctrica suministrada fue utilizada en la producción de HHO. La cercanía de los valores al 100 % demuestra que la producción experimental fue muy similar a la predicha por la ley de Faraday, evidenciando un buen desempeño electroquímico del sistema.

Trabajos futuros

- Analizar el comportamiento del sistema de electrólisis una vez alcanzado el estado estacionario de la corriente y de la producción de HHO, evaluando si, al disminuir la temperatura del electrolito, es posible mantener la misma producción de gas o si existen variaciones asociadas a cambios en la conductividad y la movilidad iónica del electrolito.
- Evaluar concentraciones de KOH superiores al 30 % en masa, utilizando una fuente de alimentación de mayor capacidad de corriente, con el objetivo de determinar si es posible incrementar la producción de HHO y mejorar el desempeño del electrolizador.
- Comparar el desempeño de la estrategia de control en cascada implementada con otras técnicas de control avanzadas.
- Evaluar distintos actuadores de flujo de menor tamaño y mayor precisión para el sistema de enfriamiento, buscando mejorar la regulación térmica.
- Profundizar en el análisis de las configuraciones del electrolizador alcalino, ya que durante el desarrollo del estado del arte se identificó que parámetros como la geometría de los electrodos, separación entre las placas, configuración hidráulica y la distribución del flujo pueden influir significativamente en la producción de HHO y en la eficiencia energética del sistema.

Bibliografía

- [1] Ryan J Gilliam, JW Graydon, DW Kirk, and SJ Thorpe. A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3):359–364, 2007.
- [2] P Ajay Goud and Mohammad Sikindar Baba. Optimizing diesel engines with oxyhydrogen dual fuel: Enhancing performance with green methyl ester using mcdm techniques. *Heat Transfer*, 54(1):670–693, 2025.
- [3] Erick Daniel Rincón Castrillo, José Ricardo Bermúdez Santaella, Mamdouh El Haj Assad, Ali Khosravi, and Juan José García Pabón. Modeling and validation of a comercial dry electrolytic cell for the production of oxyhydrogen. In *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [4] Osama Majeed Butt, Muhammad Shakeel Ahmad, Hang Seng Che, and Nasrudin Abd Rahim. Usage of on-demand oxyhydrogen gas as clean/renewable fuel for combustion applications: A review. *International Journal of Green Energy*, 18(13):1405–1429, 2021.
- [5] VN Kuleshov, NV Kuleshov, SA Dovbysh, SV Kurochkin, and Yu A Slavnov. High-pressure alkaline water electrolyzer for renewable energy storage systems. In *2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [6] Mrinmoy Kumar Sarmah, Tej Pratap Singh, Pankaj Kalita, and Anupam Dewan. Sustainable hydrogen generation and storage—a review. *RSC advances*, 13(36):25253–25275, 2023.
- [7] María del Carmen Clemente Jul, Mónica Sánchez Delgado, and Lourdes Rodríguez Mayor. Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. In *Anales de la Real Academia de Doctores*, volume 3, pages 19–36. Real Academia de Doctores de España, 2018.

- [8] Ruomei Qi, Jiarong Li, Jin Lin, Yonghua Song, Jiepeng Wang, Qiangqiang Cui, Yiwei Qiu, Ming Tang, and Jian Wang. Thermal modeling and controller design of an alkaline electrolysis system under dynamic operating conditions. *Applied Energy*, 332:120551, 2023.
- [9] Georgios Sakas, Alejandro Ibáñez-Rioja, Vesa Ruuskanen, Antti Kosonen, Jero Ahola, and Olli Bergmann. Dynamic energy and mass balance model for an industrial alkaline water electrolyzer plant process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(7):4328–4345, 2022.
- [10] Samuel Essuman. Experimental studies of the effect of electrolyte strength, voltage and time on the production of brown’s (hho) gas using oxyhydrogen generator. *Open Journal of Energy Efficiency*, 2019.
- [11] Fernando Valenciaga, Sebastián Nuñez, Fernando Ariel Inthamoussou, and Hernán De Battista. Un modelo térmico orientado al control de un electrolizador alcalino. In *VII Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 25 al 27 de abril de 2023)*, 2023.
- [12] Ahmed M Mousa, Hassan AA Sayed, Khaled AM Ali, Nabil S Elkaoud, and Wael AE Mahmoud. Energy-conversion efficiency for producing oxy-hydrogen gas using a simple generator based on water electrolysis. *Scientific Reports*, 14(1):25312, 2024.
- [13] M Hassen Sellami and K Loudiyi. Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70:1331–1335, 2017.
- [14] Dohyung Jang, Wonjae Choi, Hyun-Seok Cho, Won Chul Cho, Chang Hee Kim, and Sanggyu Kang. Numerical modeling and analysis of the temperature effect on the performance of an alkaline water electrolysis system. *Journal of Power Sources*, 506: 230106, 2021.
- [15] Cervantes Bobadilla Marisol. Producción de hidrógeno sobre demanda para adición, como aditivo en motores de combustión interna.
- [16] Salinas Cortés Víctor Miguel. Diseño y control de un electrolizador alcalino para la producción de oxihidrógeno.
- [17] Alfredo Ursua, Luis M Gandia, and Pablo Sanchis. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2):410–426, 2011.

- [18] MA El Kady, Ahmed El Fatih Farrag, MS Gad, AK El Soly, and HM Abu Hashish. Parametric study and experimental investigation of hydroxy (hho) production using dry cell. *Fuel*, 282:118825, 2020.
- [19] Anto Belvin Vethamony and Venugopal Thangavel. Experiments on the effect of temperature on hho production by alkaline water electrolysis. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [20] Nicola Cantisani, Josefine Dovits, and John Bagterp Jørgensen. Dynamic modeling of an alkaline electrolyzer plant for process simulation and optimization. *arXiv preprint arXiv:2311.09882*, 2023.
- [21] S Shiva Kumar and Hankwon Lim. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy reports*, 8:13793–13813, 2022.
- [22] Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Ranero González, Eddy Pérez Sánchez, Norlem Liaño Abascal, and Cosette Gastamiza Sicilia. Diseño térmico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de metanol. *Nexo Revista Científica*, 33(2):753–776, 2020.
- [23] Maximilian Schalenbach, Aleksandar R Zeradjanin, Olga Kasian, Serhiy Cherevko, and Karl JJ Mayrhofer. A perspective on low-temperature water electrolysis—challenges in alkaline and acidic technology. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(2): 1173–1226, 2018.
- [24] Jesús Rodríguez and Ernesto Amores. Cfd modeling and experimental validation of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production. *Processes*, 8(12):1634, 2020.
- [25] Harun Tuysuz. Alkaline water electrolysis for green hydrogen production. *Accounts of Chemical Research*, 57(4):558–567, 2024.
- [26] Filipe Araújo, Rui Costa Neto, and Ana S Moita. Alkaline water electrolysis: Ultrasonic field and hydrogen bubble formation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 78: 594–603, 2024.
- [27] Francisco A Jiménez Becerra, Francisco Oviedo Tolentino, Marcos Loredo Tovas, Miguel A Gallegos Guerrero, and Raúl I Hernández Molinar. Estudio experimental de la producción de hidrógeno en una celda electrolítica alcalina. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 1(1):560–573, 2022.

- [28] Omar A Aguirre, Carlos Ocampo-Martinez, and Oscar Camacho. Control strategies for alkaline water electrolyzers: A survey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 86: 1195–1213, 2024.
- [29] Jorge Uribe, Edison Santillan, Oscar Camacho, Carlos Ocampo-Martinez, and Omar Aguirre. Sliding mode control approach for h2 purity regulation in high-pressure alkaline electrolyzers. *IFAC-PapersOnLine*, 58(7):424–429, 2024.
- [30] Mostafaali Ayubirad, Madiha Akbar, and Hamid R Ossareh. Modeling and constraint-aware control of pressure dynamics in water electrolysis systems. *IFAC-PapersOnLine*, 59(30):982–987, 2025.
- [31] Benjamin Flamm, Christian Peter, Felix N Büchi, and John Lygeros. Electrolyzer modeling and real-time control for optimized production of hydrogen gas. *Applied Energy*, 281:116031, 2021.
- [32] SN Saranya, VM Sivakumar, M Thirumarimurugan, and GC Sowparnika. Modeling and control of plate type heat exchangers using pi and pid controllers. In *2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, pages 439–443. IEEE, 2017.
- [33] Emil Hernández-Arroyo, Jorge Luis Díaz-Rodríguez, and Omar Pinzón-Ardila. Estudio del comportamiento de un control mpc [control predictivo basado en el modelo] comparado con un control pid en una planta de temperatura. *Revista Facultad de Ingeniería*, 23(37):45–54, 2014.
- [34] Çağlar Conker. A novel fuzzy logic based safe operation oriented control technique for driving hho dry cell systems based on pwm duty cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20):9718–9725, 2019.
- [35] JC Rodríguez-Cerda, M Adam-Medina, VM Alvarado-Martínez, LG Vela-Valdés, and RF Escobar-Jiménez. Estimación robusta mediante el enfoque multi-modelos takagi-sugeno: Aplicado a un intercambiador de calor.
- [36] Hector Bastida, Carlos E Ugalde-Loo, Muditha Abeysekera, and Meysam Qadrdan. Dynamic modeling and control of a plate heat exchanger. In *2017 IEEE conference on energy internet and energy system integration (EI2)*, pages 1–6. IEEE, 2017.

- [37] Eric Fabrega, Bruno Rendé Huertas, and Martín David. Desarrollo de un modelo de funcionamiento de electrolizadores alcalinos autopresurizados, para la optimización de su sistema de control. *Buenos Aires*, 2020.
- [38] Gustavo Alonso Salazar Marreros and Wilmer Alexande Solis Montesinos. Desarrollo de un sistema de control automático del proceso de obtención de hho a través de la electrólisis del agua. 2022.
- [39] Øystein Ulleberg. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International journal of hydrogen energy*, 28(1):21–33, 2003.
- [40] María Candelaria Arpajou, Miguel Mussati, and Diego Oliva. Optimización basada en modelos de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, (15), 2022.
- [41] Pengcheng Zhao, Jingang Wang, Wei He, Liming Sun, and Yun Li. Alkaline zero gap bipolar water electrolyzer for hydrogen production with independent fluid path. *Energy Reports*, 9:352–360, 2023.
- [42] AK El Soly, MA El Kady, Ahmed El Fatih Farrag, and MS Gad. Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (hho) production rate using dry and wet cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(24):12639–12653, 2021.
- [43] Jian Zhang, Zhenwu Bie, and Huayong Zhang. Faraday efficiency study of pressurized alkaline water electrolyzer. In *Electrochemical Society Meeting Abstracts 243*, number 36, pages 1966–1966. The Electrochemical Society, Inc., 2023.
- [44] Lucía Navarro López. Producción de hidrógeno a partir de energía eléctrica: Electrolizadores de alta y baja temperatura. 2024.
- [45] Marco Rosero Espín, Humberto González, Patricia Ochoa, Magdalena Díaz, Edward Jiménez, Cristina Castillo, Diego Chulde, and Ullrich Stahl. Producción de oxihidrógeno como alternativa energética. *Revista Perspectivas*, 3(2):62–67, 2021.
- [46] Roza Puspita Wibowo. Comparative design analysis of dry-cell vs wet-cell hho (brown’s gas) generators. In *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Engineering (ICAE 2025)*, page 397. Springer Nature, 2025.
- [47] Balaji Subramanian and Saleel Ismail. Production and use of hho gas in ic engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(14):7140–7154, 2018.

- [48] Nelson Andrés Trujillo Mejía. Aplicación del espectro de frecuencia en el estudio y análisis de la respuesta dinámica de un intercambiador de calor con variaciones en sus condiciones de operación: análisis, simulación y validación de la respuesta dinámica del intercambiador de calor con variación de la presión. 2024.
- [49] Michal Fratzczak, Pawel Nowak, Jacek Cieczot, and Mieczyslaw Metzger. Simplified dynamical input–output modeling of plate heat exchangers—case study. *Applied Thermal Engineering*, 98:880–893, 2016.
- [50] Ivan Newen Aquigeh, Merlin Zacharie Ayissi, and Dieudonné Bitondo. Multiphysical models for hydrogen production using naoh and stainless steel electrodes in alkaline electrolysis cell. *Journal of Combustion*, 2021(1):6673494, 2021.
- [51] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Pearson educación, 2003.
- [52] Karl J Astrom and Björn Wittenmark. A survey of adaptive control applications. In *Proceedings of 1995 34th IEEE conference on decision and control*, volume 1, pages 649–654. IEEE, 1995.
- [53] Miguel E Peña. Control adaptable. *Universidad Nacional de San Juan, Argentina*.
- [54] Rui Yan, Haizhou Li, Zhao Yang Dong, and Huajin Tang. Nonlinear control approaches for si engine model with uncertainties. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, pages 5440–5445. IEEE, 2009.
- [55] Lavretsky Eugene, Wise Kevin, and D Howe. Robust and adaptive control with aerospace applications. *England: Springer-Verlag London*, 2013.
- [56] Krishna Murthy Busam, Sai Pushpitha Vudata, Wenyuan Li, and Fernando V Lima. Macro-level electrochemical modeling strategies of low-temperature and high-temperature electrolyzers for hydrogen production: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(23):11129–11152, 2025.
- [57] Vladimir M Nikolić, Katarina M Dimić-Mišić, Slađana Lj Maslovara, Dejana P Popović, Mihajlo N Gigov, Sanja S Krstić, and Milica P Marčeta Kaninski. Advances in alkaline water electrolysis—the role of in situ ionic activation in green hydrogen production. *Catalysts*, 16(1):98, 2026.

- [58] Ricardo Pinto, Miguel Oliveira, and Amadeu Borges. An experimentally validated model of electrolyte effects in alkaline water electrolysis. *Scientific Reports*, 15(1):41865, 2025.
- [59] Nian Xu, Bingbing Qiu, Zucun Rui, Tianxiang Ji, Zilong Liu, and Huaqiang Chu. Effect of heat and bubble mass transfer on the efficiency of alkaline electrolysis hydrogen production. *Nano Research*, 17(11):9345–9370, 2024.

Apéndice A

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
c_l	Capacidad térmica del electrolito
V_{stack}	Volumen del electrolito
T_{stack}	Temperatura del electrolito a la salida de la celda
T_{prec}	Temperatura del electrolito a la entrada de la celda
T_{amb}	Temperatura ambiente
Q_{el}	Pérdida de potencia eléctrica electrólisis
q	Caudal de cada uno de los circuitos
ρ	Densidad del electrolito
h_{stack}	Constante de transmisión térmica de los materiales de la celda
A_{stack}	Área externa de la celda
σ	Constante de Boltzmann
ε_{stack}	Coefficiente de ponderación de radiación de la celda con respecto al cuerpo negro
τ_{stack}	Retardo
Q_{rem}	Calor removido
k	Constante de transmisión
A_{int}	Área interna efectiva de intercambio térmico
ΔT	Media térmica logarítmica
T_{st}	Temperatura del líquido refrigerante a la entrada
$T_{H_2O,int}$	Temperatura del líquido refrigerante a la salida
V_{int}	Volumen del electrolito
R_{int_eq}	Resistividad térmica
T_{co}, T_{ho}	Temperaturas de salida del fluido frío y caliente, respectivamente
T_{ci}, T_{hi}	Temperaturas de entrada del fluido frío y caliente, respectivamente
v_c, v_h	Flujo volumétrico de fluido frío y caliente, respectivamente, en m ³ /s
U	Coefficiente de transferencia de calor, W/m ² -°C
C_p	Calor específico