



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño de un convertidor electrónico de potencia
para generar gas hidrógeno sobre demanda.**

Presentada por
Ing. Gabriel Cervantes Mejia

Como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis
Dr. Jarniel García Morales

Codirectora de tesis
Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2025.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; **04/junio/2025**

Oficio No. DIE/102/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Gabriel Cervantes Mejía**, con número de control **M23CE012** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"DISEÑO DE UN CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA GENERAR GAS HIDROGENO SOBRE DEMANDA"**, 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. Jarniel García Morales
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11106825

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Marisol Cervantes Bobadilla
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11607393

REVISOR 1

Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 6094069

REVISOR 2

Dr. Carlos Aguilar Castillo
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3581040

Cp. Mtra. Verónica Sotelo Boyas, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **07/julio/2025**
Oficio No. SAC/181/2025
Asunto: Autorización de impresión de tesis

GABRIEL CERVANTES MEJÍA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

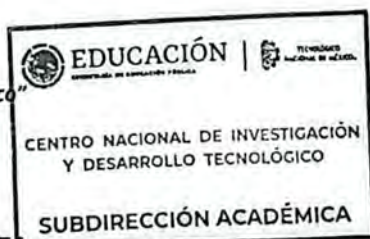
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"DISEÑO DE UN CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA GENERAR GAS HIDROGENO SOBRE DEMANDA"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. 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



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Resumen

En este trabajo se desarrolla un sistema para la generación de HHO (Oxihidrógeno) bajo demanda mediante electrólisis, buscando ofrecer una fuente energética limpia, segura y eficiente para aplicaciones móviles o estacionarias. El trabajo se centra en el diseño, implementación y validación experimental de un convertidor electrónico de potencia para un reactor electrolítico controlado en tiempo real, capaz de ajustar la producción de hidrógeno en función de la demanda del gas.

Se propone un convertidor de potencia buck diseñado específicamente para alimentar el reactor con un suministro eléctrico estable. El convertidor está controlado por un microcontrolador de arquitectura dsPIC33CH512MP508, el cual emplea dos núcleos para realizar tareas en paralelo: uno dedicado al sensado y comunicación, y otro al control del convertidor y del proceso de electrólisis. El control del convertidor se implementa mediante un regulador PI que ajusta el ciclo de trabajo del PWM (Modulación por ancho de pulso) para mantener el voltaje deseado, mientras que el control de generación de hidrógeno se realiza a partir de una red neuronal inversa que estima la corriente necesaria para cumplir una referencia de flujo, esto se logró a través del modelado del reactor electrolítico a partir de un modelo Hammerstein.

El sistema de control inteligente incluye la medición de variables críticas como corriente, voltaje, flujo, presión y temperatura, las cuales son adquiridas a través de ADCs y enviadas mediante UART para monitoreo o almacenamiento. Se implementa una estrategia de control en tiempo real capaz de responder a cambios dinámicos en la demanda, mejorando la eficiencia energética del proceso y reduciendo riesgos asociados a la acumulación de hidrógeno.

Para validar el desempeño del sistema, se realizaron pruebas experimentales con diferentes perfiles de referencia de flujo. Los resultados demuestran una alta capacidad de seguimiento dinámico, precisión en la estimación de corriente, y eficiencia en la conversión de energía.

Finalmente, la tesis demuestra que el enfoque propuesto es viable y escalable, ofrece una solución técnica robusta para la producción de hidrógeno bajo demanda con aplicación directa en sistemas de energía renovable, transporte alternativo o respaldo energético. Este trabajo

contribuye al desarrollo de tecnologías sostenibles, alineadas con la transición energética global y la reducción de emisiones contaminantes.

Abstract

This work presents the development of an on-demand HHO generation system based on electrolysis, aiming to provide a clean, safe, and efficient energy source for mobile or stationary applications. The focus is on the design, implementation, and experimental validation of a power electronic converter for a real-time controlled electrolytic reactor, capable of adjusting hydrogen production according to gas demand.

A buck power converter is specifically designed to supply the reactor with a stable electrical input. The converter is controlled by a dsPIC33CH512MP508 microcontroller, which features a dual-core architecture to perform parallel tasks: one core is dedicated to sensing and communication, while the other handles the control of both the converter and the electrolysis process. Converter regulation is achieved through a PI controller that adjusts the HSPWM duty cycle to maintain the desired voltage, whereas hydrogen generation is controlled by an inverse neural network that estimates the required current to meet a flow rate reference. This control strategy is based on a Hammerstein model of the electrolytic reactor.

The intelligent control system includes the measurement of critical variables such as current, voltage, flow rate, pressure, and temperature, which are acquired through ADCs and transmitted via UART for monitoring or storage. A real-time control strategy is implemented, capable of responding to dynamic demand changes, thereby improving the energy efficiency of the process and minimizing risks associated with hydrogen accumulation.

To validate the system's performance, experimental tests were conducted using different flow reference profiles. The results show high dynamic tracking capability, accurate current estimation, and efficient energy conversion.

In conclusion, this thesis demonstrates that the proposed approach is both viable and scalable, providing a robust technical solution for on-demand hydrogen production. The system is suitable for direct application in renewable energy systems, alternative transportation, or energy backup, contributing to the advancement of sustainable technologies aligned with the global energy transition and the goal of reducing the emission of polluting gases.

Dedicatoria

A mi familia, porque son el pilar de mi vida y lo que me impulsa a seguir adelante.

A mis papás, por su amor incondicional, su sacrificio y por ser el mejor ejemplo que pude tener.

A mi mamá, por su paciencia infinita, por darme una palabra de aliento cuando no sabía qué hacer y por enseñarme que con perseverancia se logra todo.

A mi papá, por su fortaleza, su sabiduría y por inspirarme a nunca rendirme ante nada para seguir mis sueños.

A mis hermanos, por compartir conmigo no solo lazos de sangre, sino también risas, apoyo y por recordarme siempre que la familia es un refugio seguro.

A mis amigos, que con su compañía, sus consejos y su amistad sincera hicieron más fáciles los momentos difíciles y celebraron mis logros como si fueran suyos.

Este trabajo es un reflejo de mi esfuerzo, pero también del amor, el apoyo y la confianza que me han dado. Se los dedico con todo mi cariño y gratitud.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada, la cual hizo posible la realización de este trabajo. Al Tecnológico Nacional de México (TECNM) por facilitar las instalaciones y recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación. A mis asesores, por su valiosa guía, conocimiento y dedicación, que fueron fundamentales para la culminación de esta tesis.

Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Dedicatoria.	IV
Agradecimientos	V
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XII
Notación	XIII
Capítulo I. Antecedentes y motivación.	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Antecedentes.	1
1.3 Planteamiento del problema.	3
1.4 Objetivos.	3
1.4.1 Objetivo general.	3
1.4.2 Objetivos específicos.	3
1.5 Metas.	4
1.6 Justificación.	4
1.7 Alcances.	4
1.8 Hipótesis.	5

ÍNDICE GENERAL

Capítulo II. Fundamentos teóricos.	6
2.1 Hidrógeno.	6
2.2 Agua alcalina.	6
2.3 Celdas electrolíticas.	6
2.4 Tipos de electrólisis.	9
2.4.1 Electrólisis alcalina.	9
2.4.2 Electrólisis de membrana de electrolito de polímero (<i>PEM</i>).	11
2.4.3 Electrólisis pulsada.	11
2.4.4 Electrólisis con pulsos inductivos.	15
2.4.5 Electrólisis pulsada de alto voltaje.	15
2.5 Modelado de sistemas a través de leyes físicas.	16
2.6 Modelado de sistemas basado en datos.	16
2.7 Modelado de curva de polarización de electrólisis en un reactor PEM.	17
2.8 Modelo Hammerstein.	19
2.9 Redes neuronales artificiales	20
2.10 Convertidor de potencia.	22
2.10.1 Convertidor Buck	22
Capítulo III. Estado del arte.	24
3.1 Reactor de electrólisis	24
3.2 Pilas de combustible de membrana electrolítica de polímero	26
3.3 Mezcla de hidrógeno o <i>HHO</i> con combustibles fósiles.	27
3.4 Otras aplicaciones del hidrógeno.	29
3.5 Convertidores de potencia para electrólisis.	31
3.6 Conclusiones del estado del arte.	33
Capítulo IV. Caso de estudio.	35
4.1 Sistema de electrólisis e instrumentación.	35
4.2 Modelado del reactor electrolítico.	37
4.2.1 Identificación de frecuencia de conmutación.	38
4.2.2 Modelo Hammerstein del reactor electrolítico.	39
4.2.2.1 No linealidad estática.	40
4.2.2.2 Linealidad dinámica.	45

ÍNDICE GENERAL

4.2.2.3	Validación del modelo Hammerstein.	46
4.3	Convertidor de potencia.	47
4.3.1	Convertidor en lazo abierto.	49
4.3.2	Convertidor en lazo cerrado.	51
4.3.2.1	Control PI.	52
4.3.2.2	Control PID.	53
4.3.2.3	Compensador de tercer orden.	55
4.3.2.4	Análisis de los controladores del convertidor de potencia. . . .	57
Capítulo V. Método de solución.		60
5.1	Diseño del sistema de electrólisis.	60
5.2	Validación del sistema de electrólisis.	61
5.2.1	Evaluación de la eficiencia del convertidor y el sistema	64
Capítulo VI. Conclusiones y aportaciones.		67
6.1	Alcance y limitaciones.	67
6.2	Conclusiones	69
6.3	Trabajos Futuros	70
Referencias.		71
Apéndice.		81
A. Adquisición de datos en LabView.. . . .		82
B. PCB para la adquisición de datos		84
C. Código del microcontrolador para la adquisición de datos.. . . .		97
D. Esquema del sistema de electrólisis controlado.		100
E. PCB´s del convertidor de potencia.		102

ÍNDICE GENERAL

F. Flujo de trabajo en los núcleos del DSP y el código ensamblador del controlador PI y la RNA inversa. 123

Índice de figuras

.8figure.caption.8	
.10figure.caption.9	
.14figure.caption.10	
.15figure.caption.11	
.26figure.caption.12	
.31figure.caption.13	
4.1	Ensamble del sistema de electrólisis. 36
4.2	RNA 38
4.3	Análisis de frecuencia del reactor electrolítico 39
4.4	Pulso de corriente en reactor de electrolisis a 8 kHz 39
4.5	Datos extraídos del reactor electrolítico para el entrenamiento de la RNA . . . 40
4.6	Datos extraídos del reactor electrolítico para el entrenamiento de la RNA Normalizados 41
4.7	Comparacion entre estimacion de la RNA y medicion de HHO en la validacion de la RNA. 43
4.8	Datos extraídos del reactor electrolítico para validar la RNA 44
4.9	Comparación de la red neuronal y la producción de HHO medida 44
4.10	Comparación de la función de transferencia y la producción de HHO medida utilizando una señal de corriente PRBS como entrada 46
4.11	Comparación del modelo Hammerstein y la producción de HHO medida. . . . 46
4.12	Conexión del reactor electrolítico con el convertidor de potencia. 48
4.13	Acoplamiento de tarjetas de control y potencia para el sistema de electrolisis. . 49
4.14	Voltaje en convertidor Buck en lazo abierto. 50
4.15	Esquemático del convertidor en lazo abierto. 50
4.16	Voltaje del convertidor en lazo abierto al conmutar la carga. 51
4.17	Diagrama de Bode en lazo abierto del convertidor de potencia. 52

ÍNDICE DE FIGURAS

4.18	Convertidor Buck con compensador de tercer orden.	55
4.19	Respuesta escalón del convertidor de potencia implementando diferentes controladores.	57
4.20	Comparación del desempeño de los controladores frente a cambios escalonados en la referencia del sistema.	58
4.21	Controlador PI implementado en el convertidor de potencia.	59
5.1	Esquema de generación de hidrógeno sobre demanda.	60
5.2	Simulación del sistema de generación de HHO sobre demanda y el convertidor de potencia en lazo cerrado.	62
5.3	Datos medidos del reactor electrolítico implementando el convertidor de potencia y el control de generación de HHO.	63
5.4	Generación de HHO sobre demanda implementando el convertidor de potencia en el reactor electrolítico.	63
5.5	Corriente de alimentación al reactor electrolítico a través del convertidor de potencia mientras se controla la generación de HHO.	64
1.1	Interface gráfica de la adquisición de datos en LabView.	82
1.2	Código de LabView para la adquisición de datos.	83

Índice de tablas

4.1	Características del reactor electrolítico adquirido	35
4.2	Parámetros entrenados de la RNA: pesos y bias de las capas oculta y de salida	42
4.3	Parámetros de diseño del sistema	48
5.1	Parámetros de Potencia del Convertidor Buck	65

Notación

Acrónimos

<i>AC-AC</i>	Conversión de corriente alterna a corriente alterna
<i>AC-DC</i>	Conversión de corriente alterna a corriente continua
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>DC-AC</i>	Conversión de corriente continua a corriente alterna
<i>DC-DC</i>	Conversión de corriente continua a corriente continua
<i>DMA</i>	Acceso directo a memoria
<i>DSP</i>	Procesador de señales digitales
<i>ECM</i>	Error cuadrático medio
<i>EMI</i>	Ruido electromagnético
<i>H₂SO₄</i>	Ácido sulfúrico
<i>H₂</i>	Hidrógeno
<i>HHO</i>	Hoxihidrógeno
<i>KOH</i>	Hidróxido de potasio
<i>LPM</i>	Litros por minuto
<i>LRC</i>	Inductivo, resistivo y capacitivo
<i>MPC</i>	Control predictivo por modelo
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sodio
<i>NO_x</i>	Óxidos de nitrógeno

NOTACIÓN

PEM	Membrana de electrolito de polímero
Ph	Potencial de hidrógeno
PID	Proporcional integral derivativo
PI	Proporcional integral
PWM	Modulación por ancho de pulso
RMS	Valor cuadrático medio
RNA	Red neuronal artificial
rpm	Revoluciones por minuto
SoC	System on Chip (Sistema en chip)
THC	Hidrocarburos no quemados
ZVS	Conmutación a voltaje cero

Variables

ΔI_{out}	Variación de corriente de salida
ΔV_{out}	Variación de voltaje de salida
η	Eficiencia del sistema
f	Frecuencia
I	Corriente
I_{in}	Corriente de entrada
I_{out}	Corriente de salida
P	Potencia
R	Resistencia eléctrica
T	Temperatura

NOTACIÓN

V Voltaje

V_{in} Voltaje de entrada

V_{out} Voltaje de salida

Constantes

F Constante de Faraday 96 485 C mol⁻¹

R Constante universal de los gases ideales 8.314 J mol⁻¹ K

Simbología

$\mu\Omega$ Microohm

μF Microfaradio

μH Microhenrio

μs Microsegundos

Ω Ohm

$^{\circ}C$ Grados Celsius

A Amperaje

A/m^2 Amperes por metro cuadrado

C_1 Capacitor 1

cm^2 Centímetro cuadrado

g/L Gramos por litro

Hz Hertz

J/min Joules por minuto

kHz Kilohertz

Kp Constante proporcional

NOTACIÓN

kPa	Kilopascales
kW	Kilowatts
L	Litro
L/h	Litros por hora
L/min	Litros por minuto
L_1	Inductor 1
m	Materia
mA	Miliamperes
MHz	Megahertz
mm	Milímetros
MPa	Megapascales
Q_1	Mosfet 1
Q_2	Mosfet 2
R_c	Resistencia capacitiva
$R_{DS(on)}$	Resistencia drenaje-fuente
R_l	Resistencia inductiva
R_{out}	Resistencia de salida
s	Segundos
t	Tiempo
T_i	Tiempo de integración
V	Voltaje
W	Watts

Capítulo I. Antecedentes y motivación.

1.1 Introducción.

En los últimos años, la búsqueda de fuentes de energía limpias y sostenibles ha llevado a un creciente interés por el hidrógeno como portador energético. Su capacidad para almacenar y liberar energía sin emitir contaminantes lo convierte en una alternativa prometedora frente a los combustibles fósiles. La generación de gas *HHO* a través de procesos de electrólisis del agua ha ganado atención por su potencial para producir hidrógeno de forma segura y bajo demanda. Sin embargo, para que esta tecnología sea viable en aplicaciones prácticas, es necesario optimizar la eficiencia energética del sistema, especialmente mediante el control preciso del proceso de electrólisis.

El presente trabajo, tiene como objetivo el desarrollo de un sistema capaz de controlar la producción de *HHO* mediante un convertidor de potencia diseñado específicamente para alimentar un reactor electrolítico. La estrategia de diseño se basa en regular las condiciones de operación del sistema mediante un controlador en lazo cerrado, lo que permite ajustar dinámicamente los parámetros eléctricos y mejorar la eficiencia del proceso.

1.2 Antecedentes.

La creciente preocupación social por el cambio climático ha llevado a numerosas empresas, instituciones y organizaciones a reconocer la urgente necesidad de adoptar fuentes de energía que no contribuyan a las emisiones de CO₂ ni perjudiquen al medio ambiente ((Tashie-Lewis y Nnabuife, 2021^[1])).

En 2016, un total de 116 países firmaron el Acuerdo de París, comprometiéndose a limitar el calentamiento global a menos de 2°C, lo que exige una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero. Con esto, la *economía del hidrógeno* emerge como una solución viable y sostenible, siendo postulada desde 1970 como un portador de energía primaria con aplicaciones en diversos sectores, incluyendo el transporte, residencial, comercial e industrial ((Brandon N. P., 2017^[2])).

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

). El objetivo de este modelo económico es reemplazar el actual paradigma, basado en altas emisiones de gases de efecto invernadero, por uno nuevo que garantice la emisión cero de estos gases ((Tashie-Lewis y Nnabuike, 2021^[1])

).

Como lo mencionan ((Clark y Rifkin, 2006^[3])

), cualquier nación que aspire a alcanzar la independencia energética debe apostar por un futuro sostenible basado en energías renovables o en hidrógeno a corto plazo. Sin embargo, la realidad es que existen múltiples desafíos que deben abordarse de manera simultánea, lo que complica una transición rápida. Por ello, se están realizando nuevas investigaciones y desarrollos para facilitar una transición progresiva.

El sector del transporte es uno de los principales contribuyentes a la contaminación del aire. Por ello, las emisiones de estos vehículos han sido objeto de regulaciones cada vez más estrictas. Empresas como *Toyota*, *Honda* y *Hyundai* han desarrollado automóviles impulsados por hidrógeno. Sin embargo, estos se enfrentan al dilema conocido como “el huevo y la gallina”: la producción de estos vehículos es limitada debido a la escasa infraestructura de repostaje, y la inversión en dicha infraestructura se ve afectada por la baja cantidad de vehículos que la requieren ((Tashie-Lewis y Nnabuike, 2021^[1])

).

En la situación actual, la sustitución completa de los combustibles fósiles por hidrógeno en los vehículos no es económicamente viable. Sin embargo, es posible mezclar hidrógeno con estos combustibles, siempre y cuando se controle adecuadamente la proporción de la mezcla. Dado que el hidrógeno no es un hidrocarburo, aumentar su inyección puede reducir las emisiones de monóxido de carbono ((Shadidi, Najafi y Yusaf, 2021^[4])

).

Actualmente, se están investigando diversas técnicas para el almacenamiento de hidrógeno, incluyendo la compresión, la criogenización, el almacenamiento en hidruros metálicos y el uso de nanoestructuras. Sin embargo, la técnica más utilizada es la compresión del gas, debido a su conocimiento previo. No obstante, el principal desafío de esta técnica radica en el recipiente de almacenamiento, que debe ser capaz de soportar la fragilización del hidrógeno, ser un buen conductor térmico y ser económicamente viable. Estas limitaciones actuales dificultan su aplicación a gran escala ((Durbin y Malardier-Jugroot, 2013^[5])

).

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

Una solución alternativa al problema del almacenamiento de hidrógeno es su producción bajo demanda. Además, al implementar técnicas de control para generar hidrógeno según las necesidades del sistema, se puede optimizar la eficiencia en la utilización del combustible. La electrólisis del agua es una opción prometedora para este propósito, ya que permitiría generar hidrógeno de manera continua y controlada, haciendo del hidrógeno sobre demanda una alternativa atractiva para mejorar el rendimiento energético en múltiples aplicaciones ((Cervantes-Bobadilla et al., 2018^[6])).

1.3 Planteamiento del problema.

La necesidad de un sistema de alimentación de potencia adecuado para los reactores electrolíticos es crucial para la generación de hidrógeno bajo demanda, ya que permite un control preciso y eficiente de la energía suministrada al reactor. Al optimizar el sistema de potencia, se asegura que el reactor reciba la energía necesaria de manera dinámica, evitando el desperdicio y maximizando la eficiencia. Esto no solo facilita la producción de hidrógeno cuando es requerido, sino que también mejora la seguridad al evitar la acumulación innecesaria de gas. El principal reto radica en lograr un balance constante entre la energía suministrada y la demanda de hidrógeno, ajustando la potencia en tiempo real para mantener el sistema seguro y eficiente. La gestión de este equilibrio es esencial para garantizar tanto la estabilidad del reactor como la optimización del consumo energético.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Diseñar e implementar un convertidor de potencia que permita la generación de hidrógeno sobre demanda, utilizando electrólisis alcalina.

1.4.2 Objetivos específicos.

1. Obtener el modelo representativo del reactor electrolítico de celda seca.
2. Proponer y modelar un convertidor que cumpla con las características del sistema.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

3. Implementar en simulación el convertidor de potencia propuesto y analizar la respuesta de la celda electrolítica.
4. Proponer una estrategia de control que modifique el ciclo de trabajo del convertidor de acuerdo a la demanda de hidrógeno.
5. Construir el convertidor de potencia e implementar en el reactor electrolítico.
6. Analizar los resultados obtenidos y determinar la eficiencia del sistema.

1.5 Metas.

1. Conocer el comportamiento de la celda electrolítica a diferentes frecuencias, ciclo de trabajo y amplitud.
2. Implementar el convertidor y control del sistema electrolítico.

1.6 Justificación.

La economía del hidrógeno está impulsando el desarrollo de tecnologías que permita su uso como un combustible limpio y versátil en múltiples sectores. A pesar de las ventajas ambientales del hidrógeno, su almacenamiento presenta grandes retos en cuanto a seguridad, lo que ha limitado su implementación. Frente a estos desafíos, el uso de electrólisis alcalina para la generación de hidrógeno ha surgido como una alternativa viable. Sin embargo, el éxito de esta tecnología no radica solo en la capacidad de producir hidrógeno bajo demanda, sino, más crucialmente, en la eficiencia y control del convertidor de potencia. El convertidor de potencia es el elemento clave en la optimización del sistema, ya que regula de manera precisa la energía eléctrica suministrada al reactor, impactando directamente en la eficiencia del proceso de electrólisis. A pesar de las numerosas investigaciones sobre la generación de hidrógeno y su mezcla con combustibles fósiles, pocas han puesto un énfasis adecuado en la etapa de potencia eléctrica, donde existe gran potencial para incrementar la eficiencia energética y la viabilidad comercial del hidrógeno.

1.7 Alcances.

Se plantea el modelado de un reactor electrolítico basado en datos, el diseño y construcción de un convertidor de potencia capaz de suministrar energía de manera estable y eficiente al

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

reactor, minimizando las pérdidas energéticas. El desarrollo del convertidor se complementa con un sistema de control que permitirá ajustar dinámicamente la producción de hidrógeno según las variaciones en la demanda energética. Además, se realizarán pruebas experimentales del convertidor de potencia y del sistema completo, con el objetivo de validar su rendimiento en condiciones reales de operación. Los resultados obtenidos serán documentados y difundidos para su contribución al avance científico y tecnológico en el campo.

1.8 Hipótesis.

Es posible implementar un convertidor conmutado para la generación de gas oxihidrógeno (HHO) utilizando un controlador adecuado, agregándole versatilidad al permitir controlar el voltaje de alimentación del reactor.

Capítulo II. Fundamentos teóricos.

2.1 Hidrógeno.

El hidrógeno, el elemento químico más liviano y ampliamente distribuido en el universo, constituye aproximadamente el 75 % de su masa total. Este gas generalmente se presenta en forma diatómica (H_2) y es altamente inflamable, careciendo de olor, color y sabor distintivos. Aunque es el elemento más abundante en el universo, en su mayoría se encuentra en compuestos con otros elementos, como el agua en nuestro planeta. Por lo tanto, se requiere un proceso externo para separar el hidrógeno de los demás elementos ((Gomez, 2010^[7])).

2.2 Agua alcalina.

El pH es una medida que indica el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Se basa en la concentración de iones H^+ e hidróxido OH^- en una escala que va de 0 a 14. Un pH neutro se establece en 7, donde la cantidad de iones H^+ y OH^- es igual. Una solución con un pH menor a 7 se considera ácida, ya que tiene una mayor concentración de iones de hidrógeno. Por el contrario, una sustancia con un pH mayor a 7 se considera alcalina, debido a una mayor concentración de iones hidróxido. El agua común tiene un pH neutro, ya que presenta una concentración equilibrada de iones H^+ y OH^- . Por lo tanto, el agua alcalina se define como un tipo de agua con un pH superior a 7, lo cual indica una concentración más alta de iones hidróxido OH^- ((Addy, Green y Herron, 2004^[8])).

2.3 Celdas electrolíticas.

Una celda electrolítica es un dispositivo que facilita una reacción química no espontánea mediante el uso de corriente eléctrica, separando el hidrógeno y oxígeno del agua, estos gases se mezclan dentro del reactor, por lo que el gas generado a la salida de este es HHO . Esta celda consta principalmente de dos electrodos sumergidos en una solución de agua alcalina. En el *cátodo*, se produce la reducción, mientras que en el *ánodo* ocurre la oxidación. Es esencial que

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

los electrodos sean resistentes a la corrosión causada por el electrólito y que posean una amplia área superficial para asegurar la eficiencia de la reacción. Además, deben tener propiedades electrocatalíticas que permitan una alta velocidad de reacción y una conductividad elevada. En la práctica, los materiales más comunes para los electrodos son el acero inoxidable y el níquel. La resistencia eléctrica de los electrodos influye en la caída de voltaje, lo cual afecta la eficiencia del sistema. Por lo tanto, una resistencia eléctrica adecuada es crucial para garantizar un funcionamiento eficiente de la celda electrolítica ((Santos, Sequeira y Figueiredo, 2013^[9])

).

El electrolito alcalino en una celda electrolítica puede dañar los electrodos debido a la corrosión. No obstante, es posible emplear diversos elementos y técnicas para mitigar estos efectos corrosivos y reducir la energía necesaria para separar los componentes del agua. Estos elementos forman una capa protectora sobre los electrodos, mientras que los catalizadores aceleran la reacción y disminuyen la energía requerida. Estos enfoques mejoran tanto la eficiencia como la durabilidad de las celdas electrolíticas ((Mamoon et al., 2011^[10])

).

Existen dos configuraciones de celdas electrolíticas: celdas secas y celdas húmedas. Mientras las celdas húmedas permiten una mayor producción de gases, las celdas secas ofrecen ventajas como una menor disipación de calor, pérdidas energéticas reducidas, menor corrosión y mejores características de seguridad. Diversos factores influyen en la eficiencia de las celdas electrolíticas, como el material y área superficial de los electrodos, la separación entre ellos, el tipo y concentración de electrolitos, la temperatura y presión del sistema, y la corriente y voltajes aplicados. Estos aspectos son cruciales para lograr un funcionamiento eficiente y optimizar la producción de gases en el proceso electrolítico ((El Soly et al., 2021^[11])

).

Durante el proceso de electrólisis, el calor se genera principalmente debido a la resistencia eléctrica del circuito, la cual se origina principalmente en los electrodos, así como en los fenómenos de transporte de masa y las burbujas de gas que se forman en la superficie de los electrodos. La resistencia de los electrodos y el circuito está determinada por los materiales utilizados en su construcción. La resistencia provocada por la transferencia de masa afecta tanto la transferencia de calor como el comportamiento de las burbujas de gas generadas. Esta resistencia depende de la viscosidad del electrólito, la cual a su vez afecta el tamaño y la velocidad de desprendimiento de las burbujas a medida que se produce hidrógeno y

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

oxígeno. A medida que aumenta la concentración de electrolitos y, por lo tanto, la viscosidad del fluido, la resistencia varía, por lo que es crucial agregar agua de forma continua para mantener constante la concentración de electrolitos. El hidrógeno y el oxígeno generados se acumulan en forma de burbujas en la superficie del *ánodo* y el *cátodo*, las cuales se separan cuando alcanzan un tamaño adecuado. Sin embargo, la presencia de estas burbujas aumenta la resistencia del electrodo. Promover un desprendimiento más eficiente de las burbujas en tamaños más pequeños contribuye a mejorar la eficiencia del sistema ((Zeng y Zhang, 2010^[12])).

En el proceso de disociación del agua, los átomos de hidrógeno se dirigen hacia el *cátodo*, mientras que los átomos de oxígeno se encuentran en el lado opuesto de la molécula, esta disposición inversa de las moléculas también ocurre en el *ánodo*, a este fenómeno se le conoce como el efecto de doble capa y confiere propiedades capacitivas al electrolizador, el cual se ilustra en la Figura 2.1.

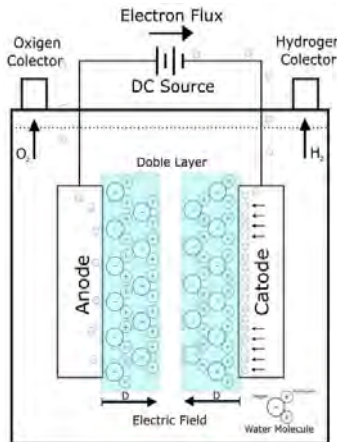


Figura 2.1: Celda de electrolisis y formación de la doble capa proporcional al campo eléctrico ((Albornoz et al., 2022^[13])).

La estructura de doble capa restringe el flujo de electrones hacia el electrolito debido a las cargas opuestas en las moléculas. Esta barrera de carga proporcional al voltaje aplicado en el electrodo aumenta con voltajes altos, lo que causa una mayor resistencia interna en el electrolito y reduce la eficiencia ((Albornoz et al., 2022^[13])).

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

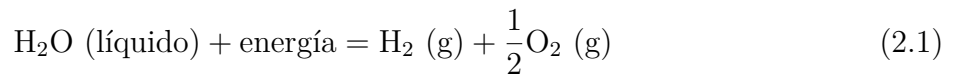
La celda electrolítica con una fuente de energía pulsante o alterna presenta un comportamiento eléctrico equivalente a un circuito compuesto de una inductancia, una resistencia y una capacitancia (LRC), lo que indica, tiene una frecuencia de resonancia a la cual esta mantiene una resistencia menor y a su vez aumenta la eficiencia del sistema ((Mazloomi et al., 2013^[14])).

2.4 Tipos de electrólisis.

2.4.1 Electrólisis alcalina.

La electrólisis del agua es un proceso químico antiguo, pero de fácil implementación que separa el agua en hidrógeno y oxígeno. El agua con un pH neutro tiene una baja conductividad, por lo que se agregan sustancias como hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio ($NaOH$) y Ácido sulfúrico (H_2SO_4) para aumentar el pH y obtener agua alcalina. La electrólisis se lleva a cabo aplicando una corriente eléctrica a través del agua mediante una celda electrolítica. Los electrones fluyen desde el terminal negativo "*ánodo*" hacia el terminal positivo "*cátodo*", donde los iones de hidrógeno los consumen para formar átomos de hidrógeno. Durante la electrólisis del agua, los iones de hidrógeno se desplazan hacia el *cátodo*, mientras que los iones de hidróxido se mueven hacia el *ánodo*.

La Ecuación (2.1) es la representación más simple de este proceso.



La reacción del *ánodo* y del *cátodo* se representa en la Ecuación (2.2) y (2.3) respectivamente.



Este proceso se lleva a cabo a una temperatura de hasta 90 °C ((Mamoon et al., 2011^[10])); ((Youssef Naimi y Amal Antar, 2018^[15])); ((Escobar-Jiménez et al., 2020^[16])).

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

). Michael Faraday estableció las 2 leyes de la electrólisis. “Los pesos de las sustancias formadas en un electrodo durante la electrólisis son directamente proporcionales a la cantidad de electricidad que pasa a través del electrolito.” “Los pesos de las distintas sustancias formadas por el paso de la misma cantidad de electricidad son proporcionales al peso equivalente de cada sustancia.” ((Youssef Naimi y Amal Antar, 2018^[15])

) La materia que se produce en la electrólisis se puede deducir a través de la Ecuación (2.4).

$$m = k \int_0^t I dt \quad (2.4)$$

Con k siendo una constante de proporcionalidad e I siendo la corriente que fluye a través de la celda electrolítica. Para lograr la disociación del agua a una presión y temperatura estándar, es necesario que exista un voltaje mínimo en la celda llamado voltaje crítico. Teóricamente este es de 1.23 V con lo que se consigue una eficiencia en la celda del 100 %, sin embargo, de forma pragmática no se observa ninguna reacción hasta llegar a los 1.65 – 1.7 V, a nivel industrial el voltaje estándar para este sistema es de 1.8 a 2.6 V lo que lleva a una eficiencia de entre el 48 % y el 70 % ((Mamoon et al., 2011^[10])

); ((Youssef Naimi y Amal Antar, 2018^[15])

);((Wang et al., 2014^[17])

). La relación entre la temperatura y el voltaje, así como el tipo de reacción que se produce se representa en la Figura 2.2.

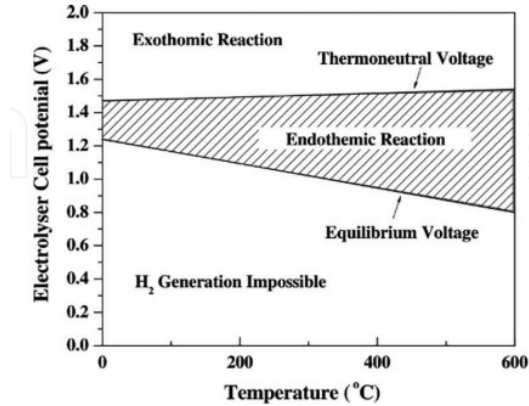


Figura 2.2: Potencial de la célula para la producción de hidrógeno por electrólisis del agua en función de la temperatura ((Youssef Naimi y Amal Antar, 2018^[15])).

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Otro factor que afecta la eficiencia del proceso de electrólisis es el flujo electro osmótico es un fenómeno físico en el cual partículas cargadas en el agua se mueven y genera un flujo, debido al campo magnético, este fenómeno puede arrastrar OH^- hacia el *ánodo*, esto resulta en una densidad de corriente limitante y por ende genera una reducción en la eficiencia del sistema ((Youssef Naimi y Amal Antar, 2018^[15])

);((Haverkort y Rajaei, 2020^[18])

).

2.4.2 Electrólisis de membrana de electrolito de polímero (*PEM*).

La electrólisis *PEM* es un término utilizado cuando se emplea un polímero sólido ácido como electrolito en lugar de un electrolito líquido. En estas celdas solo se añade agua desionizada sin electrolitos adicionales. La membrana desempeña la función de electrolito y también se utiliza para separar los gases producidos durante el proceso ((Mamoon et al., 2011^[10])

). Entre las ventajas principales del uso de estas membranas se encuentra la reducción de la celda electrolítica, un bajo cruce de gases, mayor nivel de seguridad, un menor consumo de energía y la posibilidad de trabajar con presiones altas, lo que se traduce en una mejor eficiencia ((Grigoriev, Porembsky y Fateev, 2006^[19])

). Si bien la electrólisis *PEM* permite reducir el tamaño y aumentar la densidad de energía utilizada, el entorno que este sistema produce en la celda es más hostil y el deterioro de sus elementos es significativamente mayor, esto implica el uso de materiales escasos y costosos como puede ser los metales del grupo platino-*PGM* ((Carmo et al., 2013^[20])

).

2.4.3 Electrólisis pulsada.

En la electrólisis pulsada, es crucial medir el valor promedio en condiciones dinámicas a través de su componente en corriente continua, ya que esta está estrechamente relacionada con la no linealidad del proceso. Tradicionalmente, los procesos electroquímicos se realizan en condiciones estacionarias, de manera galvanostática, manteniendo constante la corriente o la potencia. Sin embargo, la electrólisis pulsada introduce un funcionamiento dinámico, donde la entrada eléctrica (corriente o voltaje) se perturba con amplitudes y frecuencias significativas. Esto es similar a la espectroscopia de impedancia electroquímica, pero con una diferencia

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

clave: la amplitud de la señal de entrada es considerablemente mayor, resultando en una respuesta en frecuencia no lineal. ((Miličić et al., 2023^[21])

).

En el caso de la electrólisis pulsada por voltaje, se utiliza la modulación de ancho de pulso (*PWM*) para mantener los voltajes convencionales de la electrólisis, entre 1.6 V y 2 V. En cuanto a la corriente, en este proceso se genera una corriente farádica si la corriente pico tiene un voltaje suficiente para permitir la electrólisis del agua, además de una corriente capacitiva para la carga y descarga de la doble capa formada en la celda electrolítica. Sin embargo, la corriente promedio sigue siendo menor que en la electrólisis convencional. Este método también permite controlar el tamaño de las burbujas de los gases y su liberación de la superficie del electrodo cuando se interrumpe el flujo de corriente. Las corrientes capacitiva y farádica pueden ser calculadas utilizando las Ecuaciones (2.5) y (2.6), respectivamente ((Rocha et al., 2021^[22])

).

$$I(t) = \frac{\Delta E}{R_S} e^{-\frac{t}{R_S C_D}} \quad (2.5)$$

- ΔE = Amplitud del voltaje.
- R_S = Resistencia de la solución.
- C_D = Capacitancia de doble capa.
- t = Tiempo.

$$i_f(t) = F A (k_f C_0^* - k_b C_R^*) e^{H^2 t} \operatorname{erfc}(H \sqrt{t}) \quad (2.6)$$

Con:

$$k_f = k^0 e^{-\alpha f(E-E^0)} \quad (2.7)$$

$$k_b = k^0 e^{(1-\alpha)f(E-E^0)} \quad (2.8)$$

$$f = \frac{F}{RT} \quad (2.9)$$

$$H = \frac{k_f}{\sqrt{D_0}} + \frac{k_b}{\sqrt{D_R}} \quad (2.10)$$

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

$$\operatorname{erfc}(H\sqrt{t}) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{H\sqrt{t}} e^{-y^2} dy \quad (2.11)$$

- k^0 = Constante de velocidad estándar.
- α = Coeficiente de transferencia.
- F = Constante farádica (96,485.3383 coulomb/mol).
- A = Área del electrodo.
- k_f = Constante de la reacción de reducción.
- k_b = Constante de la reacción de oxidación.
- C_0^* = Concentración del reactivo O en la masa.
- C_R^* = Concentración del producto R en la masa.
- R = La constante de los gases.
- T = La temperatura.
- E = Voltaje.
- E^0 = El potencial estándar.
- D_O = Coeficiente de transferencia de masa para la muestra O.
- D_R = Coeficiente de transferencia de masa para la muestra R.

La Figura 2.3 muestra las señales de voltaje y corriente en la electrólisis pulsada por voltaje.

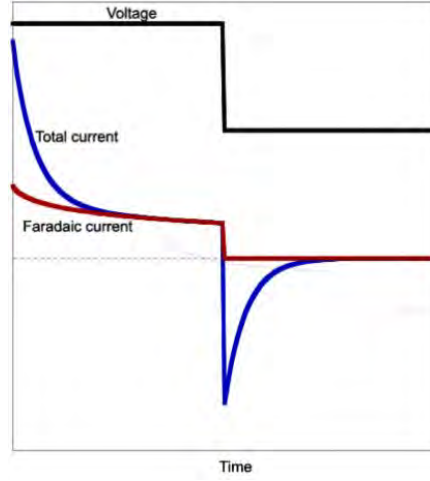


Figura 2.3: Pulso de voltaje con un voltaje en el que ocurre una reacción y un voltaje en el que no ocurre ninguna reacción ((Rocha et al., 2021^[22])).

Para la electrólisis de corriente pulsada, al principio se puede estimar el comportamiento del voltaje – tiempo a través de la Ecuación (2.12).

$$E = i \left(R_S + \frac{t}{C_D} \right) \quad (2.12)$$

Cuando el voltaje alcanza rápidamente el voltaje reversible de la celda, se inician los procesos farádicos. En este punto, es posible estimar el comportamiento potencial-tiempo utilizando la Ecuación (2.13).

$$-\eta = \frac{\eta(t=0)}{\epsilon - \beta} \left[\epsilon e^{\beta^2 t} \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{t}) - \beta e^{\epsilon^2 t} \operatorname{erfc}(\epsilon \sqrt{t}) \right] \quad (2.13)$$

Tomando en cuenta que ϵ y β estar relacionados con los tiempos de relajación del voltaje. La Figura 2.4 muestra las señales de voltaje y corriente en la electrólisis pulsada por corriente

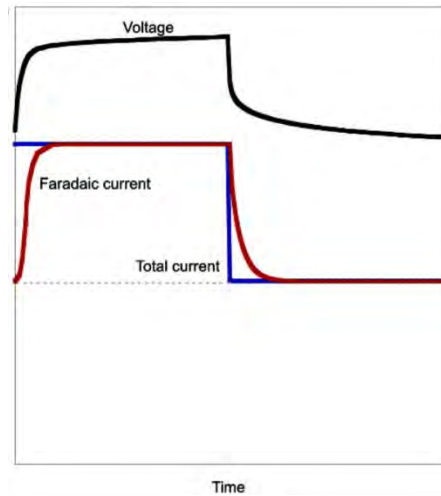


Figura 2.4: Pulso de corriente con una corriente total nula durante el tiempo de inactividad ((Rocha et al., 2021^[22])).

2.4.4 Electrólisis con pulsos inductivos.

Este método utiliza un transformador para suministrar voltajes inductivos de mayor magnitud que los voltajes convencionales empleados en la electrólisis. El objetivo es influir en el comportamiento de las burbujas y en la resistencia electrolítica. A diferencia del voltaje y la corriente, la potencia puede controlarse mediante la frecuencia y la amplitud del voltaje aplicado en el devanado primario del transformador ((Vanags, Kleperis y Bajars, 2012^[23])).

2.4.5 Electrólisis pulsada de alto voltaje.

La electrólisis por plasma utiliza corriente alterna para maximizar la entrada de energía y evitar que el plasma alcance el equilibrio, lo que produce cambios iónicos deseados. La frecuencia estándar para el plasma es de 13.56 MHz . Sin embargo, la entrada de corriente alterna puede generar gases no deseados, creando una mezcla explosiva y comprometiendo la producción de hidrógeno ultrapuro. Por lo tanto, es crucial tomar medidas adicionales para controlar y minimizar la formación de estos gases durante el proceso, asegurando así la obtención de hidrógeno de alta pureza ((Monk y Watson, 2016^[24])).

2.5 Modelado de sistemas a través de leyes físicas.

El modelado a través de leyes físicas es una técnica esencial en la ciencia y la ingeniería, que permite reproducir y predecir el comportamiento de sistemas reales mediante ecuaciones matemáticas basadas en principios físicos. Este enfoque se utiliza para conceptualizar y simular fenómenos complejos, como el movimiento de fluidos o la dinámica de sistemas mecánicos, proporcionando una representación abstracta y simplificada de la realidad. Este método no solo facilita la comprensión de los fenómenos físicos, sino que también permite realizar predicciones precisas y verificables, lo cual es fundamental para el avance de la ciencia y la tecnología ((Rolleri, 2013^[25])

).

2.6 Modelado de sistemas basado en datos.

El modelado basado en datos es una técnica que utiliza datos experimentales para crear modelos matemáticos o computacionales que describen y predicen el comportamiento de sistemas complejos. Este enfoque es especialmente útil en campos donde los datos son abundantes y las relaciones entre variables pueden ser no lineales o difíciles de modelar mediante métodos tradicionales.

El desarrollo de modelos de procesos puede ser una tarea desafiante, especialmente cuando se trata de sustancias con escasos datos termodinámicos u operaciones unitarias complejas. Ante estas limitaciones, se han desarrollado métodos simplificados para predecir el impacto de las variables a partir de la información fácilmente disponible en la práctica ((Ioannou et al., 2021^[26])

). Estos modelos se desarrollan a través de técnicas de aprendizaje automático, lo que agiliza los procesos de optimización e identificación de sistemas. Sin embargo, persisten desafíos como el ruido en los datos, las configuraciones limitadas de los sensores y la interpretabilidad del modelo. Cuando los datos no son suficientes para desarrollar un modelo representativo, es posible integrar un modelo híbrido entre el modelo basado en aprendizaje y leyes físicas para la simulación de procesos ((Hasidi et al., 2024^[27])

). Para la identificación del modelo es necesario recolectar datos, analizarlos, desarrollar el modelo, validarlo y aplicarlo.

2.7 Modelado de curva de polarización de electrólisis en un reactor PEM.

En Niroula, 2023 ((Niroula et al., 2023^[28])

) utilizaron un modelo matemático para generar la curva de polarización de un electrolizador en donde se utilizan relaciones termodinámicas, electroquímicas y empíricas. Esta curva se ve representada por la Ecuación (2.14).

$$V_e = V_{\text{rev}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohmic}} + V_{\text{conc}} \quad (2.14)$$

- V_{rev} = Voltaje reversible.
- V_{act} = Sobretensión de activación.
- V_{ohmic} = Sobretensión óhmica.
- V_{conc} = Sobretensión de concentración.

El voltaje reversible o de circuito abierto es el valor ideal para iniciar el proceso de electrólisis. Este voltaje depende tanto de la temperatura como de la presión, y se calcula utilizando la ecuación de Nernst (Ecuación (2.15)).

$$V_{\text{rev}} = E_{\text{rev}}^{\circ} + \frac{(T - T_{\text{ref}})\Delta S^{\circ}}{nF} + \frac{RT}{2F} \left[\ln \left(\frac{(P - P_{H_2O})^{3/2}}{P_{H_2O}/P_{H_2O}^{\circ}} \right) \right] \quad (2.15)$$

- E_{rev}° = Voltaje mínima reversible necesaria para que se produzca la reacción de electrólisis a presión y temperatura estándar.
- T = Temperatura de operación.
- T_{ref} = Temperatura de referencia a la que se evalúa E_{rev}° y ΔS° .
- $\frac{\Delta S^{\circ}}{nF}$ = Cambio de entropía del estado estándar a 25° C.
- R = Constante universal del gas.
- F = Constante de Faraday.
- P = Presión de operación.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

- P_{H_2O} = Presión de vapor del agua.
- $P_{H_2O}^\circ$ = Presión de vapor del H_2O puro.

El sobrepotencial de activación es la energía necesaria para romper los enlaces químicos antes de una reacción electroquímica, influenciado por la cinética de la transferencia de carga en el electrodo. Depende de la densidad de corriente y la densidad de corriente de intercambio, que es la corriente en ausencia de electrólisis neta. Se puede calcular usando la ecuación de Tafel, (Ecuación (2.16)). Además, la formación de burbujas durante la evolución del gas reduce el área activa del electrodo, disminuyendo la densidad de corriente de intercambio y aumentando el sobrepotencial.

$$V_{\text{act}(a,c)} = b_{a,c} \ln \left(\frac{j_{a,c}}{j_{o-a,c}} \right) + b_{a,c} \ln \left(\frac{1}{1 - \theta} \right) \quad (2.16)$$

- $b_{a,c}$ = Pendiente de Tafel.
- $j_{a,c}$ = Densidad de corriente de los electrodos.
- $j_{o-a,c}$ = Densidad de corriente de intercambio efectiva.

La pendiente de Tafel para el ánodo y el electrodo catódico viene dada por la Ecuación 2.17.

$$b_{a,c} = \frac{RT}{nF\alpha_{a,c}} \quad (2.17)$$

- n = Número de electrones.
- $\alpha_{a,c}$ = Coeficiente de transferencia de carga del ánodo y el cátodo.

El sobrepotencial óhmico mostrado en la Ecuación 2.18 es generado por la resistencia eléctrica en los electrodos, electrolitos y membranas. Se calcula como el producto de la corriente por la resistencia óhmica total, que es la suma de las resistencias individuales de cada componente.

$$V_{\text{ohmic}} = I(R_{\text{ele}} + R_{\text{ely}} + R_{\text{mem}}) \quad (2.18)$$

- I = Corriente en amperios.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

- R_{ele} = Resistencia debida al electrodo.
- R_{ely} = Resistencia debida al electrolito.
- R_{mem} = Resistencia debida a la membrana.

La resistencia del electrodo es la suma de la resistencia eléctrica del ánodo y del cátodo. Esta resistencia depende de la longitud, el área y la resistividad del material del electrodo, y se determina mediante la Ecuación (2.19).

$$V_{a,c} = \frac{\rho_{\text{eff}-a,c} t_{a,c}}{A_{a,c}} \quad (2.19)$$

- ρ_{eff} = Resistencia efectiva del electrodo.
- $t_{a,c}$ = Grosor del electrodo.
- $A_{a,c}$ = Sección transversal del electrodo.

2.8 Modelo Hammerstein.

El modelo Hammerstein es una estructura ampliamente utilizada para representar sistemas no lineales cuya dinámica puede ser descrita de manera lineal. Este modelo consiste en la conexión en serie de dos bloques: un bloque estático no lineal, que procesa la señal de entrada de forma instantánea, y un bloque dinámico lineal, que describe el comportamiento temporal del sistema. Esta estructura resulta especialmente útil cuando la no linealidad del sistema se presenta principalmente en la entrada, mientras que la dinámica del proceso puede aproximarse mediante un modelo lineal ((Billings y Fakhouri, 1978^[29])

).

Una de las principales ventajas del modelo Hammerstein es su simplicidad estructural, lo que permite separar el tratamiento de la no linealidad y la dinámica. Esta separación facilita tanto la identificación del sistema como su posterior análisis o control. Por ejemplo, la parte no lineal puede modelarse mediante funciones polinómicas, redes neuronales o interpolaciones, mientras que la parte dinámica puede representarse mediante funciones de transferencia, modelos ARX, o representaciones en espacio de estados ((Enqvist y Ljung, 2012^[30])

).

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

El uso de modelos Hammerstein se recomienda especialmente cuando se dispone de datos experimentales del sistema, ya que estos modelos se identifican empíricamente a partir de observaciones de entrada y salida. La precisión del modelo depende en gran medida de la calidad de los datos y de la adecuada elección de las estructuras para los bloques no lineal y lineal ((Risuleo et al., 2015^[31])

).

Además, en comparación con modelos puramente no lineales o modelos completamente lineales, los modelos Hammerstein ofrecen una buena relación entre complejidad y capacidad de representación. Al concentrar la no linealidad en una sola parte del sistema, se reduce el número total de parámetros a estimar y se mejora la interpretabilidad del modelo, al mismo tiempo que se mantiene una alta fidelidad en la representación del comportamiento del sistema ((Kumar et al., 2023^[32])

).

En los últimos años, se han propuesto diversas técnicas de identificación para modelos Hammerstein, incluyendo métodos basados en mínimos cuadrados, optimización heurística y enfoques bayesianos, que han ampliado su aplicabilidad y robustez ((Mehmood et al., 2022^[33])

). Estas metodologías permiten adaptar el modelo a sistemas complejos y con alta variabilidad, manteniendo una estructura comprensible y eficaz para fines de simulación y control.

2.9 Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano, compuestas por capas de nodos interconectados que permiten aprender patrones complejos a partir de datos. Su capacidad para aproximar funciones no lineales las hace especialmente útiles en el modelado de sistemas dinámicos y procesos donde las relaciones entre variables no son evidentes ni lineales ((Schmidgall et al., 2023^[34])

).

En años recientes, las RNA han evolucionado significativamente, incorporando arquitecturas más profundas y técnicas de aprendizaje avanzadas que mejoran su desempeño y eficiencia. Estas mejoras han ampliado su aplicabilidad en diversos campos, desde la ingeniería hasta las ciencias naturales ((Wang et al., 2023^[35])

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

).

El proceso de entrenamiento de una RNA implica ajustar los pesos de las conexiones entre nodos para minimizar el error entre las salidas predichas y los valores reales. Este proceso requiere un conjunto de datos representativo y, preferentemente, preprocesado adecuadamente. La normalización de los datos de entrada es una práctica común que mejora la convergencia del entrenamiento y evita que variables con diferentes escalas dominen el aprendizaje ((Freire et al., 2024^[36])

).

Además, las RNA modernas han incorporado mecanismos inspirados en procesos biológicos, como la plasticidad sináptica y el aprendizaje hebbiano, lo que ha permitido desarrollar modelos más robustos y adaptativos. Estas características son especialmente valiosas en entornos dinámicos y sistemas con alta variabilidad ((Lagani et al., 2023^[37])

).

Existen diversas arquitecturas de redes neuronales artificiales, cada una diseñada para resolver tipos específicos de problemas. Entre las más utilizadas se encuentran las redes feed-forward, las redes recurrentes (RNN), las redes convolucionales (CNN) y las redes neuronales profundas (DNN).

La arquitectura feedforward es la más sencilla y común. En este tipo de red, la información fluye en una sola dirección, desde las entradas hacia las salidas, sin ciclos ni retroalimentación. Está compuesta típicamente por una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Esta estructura permite aproximar funciones complejas de manera eficiente, lo que la hace adecuada para tareas de regresión y clasificación no lineales ((Wu, Zhou y Zhang, 2023^[38])

; (Yusof, Abd Rahman y Hassan, 2023^[39])

).

Una de las principales ventajas de las redes feedforward es su simplicidad y estabilidad durante el entrenamiento. Además, pueden entrenarse con algoritmos como el retropropagación del error (backpropagation), lo que permite ajustar los pesos de manera eficiente minimizando la función de error ((Lopes, Almeida y Antunes, 2023^[40])

).

En comparación, las RNN incorporan conexiones hacia atrás que permiten el procesamiento de datos secuenciales, mientras que las redes convolucionales CNN son especialmente eficaces para el procesamiento de datos espaciales o imágenes. Sin embargo, cuando se trata de

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

modelar relaciones estáticas no lineales, como las que se presentan en la etapa no lineal de un modelo Hammerstein, las redes feedforward son generalmente preferidas por su capacidad de generalización y bajo costo computacional ((Huang et al., 2023^[41])).

2.10 Convertidor de potencia.

Los convertidores de potencia son dispositivos esenciales en la electrónica de potencia, utilizados para transformar y controlar la energía eléctrica de una forma a otra. Estos convertidores son fundamentales en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas de energía renovable hasta vehículos eléctricos y equipos industriales. Existen diferentes tipos de convertidores, como los convertidores DC-DC, AC-DC, DC-AC y AC-AC, cada uno diseñado para cumplir funciones específicas, . ((Canasí Piñeiro, Rodríguez Álvarez y Ravelo Artiles, 2023^[42])).

2.10.1 Convertidor Buck

El convertidor *buck*, también conocido como convertidor reductor, es un tipo de convertidor DC-DC que disminuye la tensión de entrada a un nivel inferior en la salida. Su funcionamiento se basa en la conmutación rápida de un interruptor, un diodo, un inductor y un condensador, lo que permite una conversión eficiente de energía.

Ventajas:

- **Alta eficiencia:** Debido a su naturaleza conmutada, los convertidores *buck* pueden alcanzar eficiencias superiores al 90 %.
- **Diseño compacto:** La alta frecuencia de conmutación permite el uso de componentes pasivos de menor tamaño.
- **Regulación precisa de la tensión de salida:** Mediante el control del ciclo de trabajo del interruptor, se puede mantener una tensión de salida estable.

Desventajas:

- **Generación de interferencias electromagnéticas (EMI):** La conmutación rápida puede introducir ruido en el sistema, requiriendo filtrado adicional.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

- **Complejidad en el control:** Requiere circuitos de control más sofisticados en comparación con reguladores lineales ((Yi y Wang, 2023^[43])
).

Capítulo III. Estado del arte.

El hidrógeno se está convirtiendo en una opción cada vez más viable como sustituto de los combustibles fósiles, que están agotando rápidamente sus reservas y generando consecuencias devastadoras para el medio ambiente, ((Durbin y Malardier-Jugroot, 2013^[5])

). La energía del hidrógeno se ha convertido en una de las más significativas a medida que la demanda actual aumenta, ya que es un vector energético limpio y eficiente. A pesar de ser una sustancia altamente inflamable, el hidrógeno se considera una opción viable como combustible sustituto de los combustibles fosiles debido a su alta eficiencia energética, que es hasta tres veces superior en comparación con los combustibles tradicionales, y lo más importante, su uso no genera emisiones contaminantes, contribuyendo significativamente a la reducción de la huella de carbono, ((Sazali, 2020^[44])

). Aunque sus principales usos siguen siendo en la refinación de petróleo, la producción de amoníaco, la refinación de metales y la fabricación de productos electrónicos, con un consumo mundial promedio de alrededor de 40 millones de toneladas, el hidrógeno tiene un gran potencial como fuente de energía en el futuro, ((Youssef Naimi y Amal Antar, 2018^[15])

3.1 Reactor de electrólisis

En el trabajo de ((Salazar, Solis y Vines, 2020^[45])

) se desarrolló un reactor electrolítico de agua con el objetivo de maximizar su eficiencia, basándose en principios físicos y químicos. El diseño mecánico se enfocó en optimizar el proceso de electrólisis, reduciendo el sobrecalentamiento del reactor, la evaporación del agua y las pérdidas de energía debidas a las corrientes de Foucault, las cuales dependen de la geometría de las celdas. El reactor fue diseñado considerando una batería de 12 V y 20 A, que fue utilizada en el estudio. La geometría del reactor fue redonda, ya que las formas con esquinas generan pérdidas energéticas debido a la acumulación de campos electromagnéticos en los vértices, lo que provoca una distribución no uniforme de la corriente. El diseño consistió en 13 placas con 3 electrodos, con el fin de mantener un voltaje de 2 V entre las placas.

Se calculó un radio teórico de 56 mm para mantener una densidad de corriente de 1000 A/m², aunque la implementación final fue de 75 mm debido a limitaciones mecánicas. Se utilizó

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

acero inoxidable 316 L, con una resistencia eléctrica entre 700 y 780 $\mu\Omega$. Como electrolito, se empleó una solución de *KOH* con una concentración del 10 %. Las pruebas realizadas al reactor mostraron una eficiencia medida del 98.68 %.

En ((Brauns y Turek, 2020^[46])

), se menciona que usualmente se utiliza una solución acuosa de *KOH* con una concentración entre el 20 % y el 30 % en peso. Esto se debe a que, en el rango de temperaturas de 50 a 80 °C, este electrolito presenta una conductividad específica óptima. Como alternativa más económica, puede utilizarse *NaOH* en solución diluida, aunque con una conductividad menor.

Un aspecto importante para la pureza del hidrógeno generado es la solubilidad de los gases en el electrolito utilizado. A medida que aumenta la concentración del electrolito, la solubilidad de los gases disminuye debido al fenómeno de salinización. En este sentido, el *KOH* resulta más ventajoso que el *NaOH*, ya que este último presenta un efecto de salinización más marcado. Como consecuencia, las soluciones de *KOH* permiten una menor solubilidad de los gases, lo que contribuye a obtener un hidrógeno de mayor pureza.

Como lo muestran los autores en ((Mazloomi et al., 2013^[14])

), se han investigado las respuestas de celdas electrolíticas bajo electrólisis pulsada, utilizando un *MOSFET* de resistencia ultrabaja como interruptor en el circuito catódico, operando en frecuencias de 0 Hz a 2 MHz. Este dispositivo, accionado con una señal cuadrada al 50 % de ciclo de trabajo, permitió analizar configuraciones variadas de electrodos y molaridades del electrolito.

Los experimentos incluyeron mediciones de corriente y tensión ajustadas matemáticamente, y revelaron que la celda presenta un comportamiento de impedancia no lineal, contrario a su tratamiento convencional como carga óhmica. Tras determinar la frecuencia de resonancia, se comparó la potencia requerida en modos continuo y pulsado, confirmando la complejidad dinámica del sistema (ver Figura 3.1).

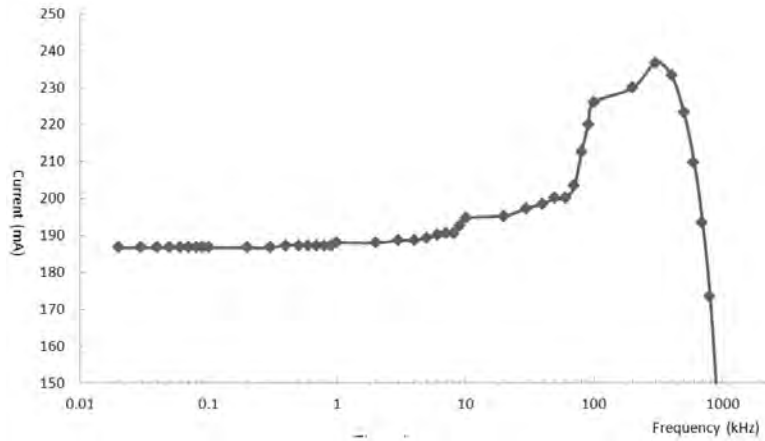


Figura 3.1: Corriente de la celda muestreada en función de la frecuencia ((Mazloomi et al., 2013^[14])).

3.2 Pilas de combustible de membrana electrolítica de polímero

La implementación de sistemas energéticos basados en hidrógeno en la industria es una de las aplicaciones más destacadas de este elemento, debido a su capacidad de ahorrar energía y su respeto por el medio ambiente ((Sazali, 2020^[44])).

Entre los sistemas más utilizados se encuentran las pilas *PEM*, que funcionan a bajas temperaturas y presentan una eficiencia de hasta el 65 %, produciendo únicamente agua como subproducto.

Las pilas de combustible *PEM* se caracterizan por utilizar membranas de intercambio de protones para conducir protones y separar los reactivos gaseosos en el *ánodo* y el *cátodo*. Sin embargo, estas pilas de combustible suelen requerir electro-catalizadores costosos, principalmente platino, para catalizar las reacciones electroquímicas a bajas temperaturas. Esta situación ha sido un obstáculo significativo para su adopción generalizada en la industria automotriz ((Wang et al., 2021^[47])).

).

La producción, almacenamiento, transporte y utilización del hidrógeno presentan desafíos significativos en materia de seguridad debido a sus características intrínsecas. En particular, el hidrógeno es un gas inflamable, de baja densidad, inodoro e incoloro, lo que dificulta su

detección y puede provocar su ignición cuando se mezcla con una fracción volumétrica de aire. Además, en comparación con el gas natural, el hidrógeno puede provocar una ignición espontánea al entrar en contacto con chispas o superficies calientes ((Yang et al., 2021^[48])

). Por tanto, es necesario abordar los problemas de seguridad asociados con el almacenamiento y transporte del hidrógeno para su implementación en vehículos.

3.3 Mezcla de hidrógeno o *HHO* con combustibles fósiles.

Una línea importante de investigación dedicada a la implementación de hidrógeno en la industria automotriz se enfoca en la mezcla de combustible convencional con hidrógeno puro o *HHO*. El gas *HHO* constituye un combustible sin carbono que se genera a través de electrólisis del agua. Este compuesto puede servir como sustituto del hidrógeno, debido a que la producción y almacenamiento a nivel global de hidrógeno, posiblemente, no sean suficientes para atender las necesidades en términos de aplicaciones de transporte ((Paparao y Murugan, 2022^[49])

).

En el trabajo de ((Al-Rousan, 2010^[50])

) se centró en la inyección de *HHO* en un motor monocilíndrico de 197 *CC* (Honda G 200) operando a velocidades entre 1000 y 2500 *rpm* y utilizando celdas de electrólisis de diferentes tamaños con el fin de evaluar la inyección de *HHO* en el motor. Los resultados indican que la celda con medio metro cuadrado de área de contacto produjo los mejores resultados y sugirieron que un mayor dopaje de hidrógeno puede ser perjudicial. Los autores reportan una mejora en la eficiencia del frenado del motor de entre el 3 % y el 8 %, mientras que la eficiencia térmica del motor no presenta diferencias significativas entre las diferentes celdas. Además, con la inyección de *HHO* lograron una disminución en la temperatura del escape, lo que sugiere una mejor combustión y emisiones de gases más limpios.

En el trabajo de ((Badr, Hassan y EL-Hamalawy, 2015^[51])

) se empleó un reactor electrolítico para generar gas *HHO*, que se mezcló con gasolina en tres tipos distintos de automóviles de pasajeros, todos equipados con motores de cuatro cilindros y cuatro tiempos. Los autores mostraron una reducción de hasta el 12 % en las emisiones de *CO*, un aumento del 11 % en la presencia de oxígeno y una reducción máxima

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

del 35 % en las emisiones de hidrocarburos a 2420 *rpm*. A pesar de que la inyección de *HHO* mejora tanto la eficiencia del motor como las emisiones de gases, los autores concluyen que es necesario controlar la cantidad de *HHO* generado, ya que un exceso puede provocar una aceleración de la detonación y provocar lo que se conoce como "golpeteo del motor".

En el trabajo de ((Aldhaidhawi et al., 2017^[52])

) involucró el uso de una mezcla de Diesel y Biodiesel con hidrógeno entre un 0 y 5 % en un motor de tractor de cuatro cilindros y cuatro tiempos. Aunque no se observaron cambios significativos en el rendimiento del motor, si los hubo en las emisiones medidas. Con el motor a 1400 *rpm* alimentado con Biodiesel e hidrógeno al 4.7 % las emisiones de óxidos de nitrógeno (*NOx*) disminuyeron hasta un 17.4 % en comparación al Diesel. Además, se encontró que la adición de hidrógeno al Diesel y Biodiesel también resultó en una reducción significativa de hasta un 25 % en los hidrocarburos no quemados (*THC*).

En el trabajo de ((Ismail et al., 2018^[53])

) se utilizó un electrolizador con celda seca para la generación de 0.375 litros por minuto de *HHO* de forma constante para mezclarlo con un motor de gasolina de un (Chevrolet Lanos 1.5 modelo 2012). Se utilizó un *PWM* para controlar la corriente de alimentación al electrolizador, con el fin de mantener la producción de hidrógeno constante. Los resultados indican una disminución del 15 % en el consumo de combustible, del 17 % en la emisión de monóxido de carbono (*CO*), 27 % en la emisión de hidrocarburos, un incremento del 15 % en el oxígeno y un aumento del 1 % en la emisión de dióxido de carbono (*CO2*), también demuestra que la incorporación de gas *HHO* en la mezcla de combustible y aire genera de manera instantánea un efecto de aumento en el índice de octanaje de cualquier tipo de combustible.

En el trabajo de ((Aydin y Kenanoğlu, 2018^[54])

) se realizó un estudio en el que se investigó la mezcla entre *HHO* generado a través de electrólisis controlada y gas natural en un motor de encendido por chispa y la mezcla de *HHO* con Diesel en otro motor de encendido por compresión. En el primer motor, se logró un aumento del 32.4 % en la eficiencia del par motor y un aumento del 27 % en la potencia en comparación con la inyección de gasolina pura. Además, se observó una reducción del 14.4 % en las emisiones de *CO* y una disminución promedio del 6.7 % en las emisiones de hidrocarburos. Los autores observaron que, a bajas velocidades, el *HHO* reduce la eficiencia volumétrica del motor y aumenta las emisiones de hidrocarburos. En el segundo motor, el par motor se incrementó en promedio un 19.1 %, la potencia del motor incrementó en un 27 %

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

con respecto al funcionamiento del Diesel estándar, las emisiones de CO se redujeron en un 13.5 % y el consumo de combustible se redujo en un 14 %.

En el trabajo de ((Escobar-Jiménez et al., 2020^[16])

) la investigación se dedica al control del generador electrolítico que inyecta HHO en un motor NISSAN de 1.6 L y 78 kW funcionando a velocidad del cigüeñal entre 1050 y 2800 rpm , sin carga. Los resultados experimentales controlando la generación de HHO muestran un aumento del 1.2 % y un 18.1 % en las eficiencias de combustión y la térmica, también se mostró un aumento del 22.98 % en la potencia del frenado, así como una reducción del consumo de gasolina del 2.2 %. Estos experimentos también mostraron que el consumo de gasolina puede aumentar en un 7.18 % si no se regula la alimentación del hidrógeno.

En el trabajo de ((Darmawa, Wiryanta y Sutarna, 2021^[55])

) utilizó un electrolizador que proporcionó un flujo constante de 2.56 mL/s de gas HHO en una mezcla de gasolina en un motor monocilíndrico de 4 tiempos y 110 CC . Los resultados mostraron que la concentración media de CO disminuyó en un 0.47 % y la emisión media de hidrocarburos disminuyó en un 34.5 %.

Las investigaciones previas han demostrado que el uso de hidrógeno o HHO en la combustión permite un menor consumo de combustible y, por lo tanto, un aumento en la eficiencia del motor, así como una reducción en las emisiones al medio ambiente. Sin embargo, en ((Escobar-Jiménez et al., 2020^[16])

) y ((Aydin y Kenanoğlu, 2018^[54])

) se centran en el control preciso de la cantidad de hidrógeno inyectada para optimizar el rendimiento del motor.

3.4 Otras aplicaciones del hidrógeno.

En el trabajo de ((Kumar, 2017^[56])

) se describe el uso del gas HHO generado por electrólisis para soldadura. El reactor de electrólisis emplea placas de acero inoxidable y un sistema de electrodos que operan con voltaje continuo entre 6 y 12 V , a través de un convertidor $AC-DC$ que asegura una operación constante del sistema. Este proceso produce una llama neutra, ideal para soldaduras en ambientes cerrados sin consumir oxígeno ni liberar contaminantes. Sin embargo, el convertidor de potencia es lineal, poco eficiente y no cuenta con un control automatizado de la generación de gas, ya que se ajusta manualmente mediante el voltaje.

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

En ((Nabil y Dawood, 2019^[57])

) los autores trabajaron en el diseño de un destilador solar híbrido con apoyo de gas *HHO*, fue diseñado para optimizar la destilación de agua. La energía solar calienta el agua y alimenta paneles que cargan baterías de 12 V, 65 Ah. Estas baterías suministran energía a un reactor de electrólisis capaz de generar 11 L/min de *HHO*, utilizado como combustible para aumentar la temperatura de destilación. Aunque el sistema cuenta con un control para regular el suministro de *HHO*, no se especifica la técnica de control empleada, ni el voltaje entre celdas o el uso de técnicas de optimización energética como *MPPT* en los paneles solares. El sistema híbrido alcanza una producción diaria de 19.1 L, superando significativamente los 3.9 L del destilador solar básico.

En ((Paparao y Murugan, 2022^[58])

) se trabajó el uso del gas *HHO* como sustituto del acetileno en aplicaciones de soldadura y corte. Observaron que, al alcanzar una temperatura de 2800 °C, la llama de *HHO* era recta y concentrada en la zona de trabajo, con una alta velocidad de combustión y mínimas pérdidas de calor. Además, el uso de *HHO* redujo la desviación del metal, no produjo cambios de color en el material y permitió cortes y soldaduras precisos, con superficies lisas y uniformes. Se utilizó *NaOH* a una concentración de 10 g/L. La temperatura de la llama del gas *HHO* dependía del material. La corriente y el voltaje suministrados al generador de *HHO* fueron de hasta 6.6 A y 220 V respectivamente. La generación de *HHO* máxima fue de 8.3 LPM.

En el trabajo presentado por ((Sudhakar y Vijayaragavan, 2024^[59])

) se investigó el rendimiento de la desalinización del agua de mar utilizando dos alambiques solares idénticos de una sola pendiente, utilizando en uno de ellos un electrolizador, este fabricado de acero inoxidable 316L, este se alimentó con 12 V y 40 A. Se demostró que el uso del electrolizador generó un aumento de la producción del 48 % en comparación al alambique que no lo utiliza. El análisis económico reveló que el sistema híbrido con electrolizador tiene un periodo de amortización muy corto, de 1.5 días, aproximadamente 90 días menos que el sistema sin electrolizador.

En los últimos años, se ha llevado a cabo una amplia investigación sobre diversas técnicas de control para la generación de *HHO* sobre demanda. Estas técnicas abarcan desde el uso de un circuito integrado *NE555* ((Aydin y Kenanoğlu, 2018^[54])

), máquinas de estado ((Baltacıoğlu, 2019^[60])

), controladores *PID* ((Worawat Ss-Ngiamvibool, 2015^[61])

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

), controladores *fuzzy* ((Conker, 2019^[62])
) , controladores *PID* auto adaptativos difusos ((Conker y Baltacioglu, 2020^[63])
) , control predictivo de modelos (*MPC*), controladores *PID* sintonizados a través de una red neuronal ((Cervantes-Bobadilla et al., 2018^[6])
) , hasta la implementación de un *SoC Core* dedicado en un *FPGA* ((Kumar y Kumar, 2015^[64])
) . Todas estas investigaciones se centran exclusivamente en el control de las celdas de electrólisis. Sin embargo, para el suministro de la energía, la mayoría de los estudios se basan en el uso de un *MOSFET* como elemento de potencia, como se muestra en la figura 3.2.

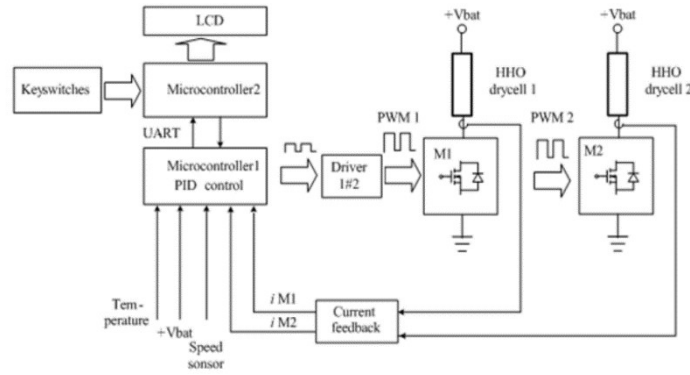


Figura 3.2: Control para dos celdas electrolíticas ((Worawat Ss-Ngiamvibool, 2015^[61])
).

3.5 Convertidores de potencia para electrólisis.

El convertidor de potencia es un elemento fundamental en la electrólisis que puede afectar tanto la calidad de la energía como la eficiencia y el costo del sistema. Por lo tanto, es necesario seleccionar la mejor topología de acuerdo con las necesidades específicas de la aplicación. En virtud de que un alto porcentaje de las fallas en los sistemas de electrólisis se encuentran en los interruptores de potencia, debido a esto se realizan investigaciones para desarrollar algoritmos orientados a la detección de fallas, y diseños tolerantes a fallos ((Guilbert et al., 2016^[65])

).

Los autores en ((Guilbert, Collura y Scipioni, 2017^[66])

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

) realizaron un análisis exhaustivo sobre las distintas topologías de convertidores utilizados en procesos de electrólisis, poniendo un énfasis particular en los convertidores *Buck*, tanto los que incluyen aislamiento galvánico como los que no lo poseen. En el estudio destacaron la capacidad de los convertidores *Buck* para reducir eficientemente los altos voltajes generados por fuentes de energía renovable, como paneles solares y aerogeneradores, antes de conectarlos a las celdas de electrólisis. De acuerdo con los autores, esta reducción de voltaje es crucial para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro del electrolizador, evitando posibles daños por sobrecarga. El estudio menciona que si bien los convertidores *Buck* analizados no están diseñados específicamente para regular la generación de hidrógeno, los estudios realizados identificaron características clave como eficiencia energética, ondulación de la corriente de salida, relación de voltaje, confiabilidad y costo.

En esta investigación los autores concluyen que los convertidores intercalados con ciclo de trabajo extendido y los de medio puente representan las opciones más equilibradas.

Los convertidores aislados ofrecen una ventaja significativa al poder ajustar el voltaje, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo según los requisitos de la aplicación. Además, proporcionan protección y emplean técnicas de conmutación suave que mejoran tanto la eficiencia como la frecuencia de operación, lo que permite reducir el tamaño, los costos y los problemas relacionados con la interferencia electromagnética.

El trabajo de ((Cheng et al., 2025^[67])

) propone un modelo para reactores de electrólisis que considera la curva de polarización, el efecto de doble capa capacitiva y su no linealidad para el diseño del controlador del convertidor de potencia. Este controlador está diseñado para trabajar mediante análisis de frecuencia, reemplazando los controladores convencionales de corriente. En la investigación utilizaron dos reactores electrolíticos: el primero, un reactor electrolítico de celda seca con 11 celdas en serie y una área de 2480 cm², operando a 500 A, 20 V, 90 °C y 1.6 MPa, utilizando una solución de 28 % de KOH; y el segundo, un reactor *PEM* con 40 celdas en serie y una área de 850 cm², operando a 90 A, 40 °C y 1.2 MPa. El sistema emplea un convertidor *DC/DC* tipo *Buck* con 4 módulos en paralelo, diseñado para manejar altas corrientes (500 A) y bajas tensiones (20 V). Cada módulo opera a 15 kHz y mantiene un desfase para reducir el rizado del convertidor de potencia.

El controlador del convertidor de potencia es un PI y regula la potencia en lugar de la corriente. Adicionalmente, se incluyó un cero compensador para optimizar la respuesta del

controlador. El control propuesto ajustó de manera experimental la potencia en 0.266 s y 0.21 s en sistemas electrolíticos de 10 kW y PEM de 5 kW, respectivamente, considerando que sin el control propuesto el tiempo de ajuste era de 21 s.

En ((Gautam y Bhat, 2012^[68])

) se estudia la generación de hidrógeno a través de fuentes de energía renovable. Los autores compararon distintas configuraciones de convertidores DC-DC conmutados suavemente para aplicaciones en electrolizadores alcalinos. El sistema probado utiliza un electrolizador alcalino Stuart SRA de 6 kW, capaz de generar hasta 900 L/h de hidrógeno con un rango de voltaje de entrada de 42-56 V. El reactor incluye sistemas de purificación de agua e hidrógeno, compresión hasta 17 bares y monitoreo de seguridad integrado.

En el estudio, fueron evaluadas tres configuraciones de convertidores: un convertidor resonante serie-paralelo (*LCL SRC*) con filtro capacitivo, otro con filtro inductivo, y un puente completo PWM con cambio de fase. Las pruebas mostraron que el *LCL SRC* con filtro capacitivo tuvo el mejor desempeño al lograr conmutación a voltaje cero (ZVS) en todo el rango de carga, especialmente cuando se utilizó un convertidor boost ZVT en una etapa previa para incrementar la eficiencia. El diseño óptimo logró reducir las pérdidas energéticas y mantener una eficiencia alta, destacando su viabilidad para aplicaciones de almacenamiento de energía renovable y electrólisis de hidrógeno. Las características evaluadas incluyeron eficiencia energética, ondulación de corriente, relación de voltaje y costo, identificándose los convertidores intercalados como los más equilibrados en términos de rendimiento.

3.6 Conclusiones del estado del arte.

El hidrógeno, o gas *HHO*, tiene múltiples aplicaciones, y su generación bajo demanda elimina la necesidad de almacenamiento, como se destaca en el estado del arte. Existen investigaciones centradas en técnicas de generación de *HHO* bajo demanda, pero suelen enfocarse exclusivamente en el control del sistema, dejando de lado el aspecto del suministro energético. Por otro lado, se han desarrollado estudios enfocados en convertidores de potencia para la generación de *HHO* a partir de fuentes de energía renovable. Estos trabajos priorizan la eficiencia del convertidor con el objetivo principal de maximizar la producción de *HHO* para su almacenamiento. Sin embargo, las investigaciones que abordan la generación de *HHO* bajo demanda no integran el diseño o implementación de convertidores de potencia, mientras que los estudios sobre convertidores de potencia se enfocan en la producción masiva de *HHO* para

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

su almacenamiento. Esto evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones que combinen ambas áreas, aplicando convertidores de potencia para optimizar la generación de *HHO* bajo demanda.

Capítulo IV. Caso de estudio.

4.1 Sistema de electrólisis e instrumentación.

Con el objetivo de contar con una base experimental que permitiera la implementación de convertidores de potencia y estrategias de control del proceso de producción de HHO bajo demanda, se construyó un banco de pruebas compuesto por un sistema de electrólisis. Se utilizó un reactor electrolítico comercial, cuyas características físicas se presentan en la Tabla 4.1. Este banco de pruebas se encuentra instalado en el Tecnológico Nacional de México, campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), en Cuernavaca, Mor.

Tabla 4.1: Características del reactor electrolítico adquirido

Placas neutras	20
Electrodos	25
Área de contacto por placa	78.54 cm ²
Área de contacto total	1963.5 cm ²
Separación entre placas	2 mm
Voltaje de operación	12 V
Potencia de operación	180 W
Generación de HHO	0.48 LPM

El banco de pruebas se instrumentó con diversos sensores para monitorear y controlar el reactor de electrólisis, se empleó un sensor de temperatura infrarrojo MLX90614, con un rango de -70°C a 382.2°C, para medir la temperatura. La presión fue registrada por el sensor analógico XGZP6847, capaz de medir entre 0 y 20 *kPa* en relación a la presión atmosférica. La corriente eléctrica se midió mediante un sensor diferencial de efecto Hall CSLA2CE, que detecta de 0 *A* a 92 *A*. Finalmente, el flujo de hidrógeno fue cuantificado por el sensor analógico FMA-A2310-H2, con capacidad de medir hasta 15 litros por minuto. El procesamiento de las señales provenientes de los sensores son procesadas a través de una PCB que implementa un DSP y acondicionamiento analógico.

El banco de prueba se ilustra en la Figura 4.1. Este incorpora un tanque en la parte superior, el cual almacena el agua con la solución de electrolito y funciona como burbujeador

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

para separar el gas del agua, este gas fluye a través de una unidad de mantenimiento la cual seca el gas, ya que la humedad puede deteriorar o dañar el sensor de Flujo de Hidrógeno.

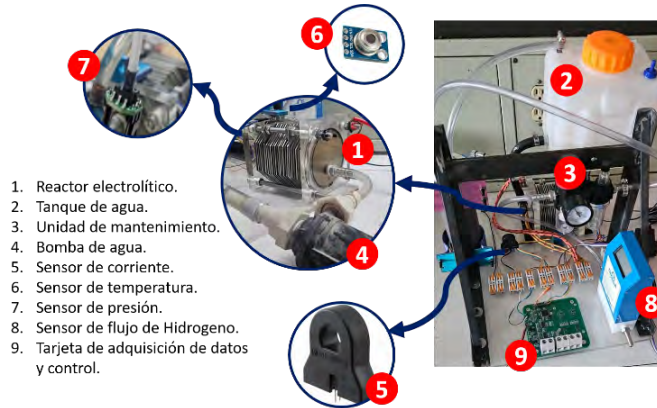


Figura 4.1: Ensamble del sistema de electrólisis.

El reactor se encuentra configurado con 25 electrodos y 20 placas neutras, manteniendo una separación constante entre ellas, lo cual permite obtener un voltaje de aproximadamente 2,V entre placas al ser alimentado con 12,V, valor que corresponde al voltaje comúnmente utilizado en estos sistemas para mantener una alta eficiencia. Un mayor voltaje entre placas reduce drásticamente la eficiencia del proceso. Además, se ajustó la concentración del electrólito, ya que, como mencionan en ((Brauns y Turek, 2020^[46])

; (Cervantes-Bobadilla et al., 2018^[6])

; (Mamoon et al., 2011^[10])

), la concentración está directamente relacionada con la conductividad del sistema. Como se menciona en ((Brauns y Turek, 2020^[46])

), la concentración óptima del electrólito es del 30 %, por lo que se optó por usar esta concentración de KOH. Tener una concentración óptima de electrólito es fundamental para mejorar la conductividad de la solución, mejorar la eficiencia en la producción de HHO y reducir el consumo energético. Además, minimiza los sobrepotenciales y mantiene la estabilidad del proceso, evitando problemas como el sobrecalentamiento del sistema.

Las primeras pruebas se realizaron siguiendo las recomendaciones del fabricante, utilizando una concentración de *KOH* al 2.5 % y alimentando el reactor con 12 V de corriente continua. Bajo estas condiciones, se obtuvo un flujo constante de 0.35 L/min, con un consumo de 168

W. Cabe mencionar que el fabricante sugiere conectar el reactor directamente a la batería del automóvil sin proporcionar un controlador específico para la generación de HHO , ni alguna forma de acondicionar el voltaje de entrada.

4.2 Modelado del reactor electrolítico.

Actualmente, existen modelos matemáticos basados en leyes físicas para reactores de electrolisis, pero estos suelen ser estáticos y, por tanto, insuficientes para diseñar estrategias de control que requieran predecir la evolución temporal de las variables de proceso. Una alternativa ampliamente utilizada es el modelo Hammerstein, que consta de un bloque estático no lineal en cascada con un bloque dinámico lineal.

El bloque estático no lineal captura las relaciones algebraicas o no lineales entre entradas y salidas en régimen permanente, mientras que el bloque dinámico lineal describe la respuesta temporal del sistema mediante una función de transferencia. Esta separación estructural ofrece varias ventajas frente a otros enfoques (por ejemplo, ARX, ARMAX o modelos puramente físicos):

1. Flexibilidad: la no linealidad del primer bloque puede aproximarse con técnicas de aprendizaje (p. ej. redes neuronales, polinomios generalizados), lo que permite modelar fenómenos complejos sin necesidad de explicitarlos físicamente.

2. Simplicidad en la identificación: al aislar la no linealidad estática, la identificación del bloque dinámico se reduce a optimizar parámetros de una función de transferencia lineal, lo cual suele requerir menos datos y resulta computacionalmente más eficiente.

3. Mejor desempeño en control: al contar con un modelo que reproduce tanto la no linealidad como la dinámica, es posible diseñar controladores que optimicen la respuesta transitoria y el régimen permanente, algo que un modelo puramente estático o un modelo lineal único no pueden garantizar.

Para emplear un modelo Hammerstein es imprescindible disponer de datos experimentales representativos del sistema bajo estudio. En la práctica, se varían de forma controlada una o varias entradas para entrenar el bloque estático, posteriormente se realizan pruebas dinámicas para estimar la función de transferencia del bloque lineal.

Se emplea un DSP para la generación de la señal PWM y gestionando las señales de los sensores. Los datos se transfieren a LabVIEW, donde se ha diseñado una interfaz gráfica para monitorear el sistema, la interface y el código para el monitoreo se ilustra en el Apéndice A.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

Además de almacenar la información en un archivo de Excel para su posterior procesamiento. La PCB utilizada y el esquemático se presenta en el Apéndice B. y el código para el microcontrolador se encuentra en el Apéndice C.

En este trabajo, se adopta esta técnica para modelar el reactor electrolítico (Figura 4.2), combinando una red neuronal Feedforward para el bloque no lineal y técnicas de identificación clásica para la función de transferencia de ganancia unitaria del bloque dinámico.

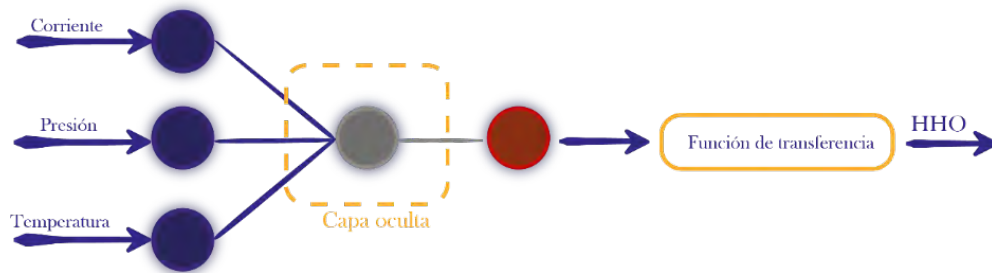


Figura 4.2: Modelo Hammerstein para modelado del reactor electrolítico.

4.2.1 Identificación de frecuencia de conmutación.

Realizar un análisis de frecuencia permite encontrar posibles frecuencias de resonancia o la frecuencia óptima en la que el sistema tiene menores pérdidas en la generación de hidrógeno. Para identificar la frecuencia de operación adecuada, se realizó un barrido de frecuencia desde 1 kHz hasta los 10 kHz , con un ciclo de trabajo del 50 %. En cada intervalo se tomaron 120 muestras con intervalos de 300 ms estos se graficaron en la Figura 4.3. La gráfica A muestra el comportamiento del flujo de salida en función de los cambios de frecuencia, mientras que la gráfica B presenta la variación de la corriente consumida por el reactor de electrólisis bajo las mismas condiciones.

Durante el estudio se identificó una caída abrupta en la producción de hidrógeno a partir de los 8 kHz . Para analizar este comportamiento, se monitoreó la corriente del reactor en un osciloscopio a dicha frecuencia, como se muestra en la Figura 4.4. En la gráfica superior (trazo verde) se observa la señal de control de alimentación del reactor electrolítico, un tren de pulsos PWM con un ciclo de trabajo del 50 %. En la gráfica inferior (trazo amarillo), correspondiente a la corriente, se aprecia que esta no logra conmutar a la misma frecuencia, lo que evidencia una limitación en la respuesta dinámica del sistema.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

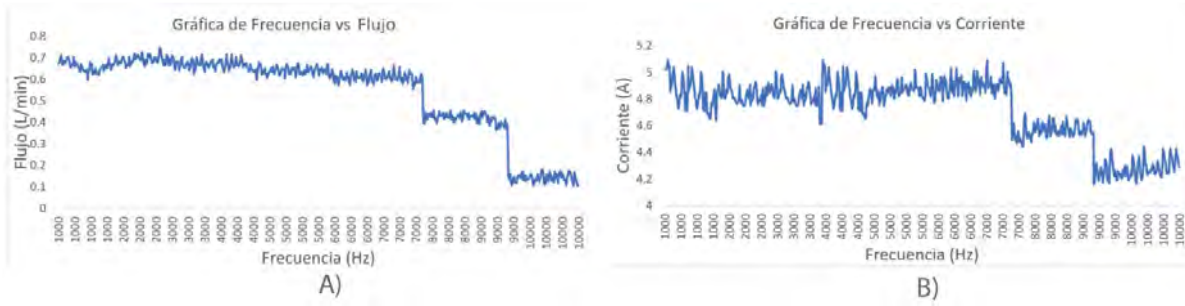


Figura 4.3: Análisis de frecuencia del reactor electrolítico

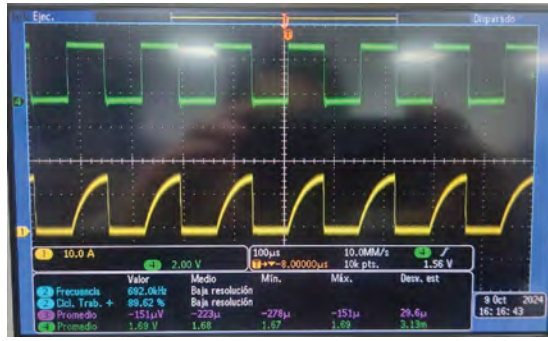


Figura 4.4: Pulso de corriente en reactor de electrolisis a 8 kHz

Se observa como la corriente decrece de forma instantánea, lo que sugiere que los efectos capacitivos del reactor podrían estar generando esta respuesta en la corriente, ya que la generación se mantiene prácticamente constante a baja frecuencia se optó por mantener una generación a 1 kHz para reducir la carga computacional en el microcontrolador. Esta frecuencia será utilizada tanto para la alimentación del reactor durante el modelado, como en la implementación del sistema de control final, asegurando así un comportamiento dinámico estable y eficiente durante la operación del sistema.

4.2.2 Modelo Hammerstein del reactor electrolítico.

El modelo Hammerstein se utiliza para representar sistemas dinámicos no lineales, la respuesta del sistema se describe como la combinación de dos partes: una componente estática no lineal y una dinámica lineal conectadas en cascada.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

4.2.2.1 No linealidad estática.

Para identificar la primera etapa del modelo, se empleó una RNA, para ello es necesario obtener datos experimentales del sistema de electrólisis, tratando de abarcar el rango de operación en el que se trabajará. Se utilizó una señal cuadrada a 1 kHz , variando el ciclo de trabajo desde el 30 % hasta el 90 % con una corriente RMS de entre 1.8 A y 11 A de forma ascendente y descendente en incrementos del 10 %, la Figura 4.5 A) muestra el comportamiento de esta corriente. Como se puede observar la Figura 4.5 B) muestra el comportamiento de la presión en el reactor electrolítico el cual presenta una presión máxima de 3.08 kPa y una presión mínima de 2.05 kPa , se observa que existe una correspondencia del incremento de la presión a medida que incrementa la corriente, esto se debe a que existe una mayor producción de HHO , esta misma relación se observa en el decremento de corriente, ya que la producción de HHO y su flujo no es lineal, se pueden observar perturbaciones en la presión. De acuerdo con la Figura 4.5 C), existe una tendencia del incremento de la temperatura, la cual no disminuye si se disminuye la corriente, esto se debe a que el reactor presenta un comportamiento resistivo, y disipa calor de forma proporcional a la potencia suministrada, en las pruebas experimentales realizadas no se logró observar el punto de estabilización de dicha temperatura, ya que la tasa de disipación de calor al ambiente no alcanza el equilibrio con el calor generado en la resistencia. Finalmente, la Figura 4.5 D) muestra el flujo de HHO , el cual presenta una alta correlación con la corriente; sin embargo, también se ve influenciado por las variaciones en la temperatura y la presión.

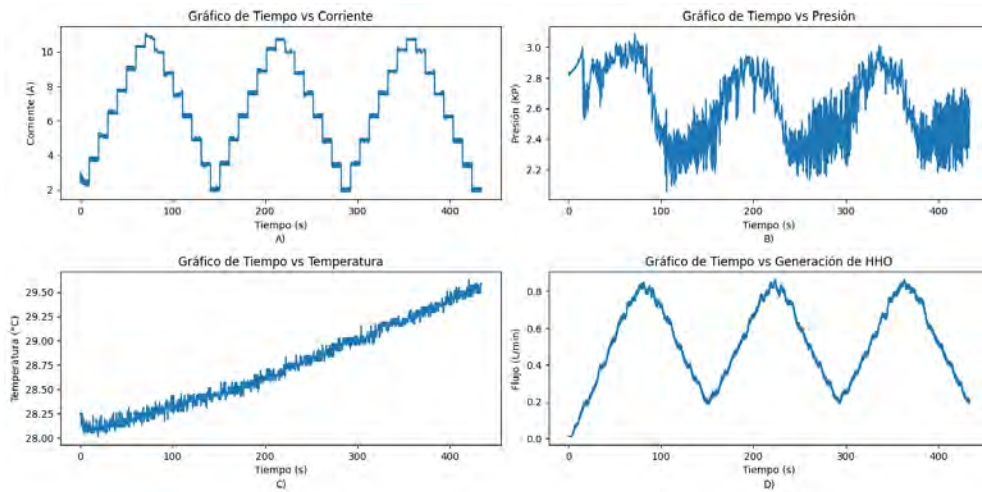


Figura 4.5: Datos extraídos del reactor electrolítico para el entrenamiento de la RNA

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

Como se muestra en la Figura 4.6, los datos fueron normalizados con el fin de ajustar sus características dentro de un rango específico y reducir el impacto de las diferencias en escala y magnitud entre variables. Este proceso es fundamental al utilizar redes neuronales artificiales, ya que evita que atributos con valores numéricamente grandes dominen el proceso de aprendizaje, lo que podría sesgar el ajuste de los pesos sin representar su verdadera importancia. Además, la normalización contribuye a una convergencia más rápida y estable durante el entrenamiento, mejorando la precisión del modelo y facilitando el uso de funciones de activación como la tangente hiperbólica o la sigmoide, que son sensibles a la escala de los datos de entrada.

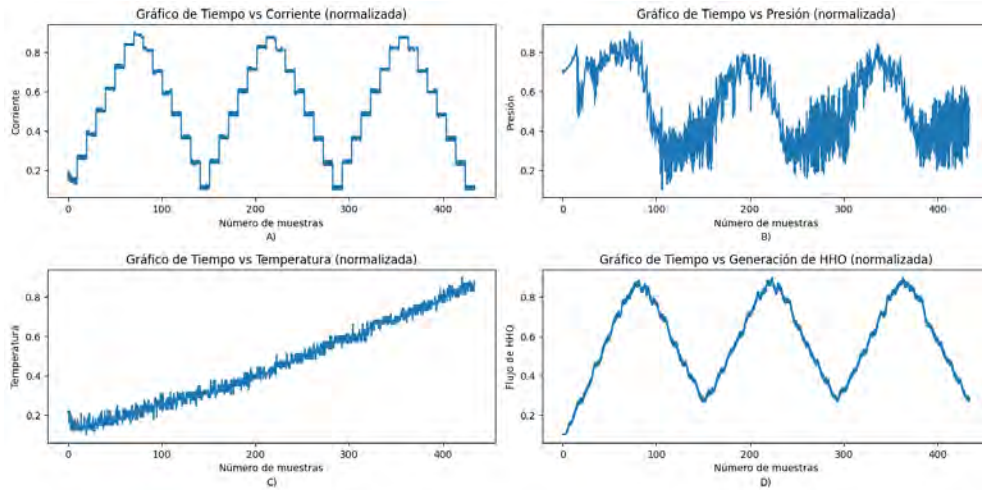


Figura 4.6: Datos extraídos del reactor electrolítico para el entrenamiento de la RNA Normalizados

Los datos obtenidos se dividieron en 2 grupos, el 80 % de los datos se usa para entrenamiento y en 20 % para la validación. Se entrenó una RNA con 3 entradas y una capa oculta con 1 neurona. La Tabla 4.2 muestra los Pesos y Bias de la RNA seleccionada, y la Ecuación 4.1 muestra la función que representa la RNA.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

Tabla 4.2: Parámetros entrenados de la RNA: pesos y bias de las capas oculta y de salida

Pesos de la capa oculta	Neurona 1
Entrada 1	1.149460
Entrada 2	0.108840
Entrada 3	-0.375539
Bias de la capa oculta	Neurona 1
	-0.447049
Pesos de la capa de salida	Neurona 1
	0.848668
Bias de la capa de salida	Neurona 1
	0.513512

$$\begin{aligned}
 \text{Flujo}_{HHO} = & \text{Peso}_{N.oculta} * \tanh \left((\text{Corriente} * \text{Peso}_{\text{Entrada1}}) + \right. \\
 & (\text{Temperatura} * \text{Peso}_{\text{Entrada2}}) + \\
 & \left. (\text{Presión} * \text{Peso}_{\text{Entrada3}}) + \text{Bias}_{\text{Oculta}} \right) + \text{Bias}_{\text{Salida}}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Después del entrenamiento, el modelo se validó utilizando el 20 % de los datos restantes. Para ello, se introdujeron las variables de entrada en la RNA y se comparó la salida generada con los valores medidos experimentalmente de la generación de HHO. La Figura 4.7 muestra esta comparación: en color azul se presenta la estimación proporcionada por la RNA, mientras que en color naranja se muestra la medición obtenida directamente del reactor. De forma gráfica, se puede observar que ambas curvas presentan una alta similitud, lo que sugiere un buen desempeño del modelo.

Este comportamiento también se refleja en los indicadores estadísticos obtenidos durante la validación: el error cuadrático medio es una herramienta utilizada para evaluar la precisión de un modelo predictivo, midiendo el promedio de los errores al cuadrado entre los valores predichos por el modelo y los valores reales (MSE), este fue de 0.0028, el coeficiente de determinación (R^2) alcanzó un valor de 0.942, lo que indica una alta correlación entre la salida estimada y la medición real. La pendiente de la regresión fue de 0.933 con un intercepto de 0.0341, lo que indica una buena linealidad entre ambos conjuntos de datos.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

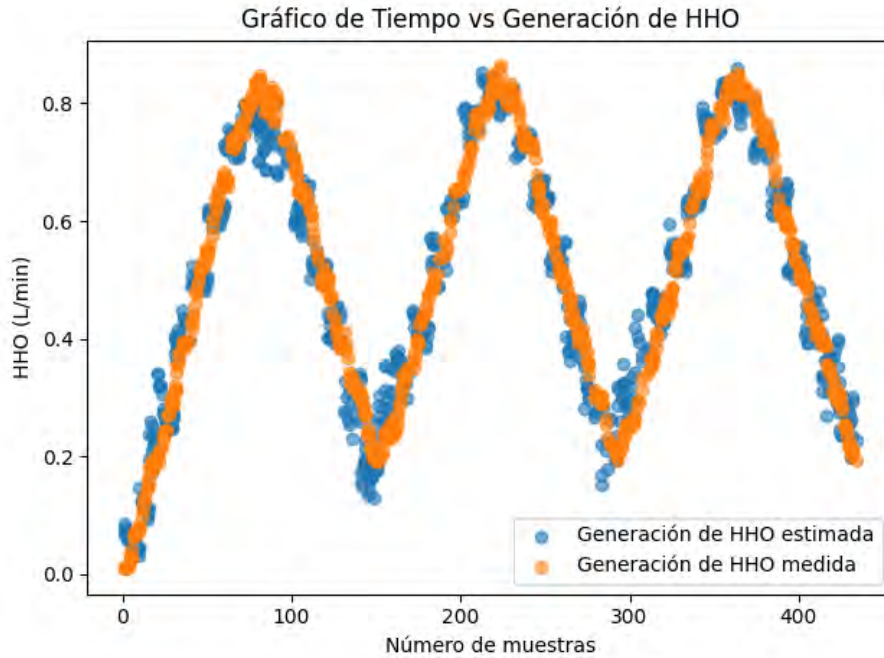


Figura 4.7: Comparacion entre estimacion de la RNA y medicion de HHO en la validacion de la RNA.

Una vez entrenada la red neuronal, se obtuvieron 14,000 nuevos datos del sistema de electrólisis para poner a prueba su capacidad de generalización con datos no vistos previamente. La Figura 4.8 presenta estos datos. La Gráfica A muestra la corriente RMS medida en el sistema, la cual fue ajustada mediante la modulación del ancho de pulso. La Gráfica B presenta la variación de presión registrada en la salida del reactor. La Gráfica C ilustra el incremento de temperatura en las placas del reactor durante la operación. Finalmente, la Gráfica D representa la medición del flujo de HHO generado, mostrando la relación entre las variables de entrada y la producción del gas, los datos se normalizaron y luego se ingresaron en la RNA las variables de corriente, presión y temperatura. Posteriormente, se compara la salida de la RNA con los valores de generación de HHO medido, como se muestra en la Figura 4.9.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

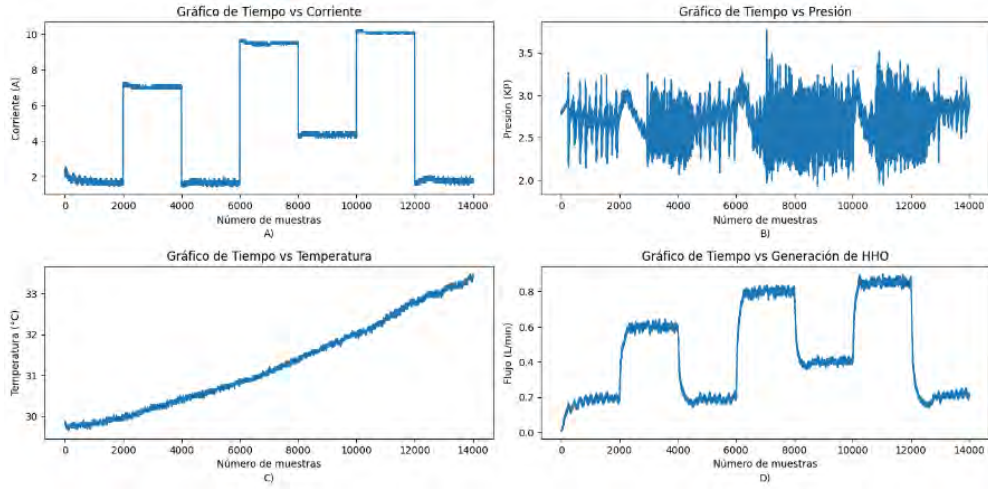


Figura 4.8: Datos extraídos del reactor electrolítico para validar la RNA

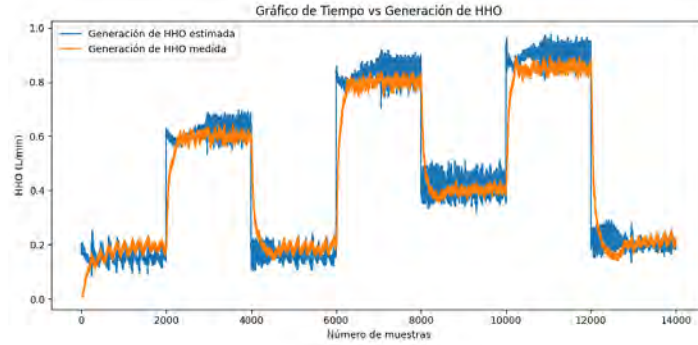


Figura 4.9: Comparación de la red neuronal y la producción de HHO medida

El Error Cuadrático Medio se utilizó para validar el desempeño de la *RNA* entrenada, comparando las predicciones del modelo con los datos experimentales. Los resultados obtenidos indican un Error Cuadrático Medio de 0.0035, lo cual es un valor bajo considerando que los datos se encuentran entre 0 y 1. Este resultado muestran que la red neuronal presenta un buen desempeño, con errores pequeños en sus predicciones respecto a los valores reales.

El uso de una red neuronal artificial tipo Feedforward permitió modelar con precisión la relación no lineal entre las variables de operación del reactor electrolítico y la generación de HHO. La validación del modelo mostró una alta capacidad de generalización, con errores bajos y un ajuste gráfico adecuado entre las predicciones y las mediciones reales.

4.2.2.2 Linealidad dinámica.

Para identificar la linealidad dinámica del modelo, se realizaron experimentos utilizando una señal binaria pseudoaleatoria (PRBS) como entrada. Esta señal fue generada con una amplitud de 12 V y una frecuencia de 100 Hz. Inicialmente, se intentó emplear una frecuencia de 1 kHz, ya que esta se utilizó previamente para el modelado de la RNA. Sin embargo, a esta frecuencia, los cambios dinámicos en el flujo de HHO no son observables de manera adecuada, debido al tiempo que el gas requiere para circular a través del sistema. Al utilizar una frecuencia de 100 Hz, dichos cambios pudieron ser captados correctamente por el sensor de flujo. Durante el experimento, se midieron la corriente de entrada al reactor y el flujo de salida, recopilando un total de 1000 datos.

Posteriormente, se utilizó el identificador de sistemas de *MATLAB* para obtener una función de transferencia con tres polos y dos ceros. Esta función de transferencia muestra un comportamiento de atenuación. Para integrar esta función en el modelo Hammerstein, es necesario que tenga una respuesta unitaria. Por ello, se realizó un ajuste de ganancia estática, dividiendo los términos del numerador y denominador evaluados en $s = 0$. La función resultante, mostrada en la Ecuación (4.2), representa la linealidad dinámica del modelo.

$$H(s) = 18.1839 \cdot \frac{1.3842 s^2 + 1296.086 s + 18097.78}{s^3 + 382.864 s^2 + 32532.444 s + 329089.062} \quad (4.2)$$

Para validar el modelo, se compara la salida de la función de transferencia con los datos medidos. En la Figura 4.10, la gráfica A, se muestra la corriente suministrada tanto para modelar como para alimentar la función de transferencia generada. En la gráfica B, se presenta el flujo medido utilizado para el modelado, comparado con el flujo estimado por la función de transferencia. El modelo obtuvo un error cuadrático medio (ECM) de 0.0013 y un porcentaje de ajuste (*fit percentage*) de similitud del 85.4 %.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

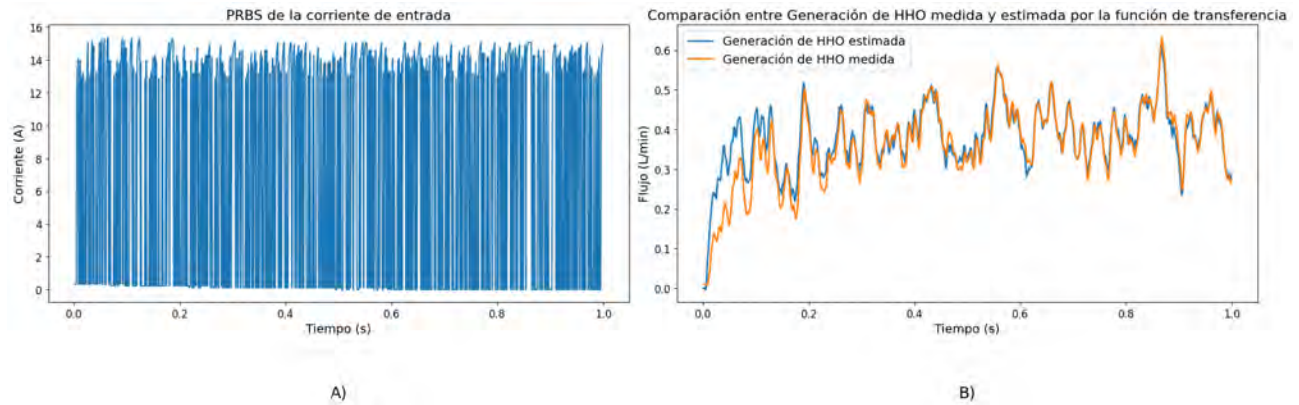


Figura 4.10: Comparación de la función de transferencia y la producción de HHO medida utilizando una señal de corriente PRBS como entrada

4.2.2.3 Validación del modelo Hammerstein.

Para realizar la validación del modelo completo, se integraron la RNA y la función de transferencia en *Simulink*. Se utilizaron los mismos datos empleados previamente en la validación de la RNA, mostrados en la Figura 4.8, como entrada para evaluar el desempeño del modelo combinado. Esto permitió una comparación directa entre el comportamiento de un modelo estático (solo la RNA) y el modelo dinámico completo (Hammerstein). La Figura 4.11 muestra la generación de HHO estimada por el modelo Hammerstein en comparación con el flujo medido del electrolizador.

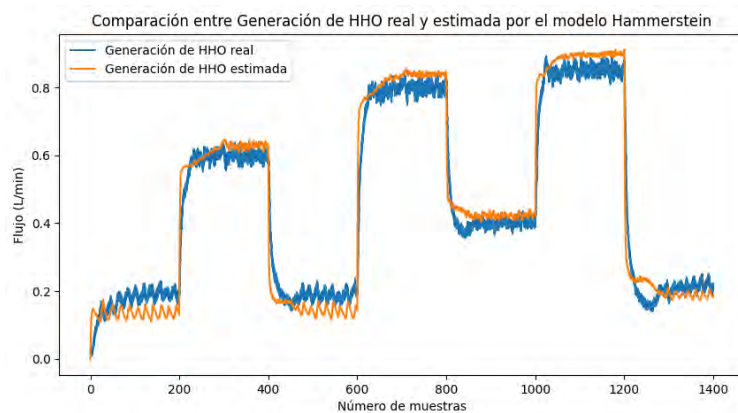


Figura 4.11: Comparación del modelo Hammerstein y la producción de HHO medida.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

Se observa una mejora significativa en la respuesta del modelo al incorporar la dinámica del sistema mediante la función de transferencia. Mientras que el modelo basado únicamente en la RNA presentaba limitaciones al momento de seguir los transitorios del sistema, el modelo Hammerstein logra capturar tanto la no linealidad estática como la dinámica del proceso, lo que se traduce en una mayor precisión en la predicción del comportamiento del sistema real. Esto se refleja en un ajuste (*fit*) de 81.9 %, evidenciando la capacidad del modelo propuesto para representar de forma más fiel la generación de HHO bajo diferentes condiciones de operación.

Finalmente, la validación realizada demuestra que el modelo Hammerstein no solo mejora la precisión del sistema bajo condiciones estacionarias, sino también durante los cambios dinámicos, lo cual es crucial para su futura implementación en esquemas de control en tiempo real. Este comportamiento permite considerar al modelo como una herramienta robusta y confiable para simular, analizar y eventualmente optimizar el desempeño del electrolizador en diferentes escenarios de operación.

4.3 Convertidor de potencia.

Generalmente, la alimentación de un reactor electrolítico con voltaje pulsado para generar HHO sobre demanda generalmente se realiza mediante fuentes de voltaje lineal. Estas fuentes son preferidas por su estabilidad, ya que a diferencia de los convertidores conmutados al conmutar la carga no cause un aumento en el voltaje de salida, oscilaciones, ruido y sobrecalentamiento. Sin embargo, es importante señalar que suelen ser menos eficientes en comparación con los convertidores conmutados. La topología seleccionada para el convertidor es un *buck* de dos ramas, como se muestra en la Figura 4.12. Esta configuración facilita la división de la corriente y la escalabilidad del diseño para reactores más grandes, optimizando así el rendimiento del sistema. Asimismo, se ajusta la referencia de voltaje del convertidor para alimentar el reactor con voltaje pulsado a una frecuencia de 1 *kHz*, evitando los problemas asociados con la conmutación directa de la carga en un convertidor conmutado mencionados previamente. Los componentes del convertidor se calculan en función del consumo eléctrico del reactor en lazo abierto. La Tabla 4.3 presenta los parámetros a considerar para el diseño del convertidor *buck*, así como los valores comerciales más cercanos para el inductor y el capacitor calculados.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

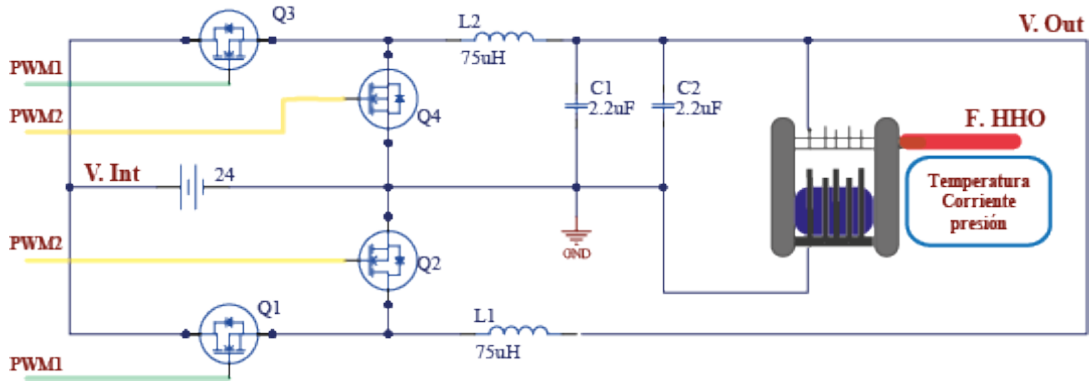


Figura 4.12: Conexión del reactor electrolítico con el convertidor de potencia.

Parámetros de diseño	Valor
Frecuencia	200 kHz
V. entrada	24 V
V. salida	12 V
Potencia	96 W
ΔI_{out}	5 %
ΔV_{out}	1 %
L	75 μ H
C	2.2 μ F
R_L	32.35 m Ω
R_C	68.5 m Ω

Tabla 4.3: Parámetros de diseño del sistema

Se diseñaron dos nuevas tarjetas electrónicas debido a que las versiones anteriores estaban destinadas únicamente a la adquisición de datos, sin incluir el módulo de conversión de potencia. La nueva propuesta integra en un mismo sistema tanto la adquisición de datos como el control y accionamiento del convertidor buck, lo que permite una arquitectura más compacta, eficiente y adecuada para las pruebas experimentales del sistema completo.

La primera tarjeta está dedicada al control del convertidor de potencia. En ella se encuentran los componentes encargados de la conmutación, como los transistores de potencia, inductores, capacitores de filtrado, drivers y terminales de salida. La segunda tarjeta cumple funciones de adquisición de datos, procesamiento y control, e integra el DSP principal que

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

regula el funcionamiento del convertidor, además de circuitos de acondicionamiento de señal y conectores para sensores de corriente, voltaje, temperatura y presión.

Estas tarjetas fueron diseñadas para ensamblarse de forma modular, como se observa en la Figura 4.13, lo que permite una mayor flexibilidad en pruebas, mantenimiento y futuras ampliaciones del sistema. En dicha figura se muestra la vista superior del sistema ensamblado. En la parte inferior se identifican los inductores de potencia, los capacitores de salida y los terminales de conexión de alta corriente. En la parte superior se encuentra la zona de adquisición de datos y control, con el microcontrolador, los amplificadores operacionales y los conectores para sensores y comunicación.

Los esquemáticos completos de ambas tarjetas se presentan en el Apéndice E y el código ensamblador correspondiente al DSP se encuentra en el Apéndice F.



Figura 4.13: Acoplamiento de tarjetas de control y potencia para el sistema de electrolisis.

4.3.1 Convertidor en lazo abierto.

El análisis del convertidor en lazo abierto es un paso fundamental para comprender su comportamiento dinámico y establecer las bases para el diseño del sistema de control. Este análisis permite evaluar la respuesta natural del convertidor ante variaciones en la carga o en el ciclo de trabajo sin la intervención de un controlador, identificando posibles problemas de estabilidad, oscilaciones, sobreimpulsos o tiempos de respuesta inadecuados. En particular, al operar el convertidor con un ciclo de trabajo fijo, se puede observar su desempeño en condiciones ideales y bajo perturbaciones, como la conmutación de carga. Este tipo de análisis

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

es útil para caracterizar el sistema, verificar el correcto dimensionamiento de los componentes pasivos (como el inductor y el capacitor), y anticipar comportamientos no deseados que podrían comprometer el rendimiento del control en lazo cerrado.

Como se muestra en la Figura 4.14, el convertidor en lazo abierto con un ciclo de trabajo fijo en la conmutación y una carga estable alcanza los 12 V durante los primeros 250 μ s.

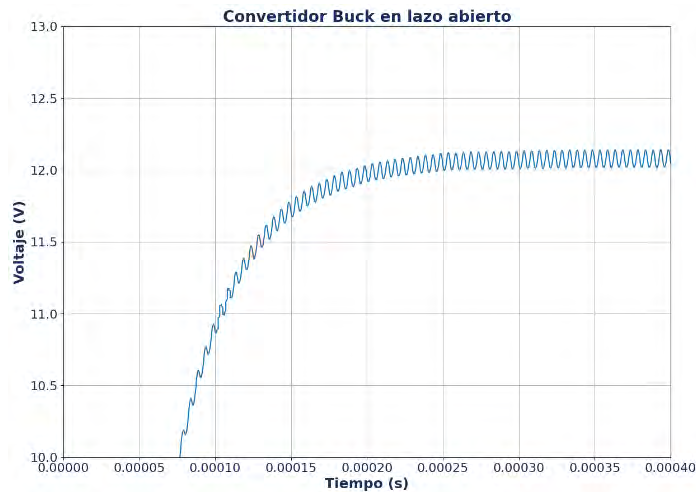


Figura 4.14: Voltaje en convertidor Buck en lazo abierto.

Cuando se conmuta la carga a 1 kHz con un ciclo de trabajo del 50 %, como se muestra en el esquema de la Figura 4.15, el convertidor se vuelve inestable, tal como se ilustra en la Figura 4.16.

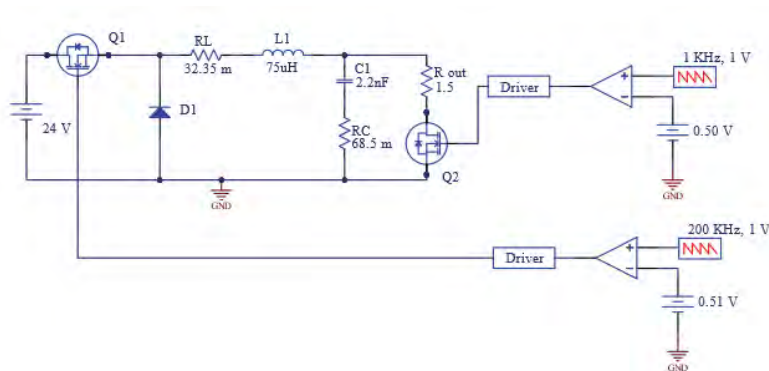


Figura 4.15: Esquemático del convertidor en lazo abierto.

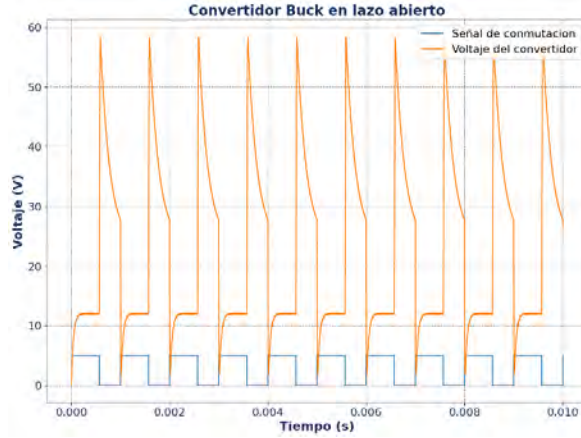


Figura 4.16: Voltaje del convertidor en lazo abierto al conmutar la carga.

4.3.2 Convertidor en lazo cerrado.

Para implementar un controlador sobre el convertidor de potencia es necesario conocer la función de transferencia que rige su comportamiento, en este caso dicha función es de 2do orden como se muestra en la Ecuación (4.3).

$$H(s) = \hat{V}_O / \hat{d} = V_{in} \left(\frac{1 + \frac{S}{S_{z1}}}{1 + \frac{S}{Q\omega_0} + \frac{S^2}{\omega_0^2}} \right) \quad (4.3)$$

Donde el cero de la función está determinado por la Ecuación (4.4).

$$S_{z1} = \frac{1}{R_C * C} \quad (4.4)$$

La frecuencia angular de la función está determinada por la Ecuación (4.5).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{1 + \frac{R_L}{R_{out}}}{1 + \frac{R_C}{R_{out}}} \right)} \quad (4.5)$$

El sobre impulso de la función está determinado por la Ecuación (4.6).

$$Q = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{R_L + R_{out}}{L \left[C(R_L + R_{out}) \left(R_C + \frac{R_L R_{out}}{R_L + R_{out}} \right) \right]} \quad (4.6)$$

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

Sustituyendo las Ecuaciones (4.4), (4.5), (4.6) en la Ecuación (4.3), y reemplazando los valores de los componentes empleados, se obtiene la función de transferencia control salida del convertidor *Buck* propuesto mostrada en la Ecuación (4.7).

$$H(s) = \frac{3.617 \times 10^{-6}S + 24}{1.689 \times 10^{-10}S^2 + 4.916 \times 10^{-5}S + 1} \quad (4.7)$$

Se plantean tres controladores para el convertidor de potencia: PI, PID y un compensador de tercer orden con el fin de evaluar su respuesta ante perturbaciones de voltaje, en la carga y el seguimiento del voltaje de referencia.

4.3.2.1 Control PI.

El controlador PI se sintoniza gráficamente utilizando su diagrama de Bode, buscando la estabilidad mediante el margen de fase del convertidor, que en este caso es de 30° , y minimizando el error en estado estable. Se identifica gráficamente la frecuencia en la cual la fase es de -145° . Con esta frecuencia, se determina la magnitud en ese punto, como se muestra en la Figura 4.17. Los valores de T_i y K_p se calculan utilizando las Ecuaciones (4.8) y (4.9).

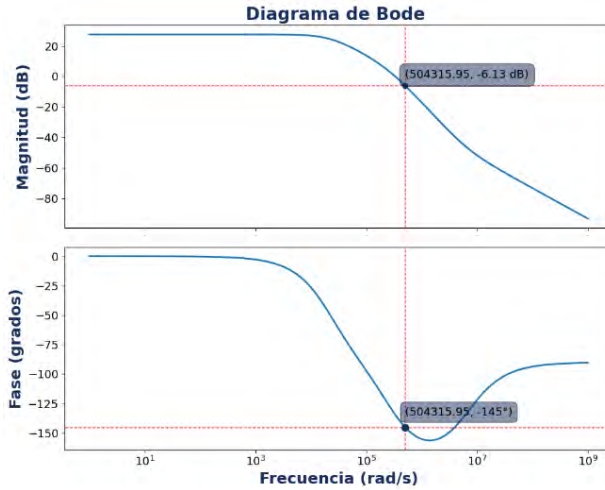


Figura 4.17: Diagrama de Bode en lazo abierto del convertidor de potencia.

$$T_i = \frac{10}{\text{Frec. de intersección}} = \frac{10}{504315.95} \approx 1.98 \times 10^{-5} \quad (4.8)$$

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

$$K_p = 10^{\left(\frac{-\text{Mag. intersección}}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{-6.13}{20}\right)} \approx 2.0247 \quad (4.9)$$

Por lo tanto, el convertidor en lazo cerrado está dado por la Ecuación (4.10):

$$G(s) = \frac{1.452 \times 10^{-10} S^2 + 0.0009709 S + 48.59}{3.349 \times 10^{-15} S^3 + 9.749 \times 10^{-15} S^2 + 1.983 \times 10^{-5} S} \quad (4.10)$$

4.3.2.2 Control PID.

El controlador PID se sintonizó a través del método de ubicación de polos. Se diseñó para un tiempo de establecimiento de $200 \mu s$ con un sobreimpulso máximo del 20 %. Con estos datos se estimó el factor de amortiguamiento ζ a través de la Ecuación (4.11):

$$\zeta = \sqrt{\frac{\log^2\left(\frac{M_p}{100}\right)}{\pi^2 + \log^2\left(\frac{M_p}{100}\right)}} = \sqrt{\frac{\log^2\left(\frac{20}{100}\right)}{\pi^2 + \log^2\left(\frac{20}{100}\right)}} = 0.455 \quad (4.11)$$

Admitiendo una tolerancia del 5 %, se calcula la frecuencia natural ω_n , como se muestra en la Ecuación (4.12):

$$\omega_n = \frac{3}{\zeta \cdot T_s} = \frac{3}{0.456 \cdot 200 \times 10^{-6}} = 6.579 \times 10^4 \quad (4.12)$$

Utilizando la ecuación característica de una función de transferencia de segundo orden y los parámetros calculados, se obtiene un par de polos complejos conjugados para el controlador:

$$G_d(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{4.329 \times 10^9}{s^2 + 60 \times 10^3 s + 4.329 \times 10^9} \quad (4.13)$$

$$P_{1,2} = -3 \times 10^4 \pm 5.8559 \times 10^4 i \quad (4.14)$$

El tercer polo del controlador se coloca a una frecuencia diez veces mayor que la de los polos principales, con el fin de evitar que afecte al comportamiento del convertidor:

$$P_3 = -3 \times 10^5 \quad (4.15)$$

Una vez obtenidos los polos, se convierten de nuevo en un polinomio y se calculan las constantes del controlador, como se muestra en las Ecuaciones (4.16) y (4.17), igualando la

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

ecuación en lazo cerrado con el polinomio deseado, de acuerdo con la Ecuación (4.18).

$$P_d = (s^2 + 60 \times 10^3 s + 4.329 \times 10^9)(s + 3 \times 10^5) \quad (4.16)$$

$$P_d = s^3 + 360 \times 10^3 s^2 + 22.329 \times 10^9 s + 1.2987 \times 10^{15} \quad (4.17)$$

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K}{s^2 + as + b} \quad (4.18)$$

El controlador PID se expresa como:

$$C(s) = \frac{d_2 s^2 + d_1 s + d_0}{s} \quad (4.19)$$

La función de transferencia en lazo cerrado es:

$$H(s) = \frac{k(d_2 s^2 + d_1 s + d_0)}{s^3 + (a + kd_2)s^2 + (b + kd_1)s + kd_0} \quad (4.20)$$

Igualando con el polinomio deseado:

$$s^3 + (a + kd_2)s^2 + (b + kd_1)s + kd_0 = s^3 + 360 \times 10^3 s^2 + 22.329 \times 10^9 s + 1.2987 \times 10^{15} \quad (4.21)$$

Se obtienen las constantes del PID:

$$k_c = \frac{a_2 - b}{k} = \frac{2.2329 \times 10^{10} - 1}{24} = 9.3038 \times 10^8 \quad (4.22)$$

$$\tau_i = \frac{k \cdot k_c}{a_3} = \frac{24 \cdot 9.3038 \times 10^8}{1.2987 \times 10^{15}} = 1.6122 \times 10^{-5} \quad (4.23)$$

$$\tau_d = \frac{a_1 - a}{k \cdot k_c} = \frac{360000 - 4.9164 \times 10^{-5}}{24 \cdot 9.3038 \times 10^8} = 1.6122 \times 10^{-5} \quad (4.24)$$

Finalmente, la función de transferencia del sistema en lazo cerrado queda expresada como:

$$H(s) = \frac{9.327 \times 10^{-7} s^3 + 6.247 s^2 + 3.873 \times 10^5 s + 2.233 \times 10^{10}}{2.904 \times 10^{-15} s^3 + 8.453 \times 10^{-10} s^2 + 1.719 \times 10^{-5} s} \quad (4.25)$$

4.3.2.3 Compensador de tercer orden.

Por último, el compensador de tercer orden esta implementado de forma analógica a través de un amplificador operacional como se muestra en la Figura 4.18. Este circuito incluye un modulador y un divisor resistivo, cuya dinámica debe incorporarse a la función de transferencia del convertidor, tal como se indica en la Ecuación (4.28).

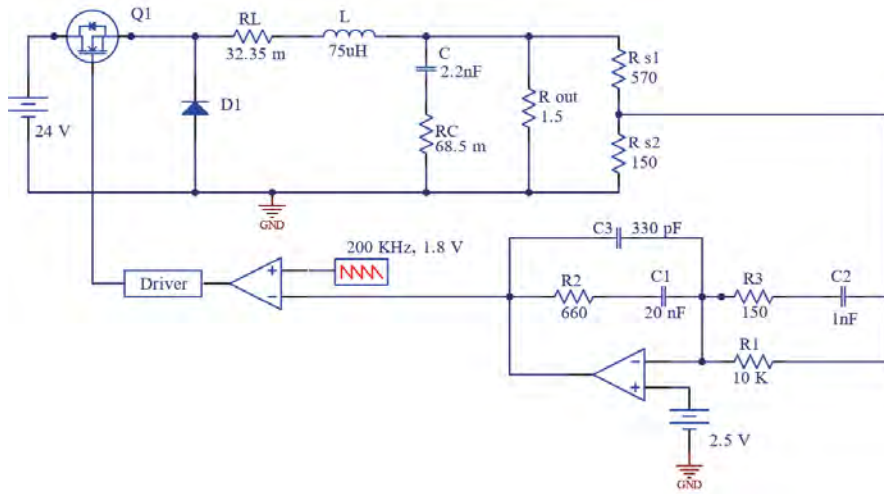


Figura 4.18: Convertidor Buck con compensador de tercer orden.

$$\text{Modulador} = \frac{1}{V_{pico}} = \frac{1}{1.8} \quad (4.26)$$

$$\text{Divisor} = \frac{D \cdot V_{pico}}{V_{out}} = \frac{0.51 \cdot 1.8}{12} \quad (4.27)$$

$$G(s) = \frac{3.325 \times 10^{-6}s + 22.07}{3.648 \times 10^{-9}s^2 + 0.001062s + 21.6} \quad (4.28)$$

El compensador se rige por la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{hlf}{s} \cdot \frac{(1 + \frac{s}{\omega_{z1}})(1 + \frac{s}{\omega_{z2}})}{(1 + \frac{s}{\omega_{p1}})(1 + \frac{s}{\omega_{p2}})} \quad (4.29)$$

Como criterios de control para el diseño, se propone utilizar los siguientes parámetros:

- $\omega_{p1} \gg \omega_0$

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

- $\omega_{p2} \approx \omega_0$
- $\omega_{z1} > \omega_0$
- $\omega_{z2} > \omega_{z1}$
- hlf se ajusta para controlar la ganancia

Las frecuencias seleccionadas son:

$$hlf = 5000, \quad \omega_{z1} = 7.8 \times 10^4, \quad \omega_{z2} = 9.7 \times 10^4, \quad \omega_{p1} = 4.166 \times 10^6, \quad \omega_{p2} = 7.158 \times 10^6$$

Se utilizan las siguientes ecuaciones para calcular los componentes del compensador (se propone $C_2 = 1 \text{ nF}$):

$$R_1 = \frac{\omega_{p2} - \omega_{z2}}{\omega_{p2} \cdot \omega_{z2} \cdot C_2} = 10169 \quad (4.30)$$

$$R_3 = \frac{1}{C_2 \cdot \omega_{p2}} = 139 \quad (4.31)$$

$$C_1 = \frac{\omega_{p1} - \omega_{z1}}{hlf \cdot \omega_{p1} \cdot R_1} = 19.2982 \times 10^{-9} \quad (4.32)$$

$$C_3 = \frac{C_1 \cdot \omega_{z1}}{\omega_{p1} - \omega_{z1}} = 368.215 \times 10^{-9} \quad (4.33)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1 \cdot \omega_{z1}} = 664 \quad (4.34)$$

Para implementar el compensador, es necesario utilizar valores comerciales para los componentes pasivos. Los valores seleccionados son:

$$R_1 = 10\text{k}, \quad R_2 = 660, \quad R_3 = 150, \quad C_1 = 20\text{nF}, \quad C_2 = 1\text{nF}, \quad C_3 = 330\text{pF}$$

La función de transferencia en lazo cerrado del convertidor es:

$$H(s) = \frac{2.198 \times 10^{-9}s^3 + 1.497 \times 10^{-5}s^2 + 2.569s + 1.103 \times 10^5}{1.223 \times 10^{-22}s^5 + 1.421 \times 10^{-15}s^4 + 4.052 \times 10^{-9}s^3 + 0.00107s^2 + 21.6s} \quad (4.35)$$

4.3.2.4 Análisis de los controladores del convertidor de potencia.

En la Figura 4.19, se muestran las respuestas del convertidor de potencia al ser controlado mediante tres estrategias distintas: un compensador de tercer orden, un controlador PI y un controlador PID. Todos los controladores fueron diseñados para regular la salida del convertidor a 12 V. Como se observa, los tres controladores logran alcanzar el valor deseado en un tiempo menor a 400 μ s, sin embargo, presentan diferentes comportamientos dinámicos.

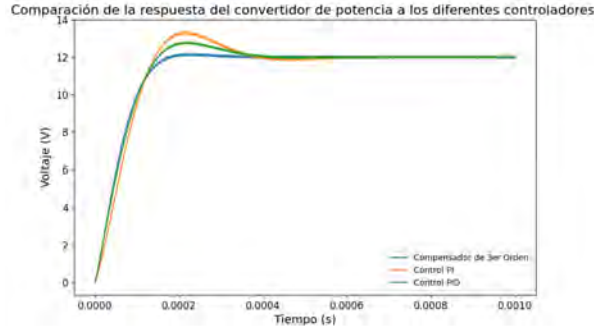


Figura 4.19: Respuesta escalón del convertidor de potencia implementando diferentes controladores.

El controlador PI presenta el mayor sobreimpulso, alcanzando 1.62 V (13.5 %), con un tiempo de establecimiento aproximado de 750 μ s. En comparación, el controlador PID reduce el sobreimpulso a 0.9 V (7.5 %) y mejora el tiempo de establecimiento a 600 μ s. Por su parte, el compensador de tercer orden logra una respuesta más amortiguada, con un sobreimpulso de tan solo 0.2 V (1.6 %) y un régimen transitorio más suave, estabilizándose a los 250 μ s. Este comportamiento es especialmente deseable en sistemas donde se busca minimizar el estrés eléctrico sobre los componentes y reducir el tiempo de asentamiento sin comprometer la estabilidad del sistema.

La Figura 4.20 complementa este análisis al mostrar la respuesta de los mismos controladores frente a una señal de referencia escalonada. La gráfica B) ilustra la señal de referencia que los controladores deben seguir, mientras que la gráfica A) presenta la respuesta

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

del sistema ante dicha referencia. Este tipo de prueba permite evaluar el seguimiento y la capacidad de adaptación ante cambios bruscos.

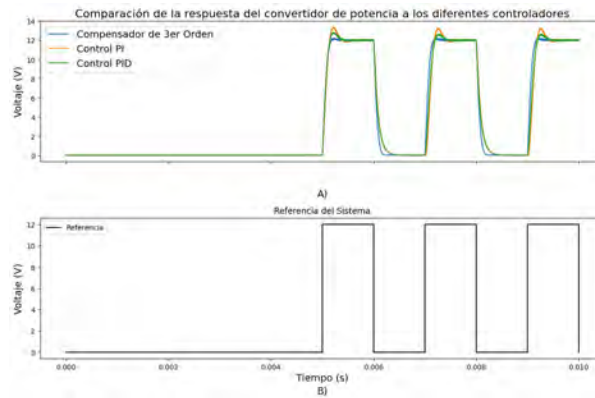


Figura 4.20: Comparación del desempeño de los controladores frente a cambios escalonados en la referencia del sistema.

Se observa que, aunque todos los controladores son capaces de seguir la referencia con cierta precisión, el controlador PI nuevamente presenta mayores sobreimpulsos en cada escalón, lo cual puede representar un riesgo en aplicaciones sensibles. El controlador PID mejora el seguimiento con menor sobreimpulso, y el compensador de tercer orden mantiene una respuesta estable, rápida y con menor error transitorio, destacándose por su capacidad de adaptación frente a señales de referencia dinámicas.

No obstante, el controlador PI ha sido seleccionado para la implementación física del sistema debido a varias ventajas prácticas. A diferencia del compensador de tercer orden, el controlador PI no requiere hardware adicional, y en comparación con el controlador PID, resulta computacionalmente más ligero, lo cual es favorable para su ejecución en el microcontrolador empleado. Además, en esta aplicación particular, el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento no representan una limitación crítica, ya que el sistema no opera con cargas altamente sensibles ni requiere transiciones extremadamente rápidas. Por tanto, el compromiso entre simplicidad de implementación y desempeño es aceptable, favoreciendo la elección del controlador PI.

Si bien el compensador de tercer orden ofrece una mayor precisión, esta no es requerida para la aplicación específica que se está desarrollando. Por tanto, optar por el PI representa un equilibrio adecuado entre desempeño y simplicidad.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO.

Sin embargo, en aplicaciones donde sea necesario aumentar el voltaje en lugar de reducirlo —por ejemplo, mediante convertidores *Boost* o *Buck-Boost*, o incluso en casos donde se requiera tanto aumentar como reducir el voltaje—, sí es necesario considerar el uso del compensador de tercer orden. Esto se debe a que, a diferencia de los convertidores *Buck*, que son relativamente simples de controlar, los convertidores *Boost* y *Buck-Boost* presentan una mayor complejidad dinámica. En estos casos, un compensador de mayor orden puede ofrecer un control más robusto y estable ante las variaciones del sistema.

El controlador PI se implementó en el DSP junto con el convertidor de potencia. La Figura 4.21 muestra la respuesta del sistema, donde se presenta el voltaje de salida medido en el convertidor implementado físicamente. Se observa cómo el voltaje se incrementa progresivamente hasta alcanzar el valor de referencia, partiendo de una entrada de 24 V.

Con el fin de minimizar las caídas de voltaje en las conexiones, el reactor electrolítico se conectó utilizando cables lo más cortos posible. Si bien la respuesta dinámica del convertidor implementado es similar a la esperada, la señal presenta cierto nivel de ruido. Este comportamiento podría atribuirse al acoplamiento de interferencias en la sonda del osciloscopio o a la presencia de interferencia electromagnética (EMI), generada por la conmutación de los interruptores del propio convertidor.

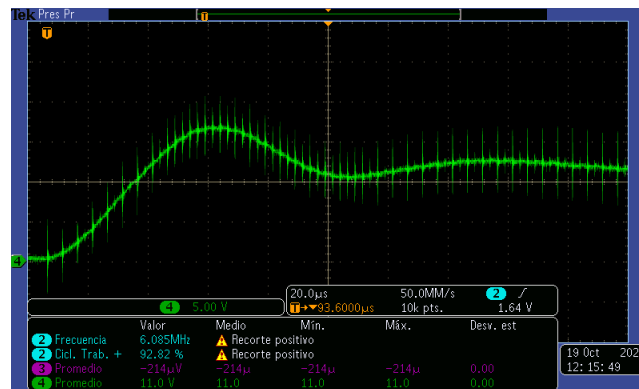


Figura 4.21: Controlador PI implementado en el convertidor de potencia.

Capítulo V. Método de solución.

5.1 Diseño del sistema de electrólisis.

El sistema de electrólisis adquirido ha sido originalmente diseñado para aplicaciones en automóviles con motores de combustión interna, donde se comercializa con el objetivo de mezclar el gas *HHO* generado con el combustible fósil. Esta combinación busca mejorar la eficiencia de combustión y reducir las emisiones contaminantes. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de dicho sistema radica en que su diseño se orienta a una producción continua y constante de hidrógeno, sin tomar en cuenta las variaciones en la demanda energética del motor o las condiciones de operación del vehículo. Además, este sistema carece de un módulo de acondicionamiento de potencia que permita regular la energía suministrada al reactor electrolítico.

La producción constante de gas *HHO*, sin una gestión adecuada, puede resultar contraproducente al generar un exceso de gas no aprovechado o, en su defecto, causar un comportamiento ineficiente del motor, provocando incluso mayores pérdidas energéticas. Para abordar esta limitación, en el presente trabajo se propone el diseño e implementación de un sistema de potencia que regule la generación de *HHO* bajo demanda, es decir, en función de los requerimientos reales del sistema. Este planteamiento busca optimizar el uso del gas generado y mejorar la eficiencia general del proceso. La propuesta general se ilustra en la Figura 5.1.

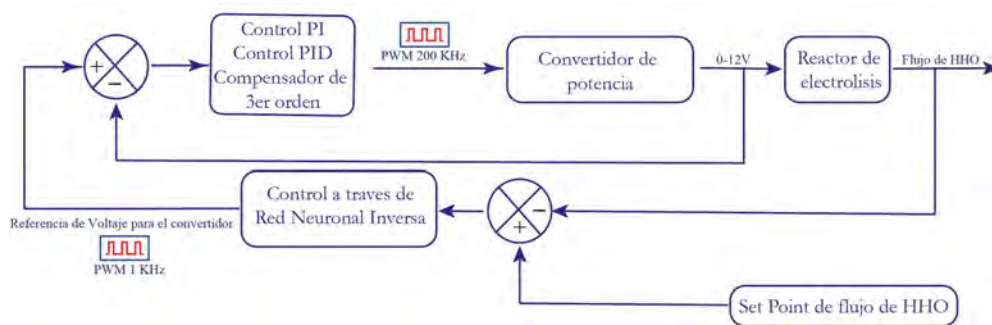


Figura 5.1: Esquema de generación de hidrógeno sobre demanda.

El sistema de control desarrollado para el reactor electrolítico incorpora una red neuronal

CAPÍTULO V. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

artificial inversa, la cual permite estimar la corriente necesaria para alcanzar un flujo de gas HHO deseado.

Una red neuronal artificial inversa (RNA inversa) es una arquitectura formulada con el objetivo de invertir el comportamiento de un sistema modelado previamente mediante una RNA directa. En lugar de predecir la salida del sistema a partir de las entradas, como en una RNA convencional, una RNA inversa estima las entradas necesarias para obtener una salida específica. Esta estrategia es útil en tareas de control, ya que permite calcular las acciones que deben aplicarse para alcanzar un estado deseado del sistema.

En este caso, la RNA inversa se obtuvo a partir del modelo directo desarrollado en el capítulo anterior, donde se entrenó una red neuronal para emular el comportamiento del reactor a partir de variables de entrada como temperatura, presión y corriente. Posteriormente, esta red se invirtió matemáticamente para despejar la corriente como variable de salida. La Ecuación (5.1) representa esta RNA inversa, donde se estima la corriente que debe aplicarse para obtener un flujo específico, considerando las condiciones de temperatura y presión.

$$\text{Corriente} = \frac{1}{\text{Peso}_{\text{Entrada1}}} \cdot \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\text{Flujo}_{\text{HHO}} - \text{Bias}_{\text{Salida}}}{\text{Peso}_{\text{N.oculta}}} \right) - (\text{Temperatura} \cdot \text{Peso}_{\text{Entrada2}}) - (\text{Presión} \cdot \text{Peso}_{\text{Entrada3}}) - \text{Bias}_{\text{Oculta}} \right] \quad (5.1)$$

Este enfoque aprovecha la capacidad de generalización de las redes neuronales para modelar el comportamiento inverso de sistemas no lineales complejos, permitiendo ajustar en tiempo real la corriente suministrada al reactor. Para mejorar la robustez del sistema de control ante perturbaciones y errores de modelado, se integró además el error de seguimiento en la estimación final. Este error, definido como la diferencia entre la referencia deseada y el flujo real de gas generado, se suma a la salida de la RNA inversa, permitiendo una corrección adaptativa que mejora la precisión del control y contribuye a una operación más estable y eficiente del sistema.

5.2 Validación del sistema de electrólisis.

La validación del sistema completo se llevó a cabo inicialmente mediante simulaciones en Simulink, integrando los distintos componentes desarrollados: el modelo del reactor electrolítico,

CAPÍTULO V. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

el controlador basado en una *RNA* inversa, el convertidor de potencia y su respectivo control PI. El diagrama completo de simulación se presenta en el Apéndice D.

Para esta simulación, se utilizaron valores de presión y temperatura obtenidos experimentalmente a partir del reactor mostrado en la Figura 4.8, mientras que la corriente de alimentación provino del modelo del convertidor de potencia. En la Figura 5.2, se presentan dos gráficas: del lado izquierdo, se observa la señal de corriente generada por el convertidor, que alimenta al reactor electrolítico modelado; del lado derecho, se muestra la comparación entre la referencia del flujo de gas *HHO* y la respuesta del modelo del reactor. Como se puede apreciar, el sistema presenta un seguimiento rápido de la señal de referencia, con una corrección efectiva del error, lo cual valida el desempeño del sistema en lazo cerrado.

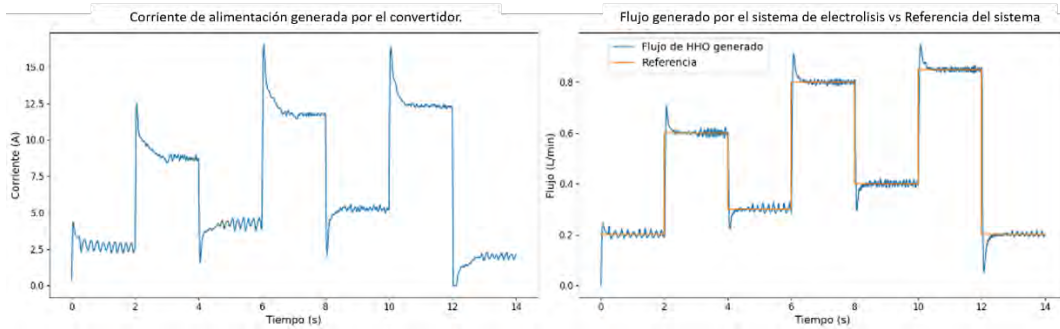


Figura 5.2: Simulación del sistema de generación de *HHO* sobre demanda y el convertidor de potencia en lazo cerrado.

Posteriormente, el controlador para la generación de *HHO* fue implementado en un *DSP*, asignándolo al segundo núcleo del procesador. Para facilitar la comunicación entre ambos núcleos y evitar interferencias con el control PI del convertidor de potencia, se utilizó el *DMA* (Acceso Directo a Memoria). El diagrama de flujo detallado de esta implementación puede consultarse en el Apéndice E.

Además, se programó una señal de referencia variable para el flujo de *HHO*, que cambia su valor cada segundo con el fin de evaluar la capacidad del sistema para adaptarse a variaciones rápidas en la demanda. La Figura 5.3 presenta los datos experimentales obtenidos por la instrumentación del sistema, mostrando la respuesta real del reactor frente a estas variaciones.

CAPÍTULO V. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

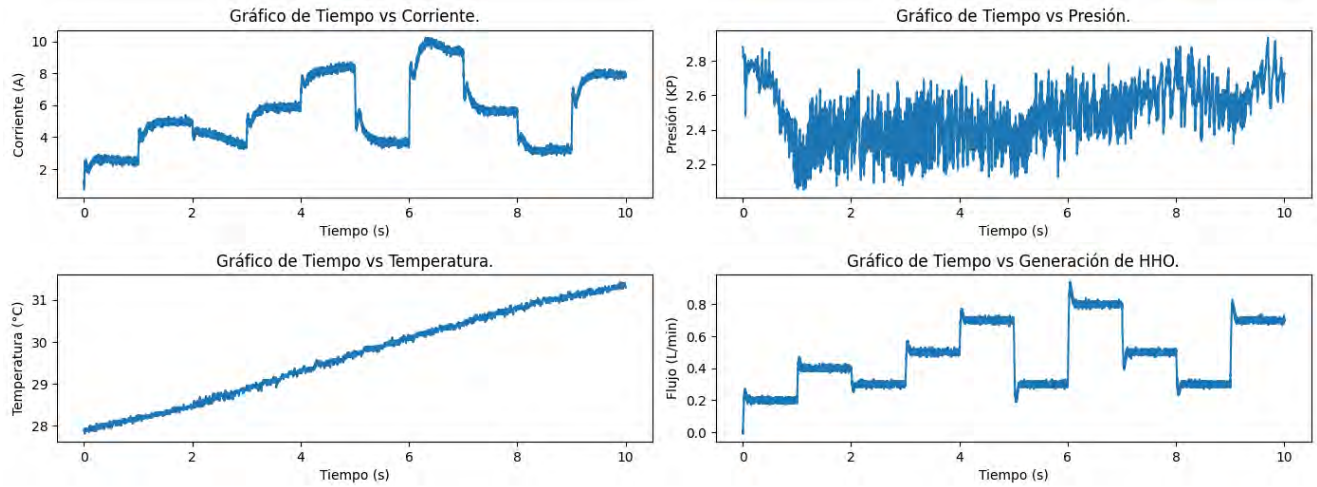


Figura 5.3: Datos medidos del reactor electrolítico implementando el convertidor de potencia y el control de generación de HHO.

En la Figura 5.4, se muestra la comparación entre la señal de referencia y el flujo de HHO medido. La gráfica evidencia una respuesta rápida, precisa y estable, lo cual demuestra que el convertidor de potencia es capaz de alimentar adecuadamente al reactor electrolítico, permitiendo así una generación de HHO bajo demanda con alta fidelidad.

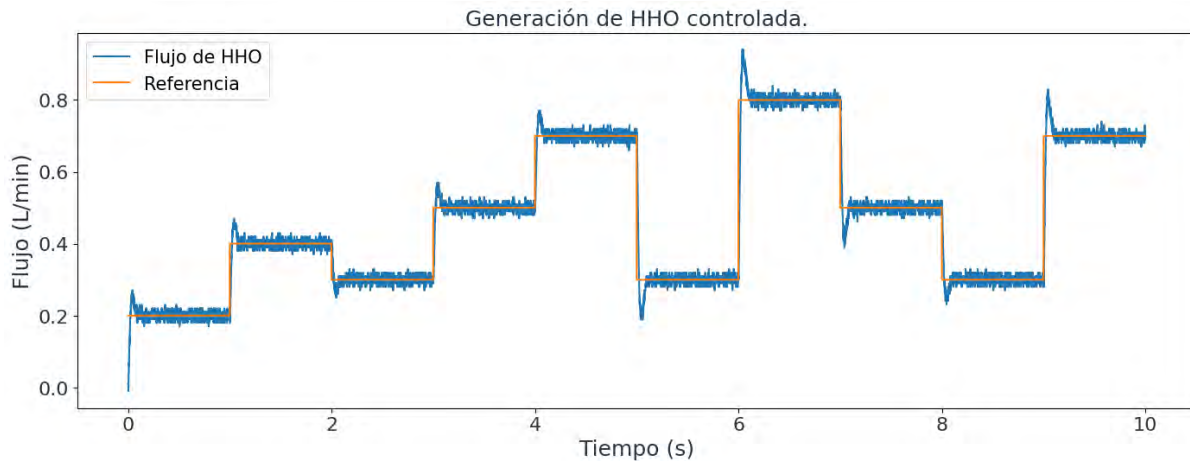


Figura 5.4: Generación de HHO sobre demanda implementando el convertidor de potencia en el reactor electrolítico.

Finalmente, con el objetivo de visualizar de forma más clara la interacción entre el convertidor de potencia y el reactor, se midió la corriente de alimentación utilizando una

CAPÍTULO V. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

sonda de corriente aislada, como se muestra en la Figura 5.5. Esta medición permite observar que tanto la señal de corriente como la de voltaje presentan un comportamiento pulsado, siguiendo el mismo patrón temporal. Esto se debe a que el reactor presenta un comportamiento predominantemente resistivo a bajas frecuencias, por lo que no existe desfase significativo entre la tensión y la corriente aplicadas.

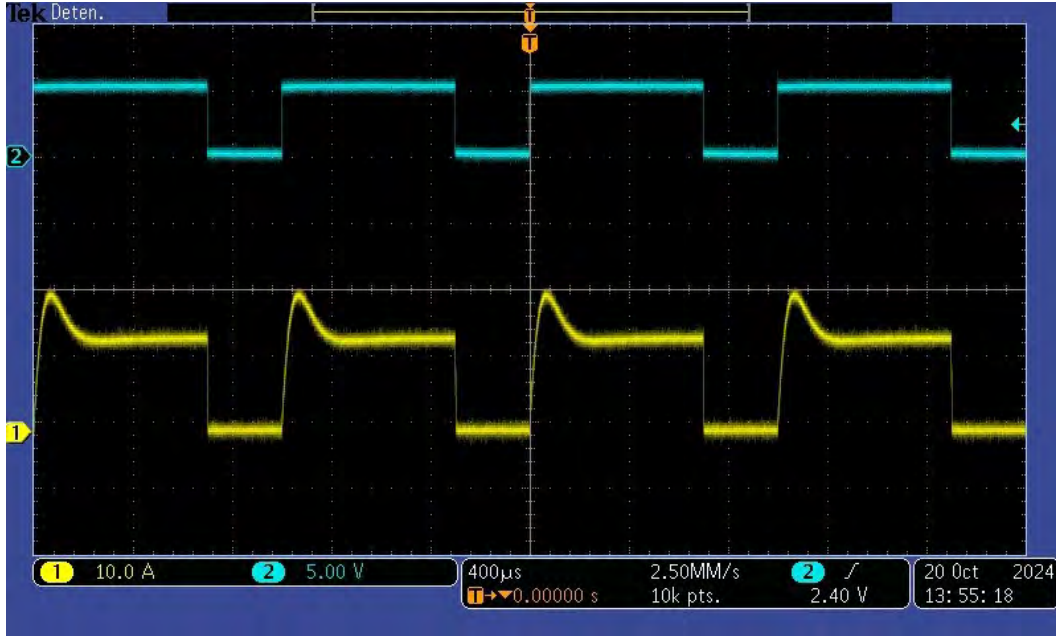


Figura 5.5: Corriente de alimentación al reactor electrolítico a través del convertidor de potencia mientras se controla la generación de HHO.

5.2.1 Evaluación de la eficiencia del convertidor y el sistema

Para evaluar el desempeño del sistema, se realizaron pruebas experimentales conectando el reactor electrolítico directamente a la salida del convertidor de potencia. Estas pruebas tuvieron como objetivo verificar que el convertidor fuera capaz de entregar los 12V requeridos por el reactor para alcanzar su máxima capacidad de generación de gas HHO. Esta condición representa el punto de operación nominal del sistema, por lo que resulta crucial que el convertidor pueda mantener esta tensión de manera estable incluso bajo cargas dinámicas.

Durante las pruebas, se registró una eficiencia del convertidor del 91.7%, un valor considerado elevado para este tipo de topología. Este buen desempeño se atribuye principalmente a la baja resistencia de conducción $R_{DS(on)}$ de los transistores MOSFET

CAPÍTULO V. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

empleados, así como al diseño optimizado del lazo de conmutación, que minimiza las pérdidas por conducción y conmutación. Adicionalmente, el uso de componentes pasivos de alta calidad también contribuyó a reducir las pérdidas totales, favoreciendo una transferencia energética eficiente.

Los valores medidos durante la operación del convertidor se resumen en la Tabla 5.1, donde se muestran los parámetros eléctricos de entrada y salida. Estos datos permiten validar el diseño teórico y cuantificar el comportamiento real del convertidor bajo carga.

Tabla 5.1: Parámetros de Potencia del Convertidor Buck

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada	24 V
Corriente de entrada	8.29 A
Potencia de entrada	198.91 W
Voltaje de salida	12 V
Corriente de salida	15.2 A
Potencia de salida	182.4 W

Además de la eficiencia del convertidor, se evaluó la eficiencia global del sistema, considerando el paso de la energía eléctrica suministrada al convertidor hasta la energía química almacenada en el gas generado. Para este cálculo, se convirtió tanto el flujo de HHO como la potencia eléctrica a unidades de energía (julios por minuto), permitiendo una comparación directa entre la entrada eléctrica y la salida útil del sistema.

Bajo condiciones de operación nominal, el sistema generó una energía química equivalente a 9534.32 J/min, a partir de un consumo eléctrico de 11934.6 J/min. Esto representa una eficiencia global del sistema del 79.89 %. Este valor refleja la capacidad del sistema no solo para transformar eficientemente la energía eléctrica en energía química útil, sino también para mantener esta conversión de forma sostenida en el tiempo.

Dado que parte de las pérdidas totales corresponden al convertidor de potencia, es posible estimar la eficiencia interna del reactor electrolítico utilizando la siguiente relación:

$$\eta_{\text{reactor}} = \frac{\eta_{\text{total}}}{\eta_{\text{convertidor}}} = \frac{79.89 \%}{91.7 \%} \approx 87.12 \%$$

CAPÍTULO V. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

Este resultado indica que el reactor convierte el 87.12 % de la energía eléctrica entregada por el convertidor en energía química. Se trata de una eficiencia destacable, especialmente si se considera que procesos electrolíticos convencionales suelen presentar eficiencias por debajo del 70–80 % en condiciones reales.

En conjunto, estos resultados validan tanto el diseño del convertidor como el desempeño del sistema de electrólisis bajo demanda. La alta eficiencia obtenida en cada etapa del sistema confirma que las decisiones de diseño —incluyendo la selección de componentes, el control implementado y la integración del hardware— son adecuadas para aplicaciones donde la eficiencia energética y la fiabilidad operativa son prioritarias. Además, se establece una base sólida para futuras mejoras del sistema, como la incorporación de técnicas de recuperación de calor o algoritmos de control más avanzados que permitan maximizar aún más la conversión energética.

Capítulo VI. Conclusiones y aportaciones.

6.1 Alcance y limitaciones.

El presente trabajo de tesis abarca el diseño, modelado, simulación e implementación de un sistema de generación de hidrógeno tipo *HHO* bajo demanda. El alcance del proyecto incluye tanto el desarrollo de un convertidor de potencia en topología *Buck* como el diseño de un sistema de control inteligente que regula la producción de gas de acuerdo con una referencia dinámica.

Se modeló el comportamiento no lineal estático del reactor electrolítico mediante una *RNA* entrenada con datos reales de operación. Para evaluar su precisión, se utilizó el ECM, obteniéndose un valor de 0.0035.

El comportamiento lineal dinámico fue representado mediante una función de transferencia, la cual alcanzó un ECM de 0.0013. Ambos modelos, el no lineal estático y el lineal dinámico, se integraron en cascada para formar un modelo completo de tipo Hammerstein. En este caso, el ajuste (*fit*) del modelo alcanzó un 81.9 %.

Posteriormente, se desarrolló una *RNA* inversa capaz de estimar en tiempo real la corriente necesaria para alcanzar un flujo deseado de *HHO*. El objetivo del control implementado fue regular la producción de *HHO* en función de una referencia dinámica de flujo, ajustando la corriente suministrada al reactor. Esta estrategia fue complementada con un lazo de retroalimentación basado en el error entre el flujo medido y la referencia, lo que permitió mejorar tanto la estabilidad como la precisión del sistema.

El sistema de generación de *HHO* fue validado inicialmente en un entorno de simulación (Simulink), integrando el modelo del reactor, el controlador, el convertidor de potencia y su lazo PI. Posteriormente, se implementó la estrategia de control en un *DSP*, distribuyendo las tareas entre sus núcleos y utilizando canales *DMA* para evitar interferencias entre procesos críticos.

Además, se realizaron mediciones experimentales para evaluar el desempeño del convertidor de potencia y la eficiencia global del sistema, considerando la conversión de energía eléctrica a energía química en forma de *HHO*. Estas pruebas permitieron determinar una eficiencia energética global del 79.89 %, con una eficiencia individual del convertidor del 91.7 % y del reactor electrolítico del 87.12 %.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.

Este desarrollo no solo permite una producción de hidrógeno más eficiente y segura, sino que representa un avance en la generación de *HHO* adaptativa y controlada, con potencial para futuras aplicaciones en movilidad sustentable y sistemas energéticos híbridos.

Aunque el sistema desarrollado cumple satisfactoriamente con los objetivos propuestos y demuestra un desempeño adecuado en la generación controlada de *HHO*, se identifican algunas limitaciones que es importante reconocer:

- **Condiciones operativas controladas:** Las pruebas experimentales se realizaron bajo condiciones de laboratorio, con parámetros de temperatura, presión y alimentación eléctrica relativamente estables. En aplicaciones reales, como en vehículos en movimiento, estas condiciones pueden variar significativamente, lo que podría afectar la estabilidad del sistema.
- **Dependencia del modelo de la red neuronal:** El controlador inverso basado en RNA depende directamente de la calidad del modelo del reactor. Cualquier desviación entre el comportamiento real del reactor y el modelo entrenado podría disminuir la precisión del control. Además, la red fue entrenada con datos específicos, por lo que su desempeño fuera de ese rango de operación no ha sido evaluado.
- **Capacidad limitada del convertidor de potencia:** El convertidor Buck implementado fue dimensionado para un nivel de corriente y potencia específico. Escalar este sistema a mayores demandas energéticas requeriría rediseño del hardware y posiblemente ajustes en los parámetros del controlador.
- **Implementación en DSP sin retroalimentación adaptativa:** Aunque se logró una implementación funcional en un procesador digital de señales, el sistema no cuenta con un mecanismo de autoajuste en tiempo real de los parámetros de la RNA o del controlador PI del convertidor. Cualquier degradación de componentes o cambios ambientales podrían requerir recalibraciones manuales.
- **Generación y almacenamiento de datos:** Si bien se obtuvieron registros experimentales, el sistema no integra un mecanismo robusto de adquisición, almacenamiento ni transmisión de datos en tiempo real, lo cual limitaría su integración directa en aplicaciones más complejas o sistemas de monitoreo remoto.

- **Falta de validación prolongada:** La operación del sistema fue validada en sesiones de prueba de corta duración. Aún no se ha evaluado su comportamiento durante periodos prolongados de uso continuo, lo cual es fundamental para determinar la durabilidad y confiabilidad de la solución propuesta. Sobre todo observar el incremento de temperatura.

6.2 Conclusiones

El sistema desarrollado para la generación de gas HHO bajo demanda, basado en un reactor electrolítico y controlado mediante un convertidor de potencia conmutado, ha demostrado ser una solución efectiva, eficiente y técnicamente viable. La implementación de un sistema de control avanzado, apoyado en una red neuronal artificial inversa y un control PI clásico, permitió ajustar dinámicamente la producción de HHO en función de la demanda energética, garantizando así un suministro seguro, controlado y eficiente.

La elección de un convertidor de potencia conmutado tipo Buck frente a tecnologías lineales convencionales representa una mejora sustancial en términos de eficiencia energética. Mientras que los convertidores lineales presentan importantes pérdidas por disipación resistiva al operar en rangos elevados de corriente, el diseño conmutado reduce de forma considerable estas pérdidas gracias al uso de dispositivos con baja resistencia $R_{DS(on)}$, logrando una eficiencia superior al 90 %. Esta mejora no solo reduce el consumo eléctrico, sino que también permite una mejor gestión térmica y una mayor confiabilidad del sistema.

Asimismo, el convertidor de potencia permite una regulación precisa del voltaje de alimentación del reactor, lo cual representa una ventaja crítica respecto a la conexión directa a baterías. Esta capacidad de control facilita la configuración adecuada del arreglo de placas internas del reactor, asegurando un voltaje estable de aproximadamente 2 V por celda, condición necesaria para maximizar la eficiencia del proceso electrolítico. De este modo, se optimiza la generación de hidrógeno sin comprometer la integridad del sistema ni aumentar innecesariamente el consumo de energía.

En conjunto, el sistema propuesto no solo resuelve las limitaciones observadas en soluciones comerciales —las cuales operan sin regulación de potencia y producen un flujo constante de gas—, sino que también establece las bases para aplicaciones más inteligentes y adaptativas en entornos donde la demanda de HHO varía dinámicamente. Estos resultados abren el camino hacia aplicaciones en sistemas híbridos, automoción y generación energética descentralizada con control en tiempo real.

6.3 Trabajos Futuros

- Ampliación del conjunto de datos experimentales bajo distintas condiciones de operación (temperatura, concentración del electrolito, tipos de electrodos, etc.) para mejorar la capacidad de generalización del modelo Hammerstein.
- Optimización del modelo propuesto, explorando arquitecturas más complejas o técnicas de identificación no lineal que permitan una representación más precisa del sistema.
- Diseño e implementación de estrategias de control avanzadas, como control predictivo basado en modelo (MPC) o control adaptativo, para una regulación más eficiente y dinámica de la producción de HHO bajo demanda.
- Evaluación de la eficiencia energética global del sistema, considerando pérdidas térmicas, eléctricas y la posibilidad de recuperación de energía para mejorar la viabilidad técnica y económica.
- Integración del sistema de generación de HHO en distintas aplicaciones:
 - Vehículos de combustión interna para mejorar la eficiencia y reducir emisiones.
 - Calderas, sistemas de calefacción o estufas, con el fin de reducir el consumo de gas convencional.
 - Sistemas de soldadura mediante flama de HHO, aprovechando su alta temperatura y precisión.

Referencias

- [1] Bernard Chukwudi Tashie-Lewis y Somtochukwu Godfrey Nnabuiife. «Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review». En: *Chemical Engineering Journal Advances* 8 (15 de nov. de 2021), pág. 100172. ISSN: 2666-8211. DOI: 10.1016/j.cej.2021.100172. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821121000880>.
- [2] Kurban Z. Brandon N. P. «Clean energy and the hydrogen economy». En: *Royal Society* 375 (12 de jun. de 2017). ISSN: 1471-2962. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0400>.
- [3] Woodrow W. Clark y Jeremy Rifkin. «A green hydrogen economy». En: *Energy Policy* 34.17 (1 de nov. de 2006). Number: 17, págs. 2630-2639. ISSN: 0301-4215. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.06.024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421505001722>.
- [4] Behdad Shadidi, Gholamhassan Najafi y Talal Yusaf. «A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines». En: *Energies* 14.19 (2021). Number: 19. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14196209.
- [5] D.J. Durbin y C. Malardier-Jugroot. «Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 38.34 (13 de nov. de 2013). Number: 34, págs. 14595-14617. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.07.058. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913018053>.
- [6] Marisol Cervantes-Bobadilla et al. «Experimental Study on the Performance of Controllers for the Hydrogen Gas Production Demanded by an Internal Combustion Engine». En: *Energies* 11.8 (2018). Number: 8. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en11082157.
- [7] Daniel Gomez. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. Español, 10 de dic. de 2010. 134 págs.
- [8] Kelly Addy, Linda Green y Elizabeth Herron. «pH and Alkalinity». En: *University of Rhode Island, Kingston* (2004).

REFERENCIAS

- [9] Diogo M. F. Santos, César A. C. Sequeira y José L. Figueiredo. «Hydrogen production by alkaline water electrolysis». En: *Química Nova* 36 (2013). Publisher: scielo. ISSN: 0100-4042.
- [10] Rashid Mamoon et al. «Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis». En: (2011). ISSN: 2249-8958. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijeat.2249-8958>.
- [11] A.K. El Soly et al. «Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 46.24 (abr. de 2021). Number: 24, págs. 12639-12653. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.110. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319921002056> (visitado 19-08-2024).
- [12] Kai Zeng y Dongke Zhang. «Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications». En: *Progress in Energy and Combustion Science* 36.3 (jun. de 2010). Number: 3, págs. 307-326. ISSN: 03601285. DOI: 10.1016/j.peecs.2009.11.002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128509000598> (visitado 19-08-2024).
- [13] Matias Alborno et al. «Water Splitting Dynamics of High Voltage Pulsed Alkaline Electrolysis». En: *2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*. 2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA). Curicó, Chile: IEEE, 24 de oct. de 2022, págs. 1-7. ISBN: 978-1-66549-408-3. DOI: 10.1109/ICA-ACCA56767.2022.10006326. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10006326/> (visitado 19-08-2024).
- [14] Kaveh Mazloomi et al. «Analysis of the Frequency Response of a Water Electrolysis cell». En: *International Journal of Electrochemical Science* 8.3 (mar. de 2013). Number: 3, págs. 3731-3739. ISSN: 14523981. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)14427-0. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1452398123144270> (visitado 19-08-2024).
- [15] Youssef Naimi y Amal Antar. «Hydrogen Generation by Water Electrolysis». En: *Advances In Hydrogen Generation Technologies*. Ed. por Murat Eyvaz. Rijeka:

REFERENCIAS

- IntechOpen, 22 de ago. de 2018, Ch. 1. ISBN: 978-1-78923-535-7. DOI: 10.5772/intechopen.76814. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76814> (visitado 14-03-2023).
- [16] R.F. Escobar-Jiménez et al. «Short communication: The effects of not controlling the hydrogen supplied to an internal combustion engine». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 45.29 (26 de mayo de 2020). Number: 29, págs. 14991-14996. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.214. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920312490>.
- [17] Mingyong Wang et al. «The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (1 de ene. de 2014), págs. 573-588. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.090. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006308>.
- [18] J.W. Haverkort y H. Rajaei. «Electro-osmotic flow and the limiting current in alkaline water electrolysis». En: *Journal of Power Sources Advances* 6 (1 de dic. de 2020), pág. 100034. ISSN: 2666-2485. DOI: 10.1016/j.powera.2020.100034. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666248520300342>.
- [19] S.A. Grigoriev, V.I. Porembsky y V.N. Fateev. «Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy». En: *HTM 2004* 31.2 (1 de feb. de 2006). Number: 2, págs. 171-175. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.04.038. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990500145X>.
- [20] Marcelo Carmo et al. «A comprehensive review on PEM water electrolysis». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 38.12 (22 de abr. de 2013). Number: 12, págs. 4901-4934. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913002607>.
- [21] T. Miličić et al. «Pulsed electrolysis – explained». En: *Faraday Discussions* 246 (2023), págs. 179-197. ISSN: 1359-6640, 1364-5498. DOI: 10.1039/D3FD00030C. URL: <https://xlink.rsc.org/?DOI=D3FD00030C> (visitado 19-08-2024).
- [22] F. Rocha et al. «Pulsed water electrolysis: A review». En: *Electrochimica Acta* 377 (1 de mayo de 2021), pág. 138052. ISSN: 0013-4686. DOI: 10.1016/j.electacta.2021.138052. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001346862100342X>.

REFERENCIAS

- [23] Martins Vanags, Janis Kleperis y Gunars Bajars. «Water Electrolysis with Inductive Voltage Pulses». En: *Electrolysis*. Ed. por Janis Kleperis. InTech, 17 de oct. de 2012. ISBN: 978-953-51-0793-4. DOI: 10.5772/52453. URL: <http://www.intechopen.com/books/electrolysis/water-electrolysis-with-inductive-voltage-pulses> (visitado 19-08-2024).
- [24] Nigel Monk y Simon Watson. «Review of pulsed power for efficient hydrogen production». En: *Special Issue on Progress in Hydrogen Production and Applications (ICH2P-2015), 3-6 May 2015, Oshawa, Ontario, Canada* 41.19 (25 de mayo de 2016). Number: 19, págs. 7782-7791. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.086. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915027664>.
- [25] José Luis Rolleri. «¿Qué son los modelos físicos?» En: *Valenciana* 6.11 (20 de mayo de 2013). Number: 11. ISSN: ISSN 2007-2538.
- [26] Iasonas Ioannou et al. «Process modelling and life cycle assessment coupled with experimental work to shape the future sustainable production of chemicals and fuels». En: *Reaction Chemistry & Engineering* 6.7 (2021). Number: 7 Publisher: The Royal Society of Chemistry, págs. 1179-1194. DOI: 10.1039/D0RE00451K. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D0RE00451K>.
- [27] Oussama Hasidi et al. «Data-Driven and Model-Driven Approaches in Predictive Modelling for Operational Efficiency: Mining Industry Use Case». En: *Model and Data Engineering*. Ed. por Mohamed Mosbah et al. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, págs. 116-127. ISBN: 978-3-031-49333-1.
- [28] S Niroula et al. «Parametric Modelling and Optimization of Alkaline Electrolyzer for the Production of Green Hydrogen». En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1279.1 (1 de mar. de 2023). Number: 1, pág. 012005. ISSN: 1757-8981, 1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/1279/1/012005. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1279/1/012005> (visitado 25-08-2024).
- [29] S. A. Billings y S. Y. Fakhouri. «Identification of systems containing linear dynamic and static nonlinear elements». En: *Automatica* 14.1 (1978), págs. 15-26. DOI: 10.1016/0005-1098(78)90045-6.

REFERENCIAS

- [30] Marcus Enqvist y Lennart Ljung. «Linear approximations of nonlinear systems – Part I: Basics». En: *Automatica* 47.2 (2012), págs. 325-334. DOI: 10.1016/j.automatica.2010.10.042.
- [31] G. Risuleo et al. «Bayesian estimation of Hammerstein models». En: *IFAC-PapersOnLine* 48.28 (2015), págs. 1016-1021. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.12.444.
- [32] D. Kumar et al. «Non-linear system identification using Hammerstein-Wiener model». En: *Materials Today: Proceedings* 72 (2023), págs. 2087-2093. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.352.
- [33] H. Mehmood et al. «A marine predators algorithm-based Hammerstein model for multivariable process modeling». En: *Processes* 10.2 (2022), pág. 387. DOI: 10.3390/pr10020387.
- [34] Samuel Schmidgall et al. «Brain-inspired learning in artificial neural networks: a review». En: *arXiv preprint arXiv:2305.11252* (2023).
- [35] Yonggang Wang et al. «High-Order Neural-Network-Based Multi-Model Nonlinear Adaptive Decoupling Control for Microclimate Environment of Plant Factory». En: *Sensors* 23.19 (2023), pág. 8323. DOI: 10.3390/s23198323.
- [36] Pedro Freire et al. «Artificial Neural Networks for Photonic Applications: From Algorithms to Implementation». En: *arXiv preprint arXiv:2408.02685* (2024).
- [37] Gabriele Lagani et al. «Spiking Neural Networks and Bio-Inspired Supervised Deep Learning: A Survey». En: *arXiv preprint arXiv:2307.16235* (2023).
- [38] Qiang Wu, Shuaibing Zhou y Xinyue Zhang. «A Brief Overview of Artificial Neural Network Architectures and Training Algorithms in Computational Intelligence». En: *Entropy* 25.5 (2023), pág. 765. DOI: 10.3390/e25050765.
- [39] Nurul Aida Yusof, Tan Chee Abd Rahman y Mohd Shafie Hassan. «Machine Learning Techniques in Electrical Load Forecasting: A Review». En: *Journal of Cleaner Production* 407 (2023), pág. 137191. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137191.
- [40] Ricardo Lopes, Francisco Almeida y David Antunes. «Neural Network Architectures for Control and Estimation: A Review». En: *IEEE Access* 11 (2023), págs. 59610-59628. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3280387.

REFERENCIAS

- [41] Yong Huang et al. «A Comprehensive Survey on Neural Networks and Their Applications in System Modeling and Control». En: *ISA Transactions* (2023). DOI: 10.1016/j.isatra.2023.05.004.
- [42] Mercedes Canasí Piñeiro, Eduardo Rodríguez Álvarez y Daniel Ravelo Artiles. «Convertidores electrónicos de potencia de los sistemas fotovoltaicos autónomos de 300 w instalados en Cuba». En: XLIV.1 (6 de mar. de 2023). Number: 1, pág. 10. ISSN: ISSN 1815-5901.
- [43] Feng Yi y Fei Wang. «Review of Voltage-Bucking/Boosting Techniques, Topologies, and Applications». En: *Energies* 16.2 (2023), pág. 842. DOI: 10.3390/en16020842.
- [44] Norazlianie Sazali. «Emerging technologies by hydrogen: A review». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 45.38 (31 de jul. de 2020). Number: 38, págs. 18753-18771. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920317493>.
- [45] Gustavo Salazar, Wilmer Solis y Leonardo Vincés. «A mechanical development of a dry cell to obtain HHO from water electrolysis». En: *Proceedings of the 5th Brazilian Technology Symposium: Emerging Trends, Issues, and Challenges in the Brazilian Technology, Volume 2*. Springer. 2020, págs. 257-265.
- [46] Jörn Brauns y Thomas Turek. «Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review». En: *Processes* 8.2 (2020). ISSN: 2227-9717. DOI: 10.3390/pr8020248. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/248>.
- [47] Yun Wang et al. «Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: Status, technology, and perspectives». En: *Advances in Applied Energy* 2 (26 de mayo de 2021), pág. 100011. ISSN: 2666-7924. DOI: 10.1016/j.adapen.2021.100011. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792421000044>.
- [48] Fuyuan Yang et al. «Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 46.61 (3 de sep. de 2021). Number: 61, págs. 31467-31488. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921025520>.

REFERENCIAS

- [49] Jami Paparao y S. Murugan. «Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxy-hydrogen (HHO) gas». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.40 (8 de mayo de 2022). Number: 40, págs. 17788-17807. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.235. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922013854>.
- [50] Ammar A. Al-Rousan. «Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold». En: *Asian Hydrogen Energy Conference 2009* 35.23 (1 de dic. de 2010). Number: 23, págs. 12930-12935. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.144. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910017830>.
- [51] M. H. Badr, M. I. Hassan y A. A. EL-Hamalawy. «An On-Demand Hydrogen Cell for Automobile Fuel Consumption Efficiency». En: *International Journal of Green Energy* 12.11 (2 de nov. de 2015). Number: 11 Publisher: Taylor & Francis, págs. 1086-1090. ISSN: 1543-5075. DOI: 10.1080/15435075.2014.890105. URL: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.890105>.
- [52] Mohanad Aldhaidhawi et al. «Investigation on the mixture formation, combustion characteristics and performance of a Diesel engine fueled with Diesel, Biodiesel B20 and hydrogen addition». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 42.26 (29 de jun. de 2017). Number: 26, págs. 16793-16807. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.222. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917310820>.
- [53] Tamer M. Ismail et al. «Performance of hybrid compression ignition engine using hydroxy (HHO) from dry cell». En: *Energy Conversion and Management* 155 (1 de ene. de 2018), págs. 287-300. ISSN: 0196-8904. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.10.076. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417310087>.
- [54] Kadir Aydin y Raif Kenanoğlu. «Effects of hydrogenation of fossil fuels with hydrogen and hydroxy gas on performance and emissions of internal combustion engines». En: *Special Issue on The 8th International Conference on Hydrogen Production (ICHP-2017)* 43.30 (26 de jul. de 2018). Number: 30, págs. 14047-14058. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918311200>.

REFERENCIAS

- [55] I Darmawa, Ikeh Wiryanta e I Sutarna. «Development of Hydrogen Gas Generator Prototype Model for Vehicle Fuel with Electrolysis Method:» en: *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science*. International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science. Samarinda, Indonesia: SCITEPRESS - Science y Technology Publications, 2021, págs. 581-586. ISBN: 978-989-758-615-6. DOI: 10.5220/0010949400003260. URL: <https://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0010949400003260> (visitado 19-08-2024).
- [56] RKMAN Kumar. «HHO Generation & Its Application on Welding». En: *Int. J. Sci. Res. Dev.* 5 (2017), págs. 2321-0613.
- [57] Tamer Nabil y Mohamed M Khairat Dawood. «Enabling efficient use of oxy-hydrogen gas (HHO) in selected engineering applications; transportation and sustainable power generation». En: *Journal of Cleaner Production* 237 (2019), pág. 117798.
- [58] Jami Paparao y S Murugan. «Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxy-hydrogen (HHO) gas». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.40 (2022), págs. 17788-17807.
- [59] S Sudhakar y Mathanraj Vijayaragavan. «Development of sustainable energy: Performance investigation of the combined utilisation of a seawater electrolyser and single slope solar desalination still». En: *Journal of Cleaner Production* 460 (2024), pág. 142613.
- [60] Mustafa Kaan Baltacıoğlu. «A novel application of pulse width modulation technique on hydroxy gas production». En: *9th International Conference on Hydrogen Production (ICH2P-2018)* 44.20 (19 de abr. de 2019). Number: 20, págs. 9726-9734. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.228. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918334918>.
- [61] Worawat Ss-Ngiamvibool. «Application of Microcontroller for Controlling HHO Dry Cell in Small Trucks». En: *Maharakham International Journal of Engineering Technology* 1 (2015). Col. de Apinan Aurasopon. Publisher: Faculty of Engineering, Maharakham University, pág. 1013. DOI: 10.14456/MIJET.2015.9. URL: http://doi.nrct.go.th/?page=resolve_doi&resolve_doi=10.14456/mijet.2015.9 (visitado 19-08-2024).

REFERENCIAS

- [62] Çağlar Conker. «A novel fuzzy logic based safe operation oriented control technique for driving HHO dry cell systems based on PWM duty cycle». En: *9th International Conference on Hydrogen Production (ICH2P-2018)* 44.20 (19 de abr. de 2019). Number: 20, págs. 9718-9725. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.243. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918335511>.
- [63] Caglar Conker y Mustafa Kaan Baltacioglu. «Fuzzy self-adaptive PID control technique for driving HHO dry cell systems». En: *Progress in Hydrogen Production and Utilization* 45.49 (2 de oct. de 2020). Number: 49, págs. 26059-26069. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.136. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920302883>.
- [64] Seerla Sai Kumar y Keshetti Santosh Kumar. «Optimization and control of fuel by producing brown gas by HHO generating device controlled by VHDL and implementing in FPGA». En: *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 4.1 (2015). Number: 1 Publisher: International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research, págs. 154-162.
- [65] Damien Guilbert et al. «Fuel cell systems reliability and availability enhancement by developing a fast and efficient power switch open-circuit fault detection algorithm in interleaved DC/DC boost converter topologies». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 41.34 (14 de sep. de 2016). Number: 34, págs. 15505-15517. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.169. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915310053>.
- [66] Damien Guilbert, Stefania Maria Collura y Angel Scipioni. «DC/DC converter topologies for electrolyzers: State-of-the-art and remaining key issues». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 42.38 (sep. de 2017). Number: 38, págs. 23966-23985. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.174. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319917330100> (visitado 19-08-2024).
- [67] Xiang Cheng et al. «Power controller design for electrolysis systems with DC/DC interface supporting fast dynamic operation: A model-based and experimental study». En: *Applied Energy* 378 (2025), pág. 124848.

REFERENCIAS

- [68] Deepak S Gautam y Ashoka KS Bhat. «A comparison of soft-switched DC-to-DC converters for electrolyzer application». En: *IEEE Transactions on power electronics* 28.1 (2012), págs. 54-63.

Apéndices

Apéndice A. Adquisición de datos en LabView.

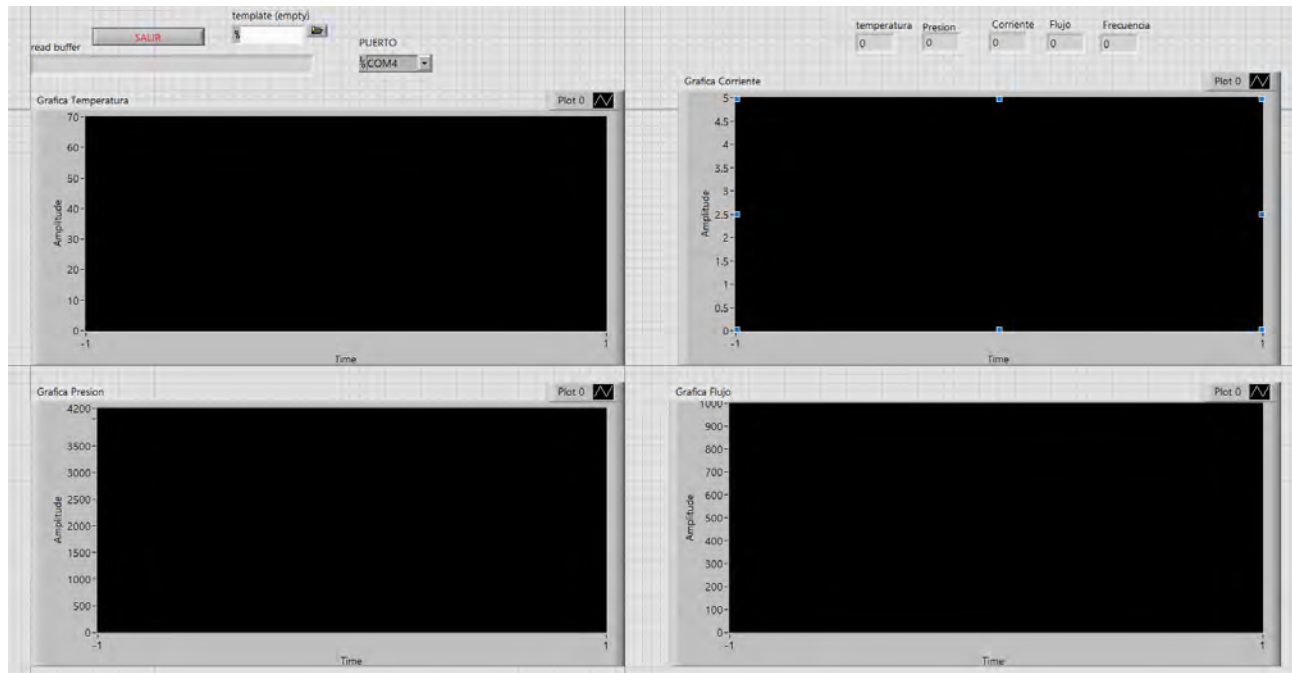


Figura 1.1: Interface gráfica de la adquisición de datos en LabView.

APÉNDICE A. ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW.

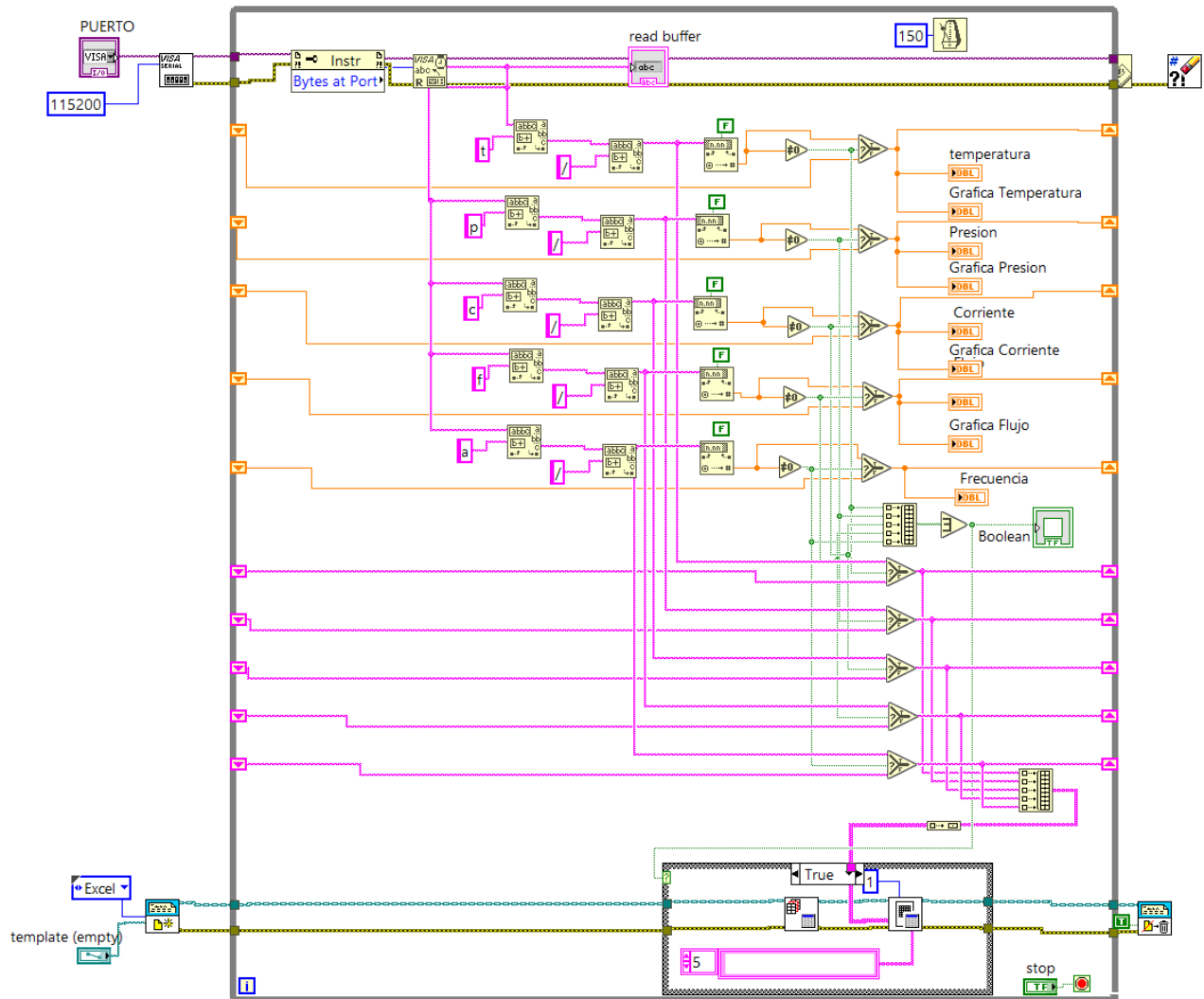
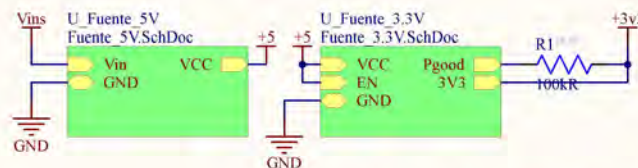
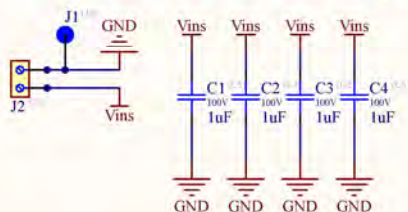


Figura 1.2: Código de LabView para la adquisición de datos.

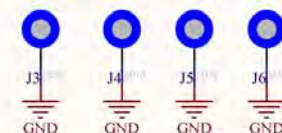
Apéndice B. PCB para la adquisición de datos

Tarjeta de adquisición de datos

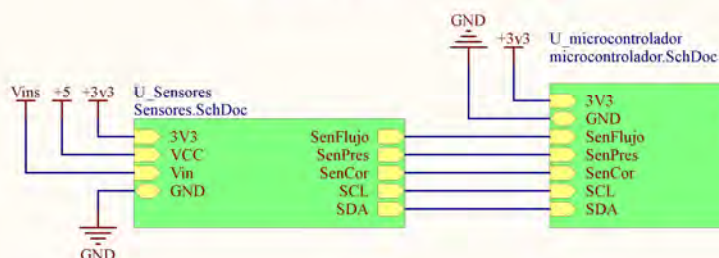
Fuentes de Voltaje



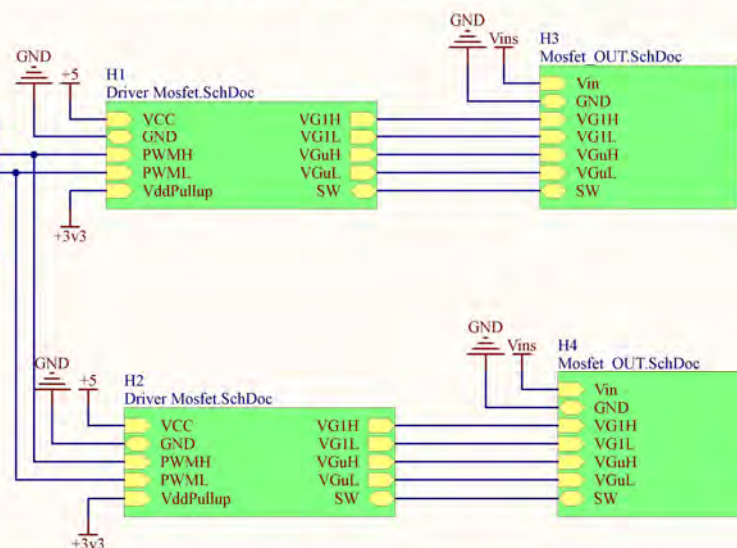
Sujeción



Electrónica digital



Electrónica de potencia



TITULO: Adquisición

DOCUMENTO: Principal.SchDoc

PROYECTO:

HOJA 1 DE 7

ESCAL 1:1

TAMAÑO: A4

AUTOR:

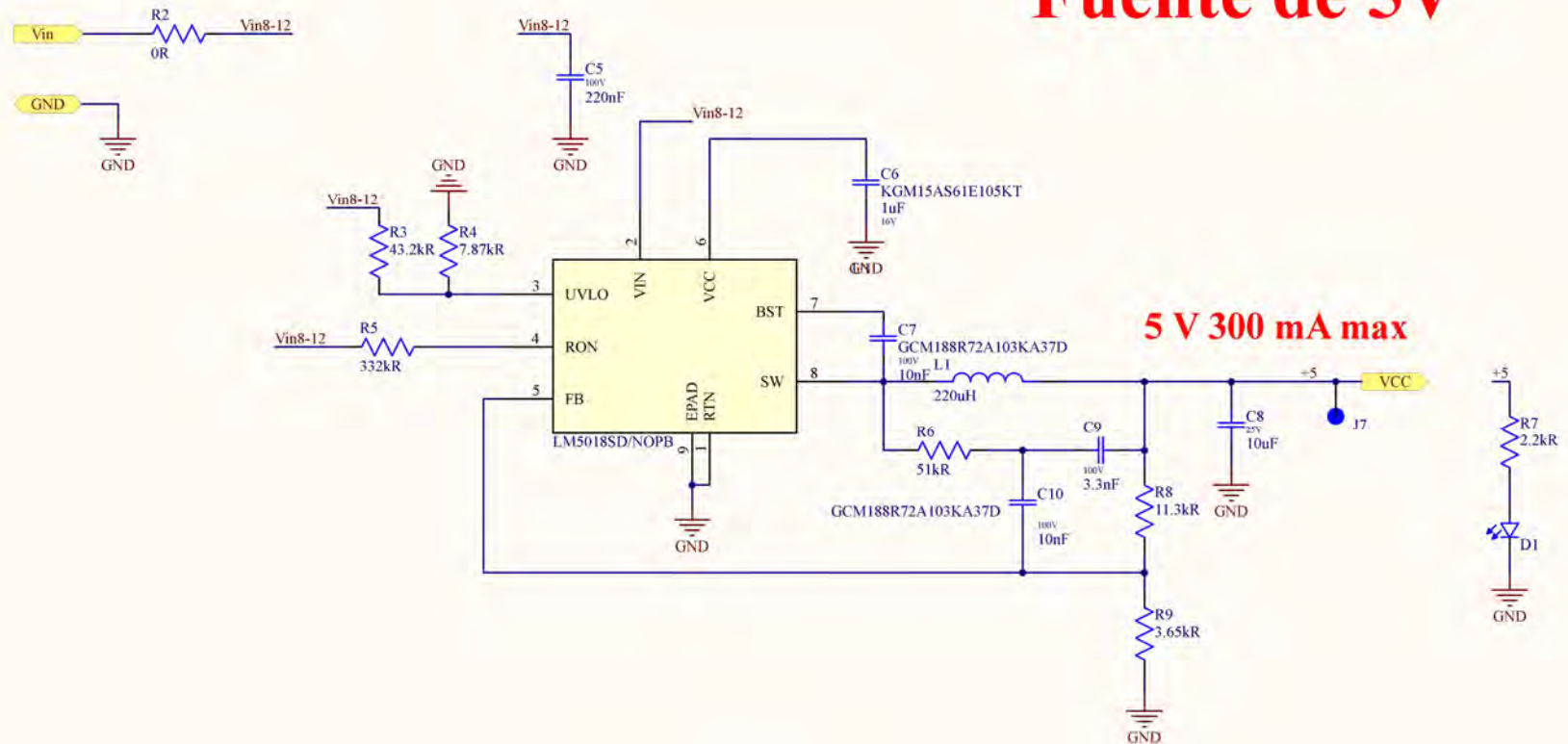
Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

9 Vmin. to 80 Vmax.

Fuente de 5V



TITULO: Adquisición

DOCUMENTO: Fuente_5V.SchDoc

PROYECTO:

HOJA 2 DE 7

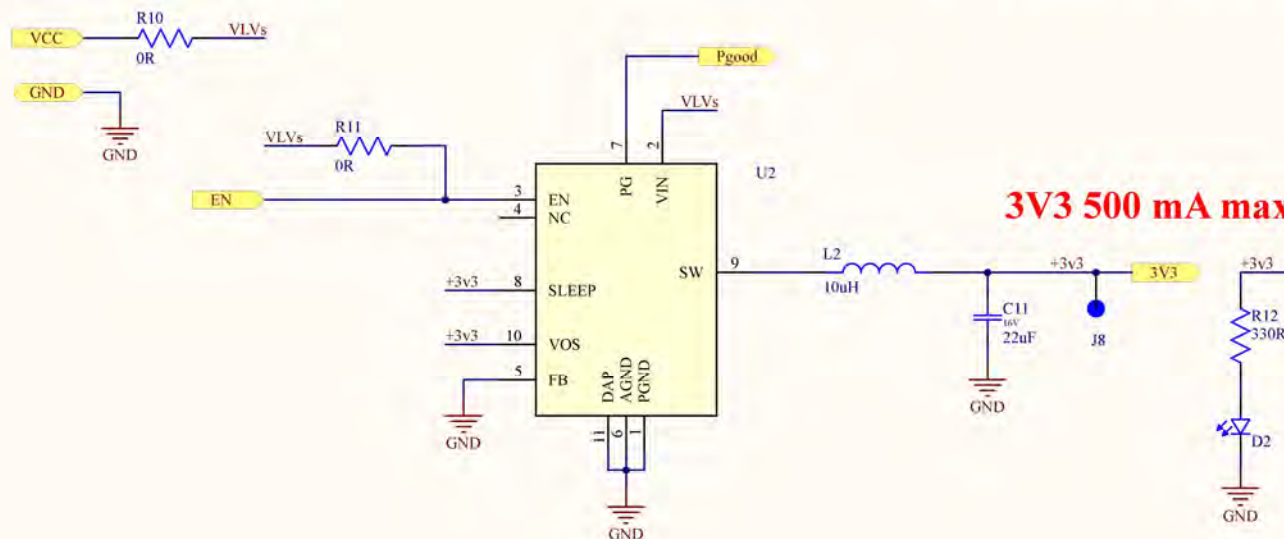
ESCAL 1:1	TAMAÑO: A4	AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia
-----------	------------	--------------------------------

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Fuente de 3V3

4.75 Vmin. to 28 Vmax.



3V3 500 mA max

TITULO: Adquisición

DOCUMENTO: Fuente_3.3V.SchDoc

PROYECTO:

HOJA 3 DE 7

ESCAL 1:1

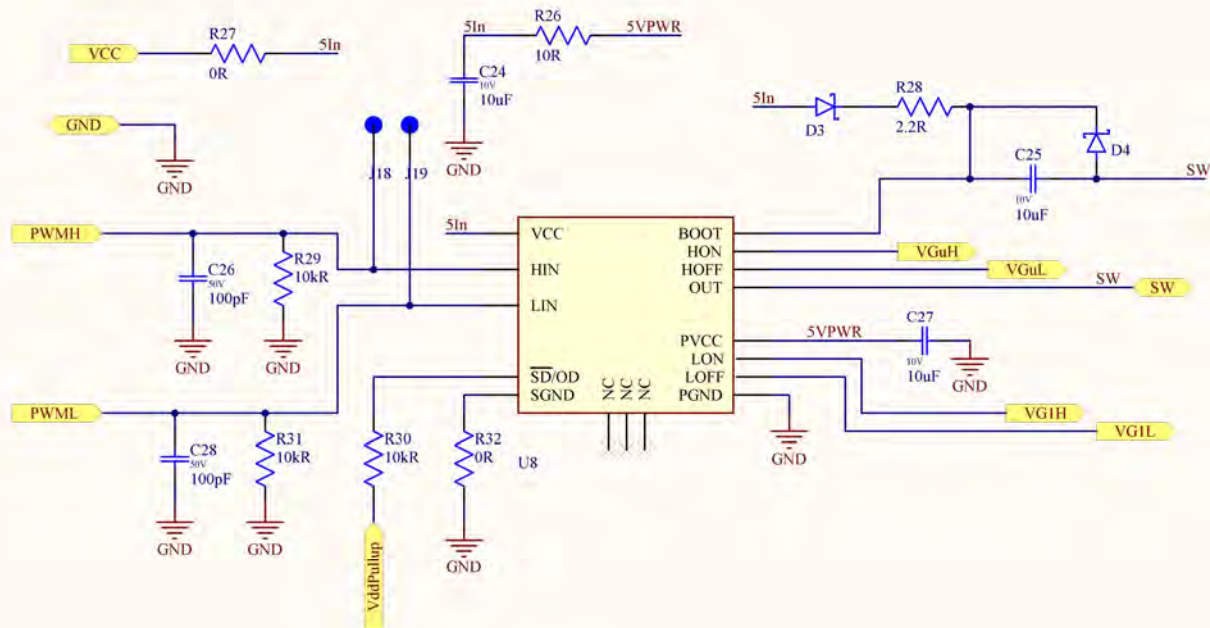
TAMAÑO: A4

AUTOR:

Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

Gate Driver



TITULO: Adquisición

DOCUMENTO: Driver Mosfet.SchDoc

PROYECTO:

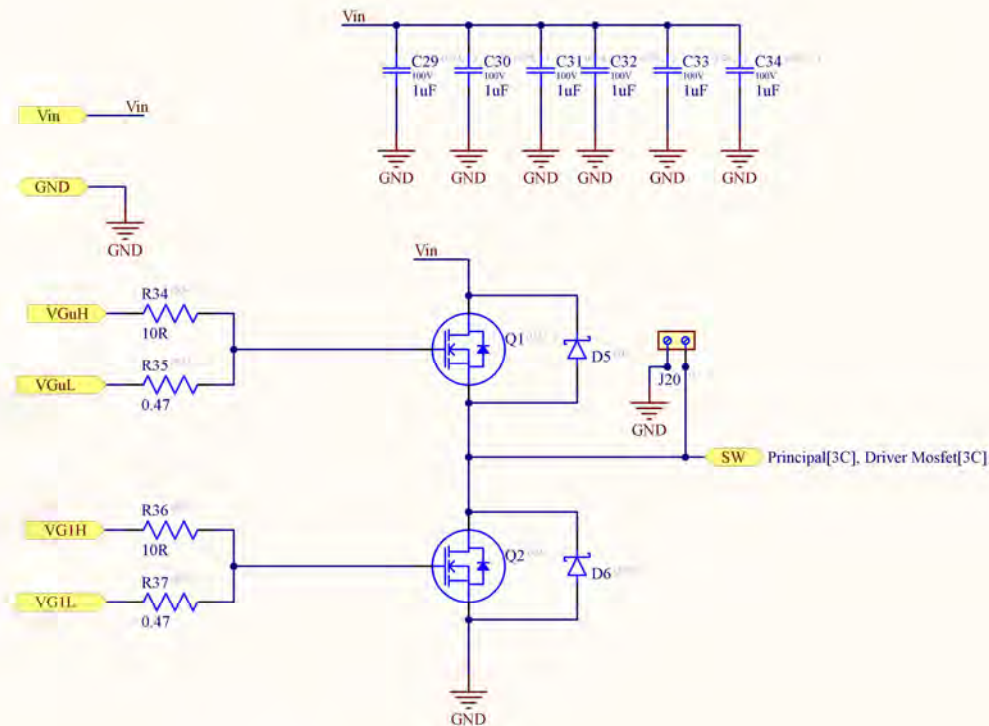
HOJA 4 DE 7

ESCAL 1:1	TAMAÑO: A4	AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia
-----------	------------	--------------------------------

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Salida de potencia.



TITULO: Adquisición

DOCUMENTO: Mosfet_OUT.SchDoc

PROYECTO:

HOJA 5 DE 7

ESCAL 1:1

TAMAÑO: A4

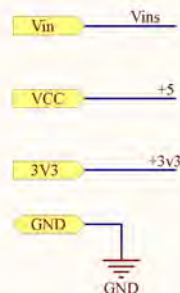
AUTOR:

Gabriel Cervantes Mejia

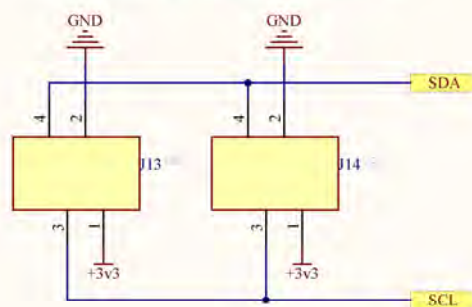
Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

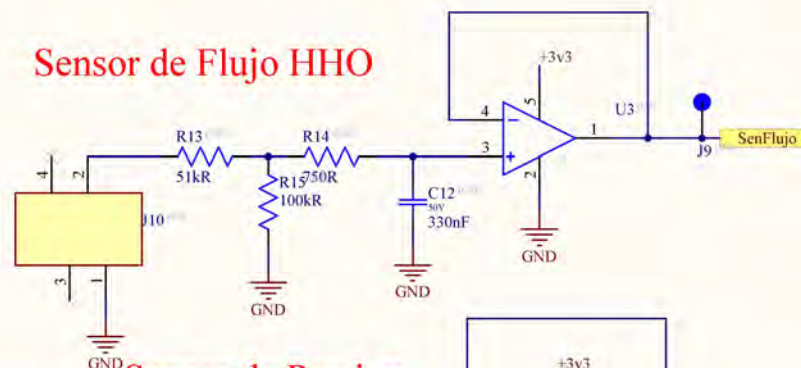
Entrada de la señales analogicas.



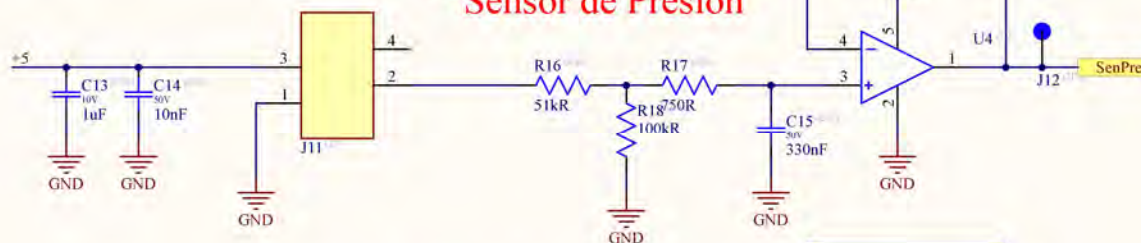
Sensor de Temperatura



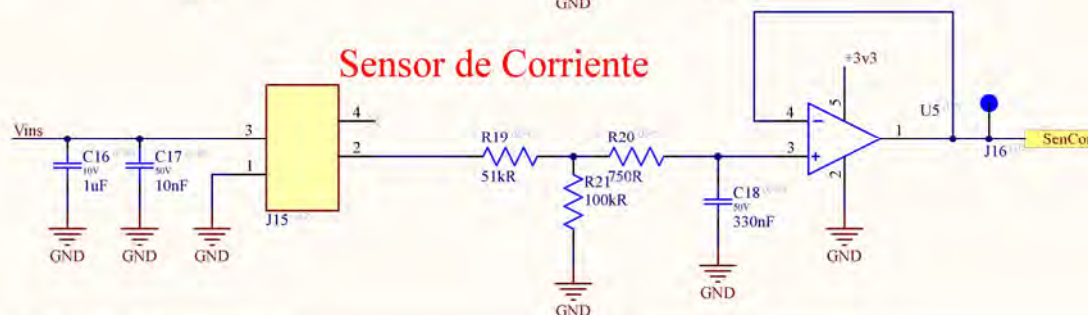
Sensor de Flujo HHO



Sensor de Presion



Sensor de Corriente



TITULO: **Adquisición**

DOCUMENTO: **Sensores.SchDoc**

PROYECTO:

HOJA 6 DE 7

ESCAL 1:1

TAMAÑO: A4

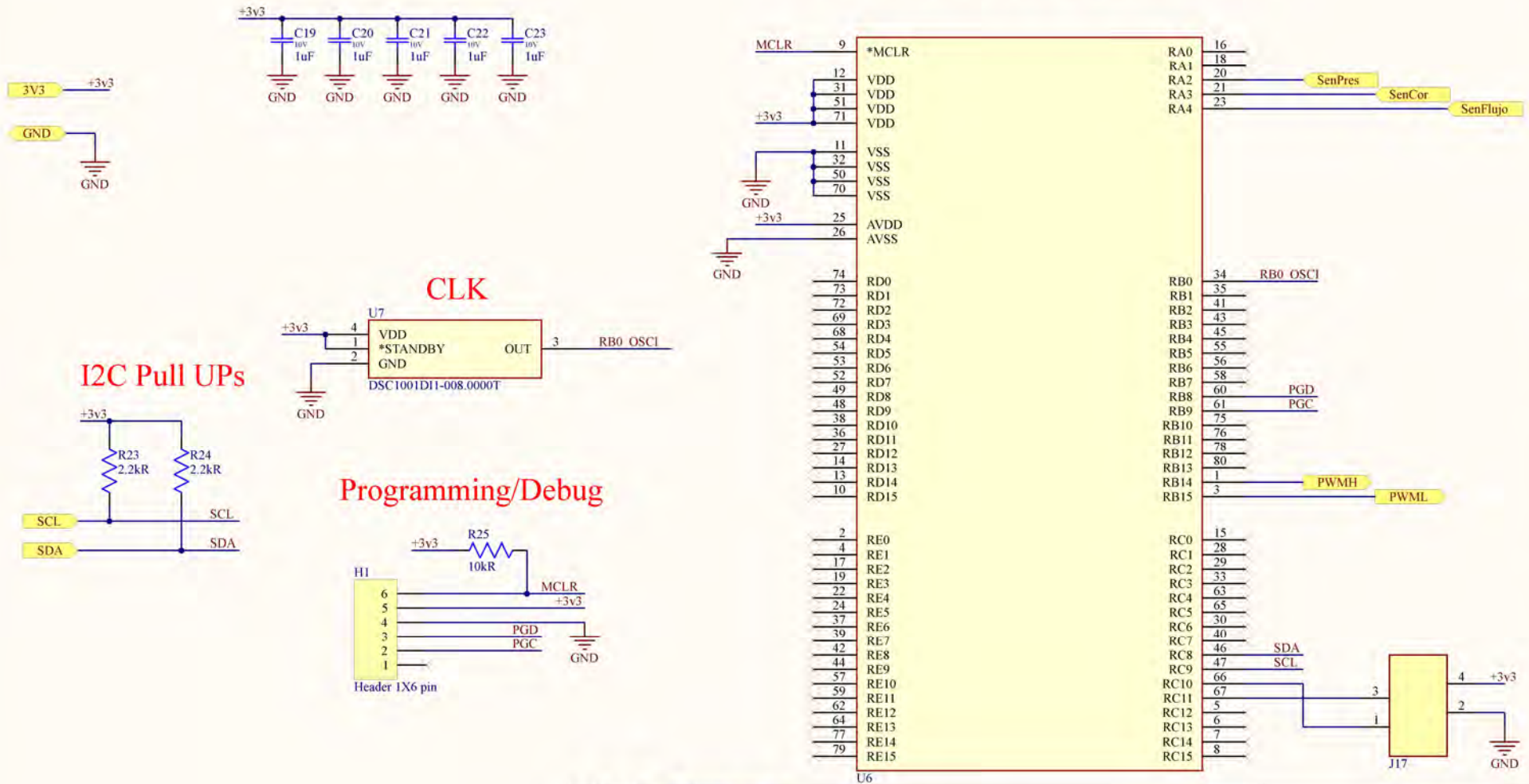
AUTOR:

Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Microcontrolador



TITULO: Adquisición

DOCUMENTO: microcontrolador.SchDoc

PROYECTO:

HOJA 7 DE 7

ESCAL 1:1

TAMAÑO: A4

AUTOR:

Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

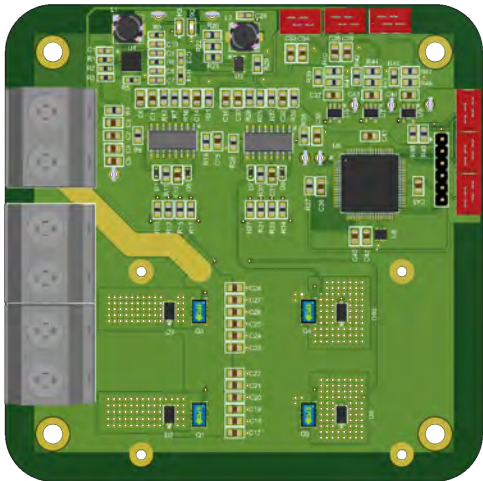
A

B

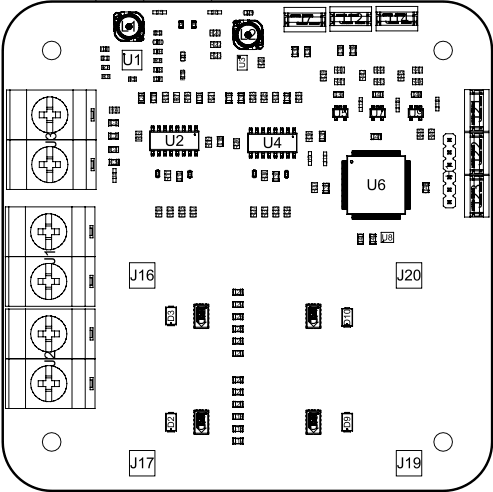
C

D

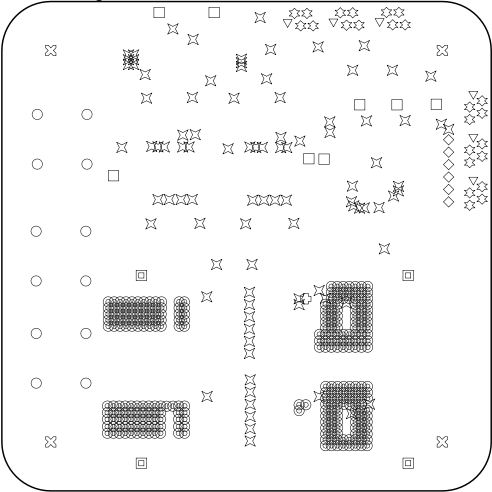
Realistic View



View from Top side (Scale 1:1)



Drill Drawing View



Layer Stack Legend

Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber
	Top Overlay			Legend	GTO
	Surface Material	Top Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask
CF-004	Top Layer 1	0.04mm		Signal	GTL
Prepreg		0.07mm	PP-006	Dielectric	
Copper	Top Layer	0.04mm		Signal	G1
		0.32mm	FR-4	Dielectric	
Copper	Bottom Layer	0.04mm		Signal	G2
Prepreg		0.07mm	PP-006	Dielectric	
CF-004	Bottom Layer 1	0.04mm		Signal	GBL
	Surface Material	Bottom Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask
	Bottom Overlay			Legend	GB0
Total thickness: 0.62mm					

Drill Table

Symbol	Count	Hole Size	Plated	Hole Tolerance
○	12	1.60	Plated	
☆	24	0.85	Plated	
▽	6	1.50	Non-Plated	
□	8	1.32	Plated	
▣	4	2.00	Plated	
⊠	4	4.00	Plated	
◇	6	0.91	Plated	
✱	94	0.30	Plated	
◎	280	0.40	Plated	
⊙	1	0.60	Plated	

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF . ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	TITLE			
		DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN		20/04/2025				
		TOLERANCES:	CHECKED						
		FRACTIONAL±	ENG APPR.						
		ANGULAR: MACH±	MFG APPR.			SIZE DWG. NO.			
		BEND ±							
		TWO PLACE DECIMAL ±	Q.A.						
		THREE PLACE DECIMAL ±	COMMENTS:						
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:							
		MATERIAL				SIZE	DWG. NO.		
		FINISH							
NEXT ASSY	USED ON	DO NOT SCALE DRAWING				SCALE:	1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 2
APPLICATION									

A

B

C

D

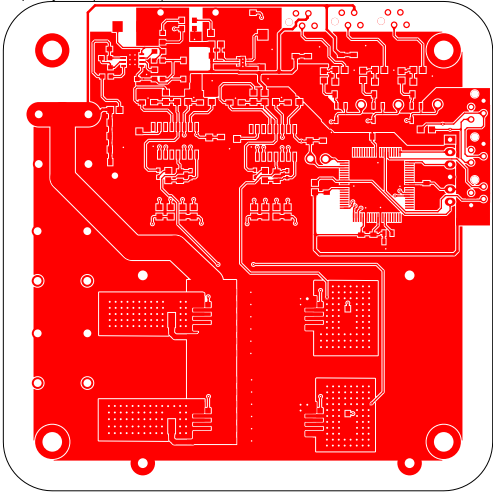
A

B

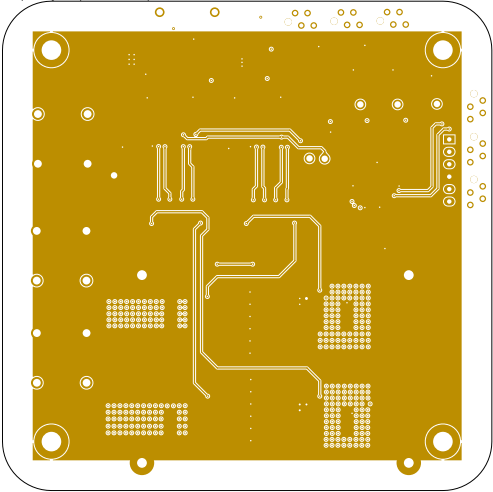
C

D

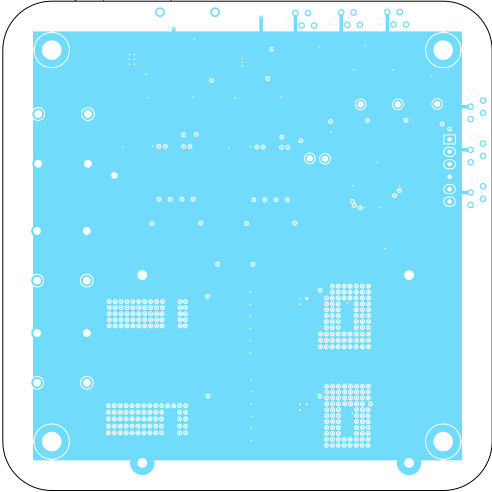
Top Layer 1 (Scale 1:1)



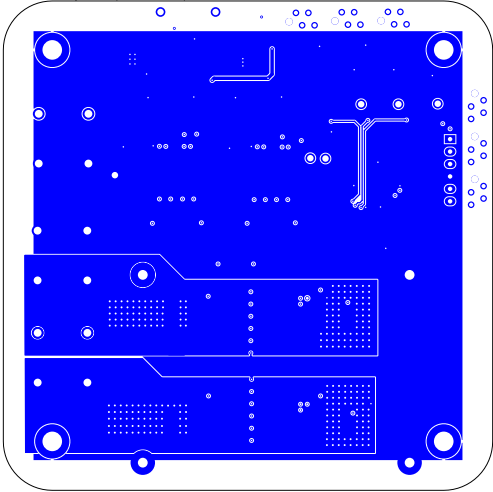
Top Layer (Scale 1:1)



Bottom Layer (Scale 1:1)



Bottom Layer 1 (Scale 1:1)



THE INFORMATION CONTAINED IN
THIS DRAWING IS THE SOLE
PROPERTY OF
. ANY REPRODUCTION IN PART OR
AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF IS

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ± INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER: MATERIAL FINISH DO NOT SCALE DRAWING	NAME	DATE	TITLE		
			DRAWN	20/04/2025			
			CHECKED				
			ENG APPR.				
			MFG APPR.				
			Q.A.		COMMENTS:		
					SIZE DWG. NO.		
					SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 2 OF 2		

A

B

C

D

Lista de materiales

Bill of Materials for Project [AdquisicionDeDatos.PrjPcb] (No PCB Document Selected)

Fuente:

AdquisicionDeDatos.PrjPcb

Proyecto:

AdquisicionDeDatos.PrjPcb

Variante:

None



Report Date:

07:49 p. m.

Print Date:

7:53:10 PM

#	Manufacturer Part Number	Manufacturer	Designator	Quantity	Description	Supplier	Pricing
1	HMK107C7224KAHTE	Taiyo Yuden	C1	1	Medium-High Voltage Multilayer Ceramic Capacitors for Automotive / Industrial Applications		
2	GRM21BC72A105KE01K	Murata	C2, C3, C4, C5, C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28	16	Ceramic Capacitor, Multilayer, Ceramic, 100V, 10% +Tol, 10% -Tol, X7S, 22% TC, 1uF, Surface Mount, 0805	Digikey	1=0.35, 10=0.234, 50=0.1724, 100=0.1403, 500=0.11078, 1000=0.09354, 2500=0.08862, 5000=0.0837 (USD)
3	CL21A106KPCLQNC	Samsung	C6, C11, C12, C16, C30, C31	6	Multilayer Ceramic Capacitor, 10 uF, 10 V, ± 10%, X5R, 0805 [2012 Metric]	Digikey	1=0.11, 10=0.077, 50=0.0462, 100=0.0364, 500=0.0269, 1000=0.02226 (USD)
4	GCM188R72A103KA37D	Murata	C7, C9	2	Multilayer Ceramic Capacitor, 0.01 uF, 100 V, ± 10%, X7R, 0603 [1608 Metric]		
5	KGM15AS61E105KT	Kyocera AVX	C8	1	Cap 1uF 16V		
6	GRM188R61E106KA73J	Murata	C10	1	Multilayer Ceramic Capacitor, 10 uF, 25 V, ± 10%, X5R, 0603 [1608 Metric]	Digikey	1=0.26, 10=0.169, 50=0.1186, 100=0.0958, 500=0.0712, 1000=0.06229, 2500=0.05933, 5000=0.05488 (USD)
7	0603B332K101CT	Walsin Technologies	C13	1	Cap Ceramic 0.0033uF 100V X7R 10% Pad SMD 0603 125C T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.039, 50=0.0224, 100=0.0174, 500=0.01308, 1000=0.01028 (USD)
8	KGM21BCG1H101JT	Kyocera AVX	C14, C15, C32, C35	4	Cap 100pF 50V	Mouser	1=0.11, 10=0.045, 50=0.045, 100=0.026, 1000=0.026, 10000=0.026 (USD)
9	CL10A226MO7JZNC	Samsung	C29	1	Multilayer Ceramic Capacitor, 22 uF, 16 V, ± 20%, X5R, 0603 [1608 Metric]	Digikey	1=0.59, 10=0.398, 50=0.3164, 100=0.2614, 500=0.20418, 1000=0.17355 (USD)
#	0805ZC105JAZ2A	Kyocera AVX	C33, C36, C39, C40, C41, C42, C45	7	Cap Ceramic 1uF 10V X7R 5% SMD 0805 125°C Embossed T/R	Digikey	1=0.17, 10=0.114, 50=0.0682, 100=0.0576, 500=0.0394, 1000=0.03484 (USD)
#	GRM2195C1H103JA01D	Murata	C34, C38	2	Multilayer Ceramic Capacitor, 0.01 uF, 50 V, ± 5%, C0G (NP0), 0805 [2012 Metric]	Digikey	1=0.24, 10=0.158, 50=0.1108, 100=0.0895, 500=0.0665, 1000=0.05818 (USD)
#	CL21B334KBFNNNE	Samsung	C37, C43, C44	3	Multilayer Ceramic Capacitor, 0.33 uF, 50 V, ± 10%, X7R, 0805 [2012 Metric]	Digikey	1=0.1, 10=0.047, 50=0.0272, 100=0.021, 500=0.01584, 1000=0.01244 (USD)
#	BAT41KFILM	STMicroelectronics	D1, D7	2	Low Capacitance Small Signal 200 mA 1 V Schottky Diode Surface Mount - SOD-523	Digikey	1=0.42, 10=0.324, 100=0.1944, 500=0.18004, 1000=0.12242 (USD)
#	SS2PH10-M3/85A	Vishay Semiconductors	D2, D3, D9, D10	4	Diode Schottky 100V 2A 2-Pin SMP T/R	Digikey	1=0.45, 10=0.35, 100=0.21, 500=0.19442, 1000=0.13221, 2000=0.12171, 5000=0.11666 (USD)
#	LTST-C193KFKT-5A	Vishay Lite-On	D4, D6	2	LED; SMD; 0603; orange; 11.2*45mcd; 1.6x0.8x0.35mm; 130°; 1.7+2.3V	Digikey	1=0.39, 10=0.211, 100=0.0981, 500=0.0906, 1000=0.07097, 2000=0.06946 (USD)
#	MM5Z5V6ST1G	ON Semiconductor	D5, D8	2	MM5Z5V6ST1 Series 500 mW 10 mA 5.6 V SMT Zener Voltage Regulator - SOD-523	Digikey	1=0.27, 10=0.188, 100=0.092, 500=0.07672, 1000=0.05331 (USD)
#			H1	1	Header, 1X6-Pin		
#	A691256610002	Würth Electronics	J1, J2, J3	3	Serie 2566 - 10.16 mm Horizontal Entry with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	Digikey	1=3.73, 10=3.272, 50=2.953, 100=2.644, 500=2.49502 (USD)
#	1040	Keystone Electronics	J4, J5, J6, J8, J9, J10, J11, J13, J15, J18	10	MS27478 - Connectors Receptacle Electrical Solder Mounting Solder Type Hermetic Seal 38999 Series II	Digikey	1=0.25, 25=0.1992, 100=0.1618, 250=0.14308, 500=0.13688, 1000=0.11199, 2500=0.10266, 5000=0.09955 (USD)
#	A690207100472	Würth Electronics	J7, J12, J14, J21, J22, J23	6	6902 Series 1.27mm; 2.54mm Pitch Through Hole IDC Connector; Male; 4 Way; 2 Row	Digikey	1=0.48, 10=0.466, 50=0.448, 100=0.43, 500=0.385 (USD)
#			J16, J17, J19, J20	4			

#	CLF6045NIT-221M-D	TDK	L1	1	Inductor Power Shielded Wirewound 220uH 20% 100KHz Ferrite 570mA 864mOhm DCR Automotive T/R	Digikey	1=0.99, 10=0.841, 25=0.7648, 50=0.7188, 100=0.5965, 250=0.55064, 500=0.52004 (USD)
#	83103C	Murata	L2	1	Inductor Power Toroid 10uH 20% 0.75A 0.185Ohm DCR T/R	Digikey	1=2.12, 10=1.803, 25=1.6616, 50=1.4848, 100=1.2372, 250=1.20192, 500=1.1312, 1000=1.0605 (USD)
#	EPC2302	EPC	Q1, Q2, Q3, Q4	4	Trans Gan 100V Die .0019 Ohm	Digikey	1=8.41, 10=7.211, 100=6.0095, 500=5.3025, 1000=4.77225 (USD)
#	RC0603FR-0743K2L	Yageo	R1	1	SMD Chip Resistor, 43.2 kOhm, ± 1%, 100 mW, 0603 [1608 Metric], Thick Film, General Purpose		
#	RC0201FR-077K87L	Yageo	R2	1	Res Thick Film 0201 7.87K Ohm 1% 0.05W(1/20W) ±200ppm/C Pad SMD T/R		
#	MCT06030C3323FP500	Vishay Beyschlag	R3	1	SMD Chip Resistor, 332 kOhm, ± 1%, 125 mW, 0603 [1608 Metric], Thin Film, Professional		
#	ERJ-6GEY0R00V	Panasonic	R4, R6, R7, R22, R23, R25, R26	7	Resistor Thick Film 0805 0 Ohm 1-8w Surface Mount Embossed Carrier Tape and Reel		
#	RMCF0603FT3K65	Stackpole Electronics	R5	1	Res Thick Film 0603 3.65K Ohm 1% 1/10W ±100ppm/°C Molded SMD SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.015, 50=0.009, 100=0.0075, 500=0.00498, 1000=0.00425 (USD)
#	RMCF0603FT51K0	Stackpole Electronics	R8	1	Res Thick Film 0603 51K Ohm 1% 0.1W(1/10W) ±100ppm/C Pad SMD Automotive T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.015, 50=0.009, 100=0.0075, 500=0.00498, 1000=0.00425 (USD)
#	WR06X2201FTL	Walsin Technologies	R9	1	Res Thick Film 0603 2.2K Ohm 1% 0.1W(1/10W) ±100ppm/C Pad SMD T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.016, 50=0.009, 100=0.0072, 500=0.00462, 1000=0.00389 (USD)
#	KDV08FR470ET	Ohmite	R10, R15, R27, R33	4	Res 470M Ohm 1% 1/4W 0805	Digikey	1=0.26, 10=0.212, 25=0.1624, 50=0.1178, 100=0.0828, 250=0.067, 500=0.05278, 1000=0.03654 (USD)
#	ESR10EZPJ2R2	Rohm	R11, R30	2	Res Thick Film 0805 2.2 Ohm 5% 2/5W ±200ppm/°C Molded SMD SMD Paper T/R	Digikey	1=0.13, 10=0.065, 50=0.0434, 100=0.037, 500=0.02654, 1000=0.02336 (USD)
#	RC0805FR-0710RL	Yageo	R12, R17, R31, R34	4	SMD Chip Resistor, 10 Ohm, ± 1%, 125 mW, 0805 [2012 Metric], Thick Film, General Purpose	Digikey	1=0.1, 10=0.043, 50=0.0282, 100=0.0238, 500=0.01678, 1000=0.01462 (USD)
#	RT0805BRD0710RL	Yageo	R13, R28	2	SMD Chip Resistor, 10 Ohm, ± 0.1%, 125 mW, 0805 [2012 Metric], Thin Film, High Precision High Stability	Digikey	1=0.34, 10=0.244, 50=0.1882, 100=0.1672, 500=0.12508, 1000=0.1098 (USD)
#	RMCF0603FT11K3	Stackpole Electronics	R14	1	Res Thick Film 0603 11.3K Ohm 1% 1/10W ±100ppm/°C Molded SMD SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.015, 50=0.009, 100=0.0075, 500=0.00498, 1000=0.00425 (USD)
#	RNCP0805FTD10K0	Stackpole Electronics	R16, R19, R21, R32, R35, R36, R37	7	Res Thin Film 0805 10K Ohm 1% 1/4W ±100ppm/°C Molded SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.025, 50=0.0208, 100=0.019, 500=0.01506, 1000=0.01349 (USD)
#	RMCF0805FT330R	Stackpole Electronics	R20	1	Res Thick Film 0805 330 Ohm 1% 0.125W ±100ppm/°C Molded SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.02, 50=0.0124, 100=0.0103, 500=0.007, 1000=0.00601 (USD)
#	RG2012N-104-W-T1	Susumu	R29, R41, R43, R46	4	SMD-Thin Film Res. 0805 0, 125W 0, 05% 100	Digikey	1=0.9, 10=0.631, 50=0.4792, 100=0.423, 500=0.31288 (USD)
#	RMCF0805FT750R	Stackpole Electronics	R39, R42, R45	3	Res Thick Film 0805 750 Ohm 1% 0.125W ±100ppm/°C Molded SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.02, 50=0.0124, 100=0.0103, 500=0.007, 1000=0.00601 (USD)
#	RMCF0805JT51K0	Stackpole Electronics	R40, R44, R47	3	Res Thick Film 0805 51K Ohm 5% 0.125W(1/8W) ±200ppm/C Pad SMD Automotive T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.017, 50=0.0104, 100=0.0087, 500=0.0058, 1000=0.00494 (USD)
#	RG2012N-222-W-T1	Susumu	R48, R49	2	Thin Film Chip Resistors 0805 Size, 1/10W, 2.2 Kohm, 0.05%, 10Ppm Susumu RG2012N-222-W-T1	Digikey	1=0.9, 10=0.631, 50=0.4792, 100=0.423, 500=0.31288 (USD)
#	LM5018SD/NOPB	Texas Instruments	U1	1	7.5-100V Wide Vin, 300mA Constant On-Time Synchronous Buck Regulator 8-WSO -40 to 125	Digikey	1=3.82, 10=3.428, 25=3.2404, 100=2.8085, 250=2.66448, 500=2.39084 (USD)
#	STDRIVEG600	STMicroelectronics	U2, U4	2	Gate Driver, 4.75V-20V, SOIC;	Digikey	1=2.92, 10=2.626, 50=2.4778, 100=2.1111, 250=1.98224, 500=1.73444, 1000=1.43711, 2500=1.338, 5000=1.28845 (USD)
#	TPS62177DQCR	Texas Instruments	U3	1	Conv DC-DC 4.75V to 28V Synchronous Step Down Single-Out 3.3V 0.5A 10-Pin WSON EP T/R	Digikey	1=1.61, 10=1.442, 25=1.3688, 100=1.1242, 250=1.05088, 500=0.9287, 1000=0.73318 (USD)
#	OPA365AIDBVR	Texas Instruments	U5, U7, U9	3	IC OPAMP GP 50MHZ RRO SOT23-5	Digikey	1=2.16, 10=1.938, 25=1.828, 100=1.5575, 250=1.46248, 500=1.27968, 1000=1.0603 (USD)
#	DSPIC33CH512MP508T-I/PT	Microchip	U6	1	16-bit MCU/DSC, 512 KB, 49152 Bytes, 100 MHz, 3 to 3.6V, TQFP-80, RoHS	Digikey	1=6.6, 25=6.06, 100=5.48 (USD)

	#	DSC1001DI1-008.0000T	Microchip	U8	1	MEMS Oscillator, Low Power, -40C-85C, 50ppm 4 VDFN 2.0x2.5mm T/R RoHS Compliant: Yes		
	Aprobado				140			
	Notas							

Apéndice C. Código del microcontrolador para la adquisición de datos.

```
1
2 int main(void)
3 {
4     SYSTEM_Initialize();
5     LATBbits.LATB14 = 0;
6     LATBbits.LATB15 = 0;
7     SCCP2_Timer_Stop();
8     IFS1bits.CCT2IF = 0;
9     printf("inicio");
10    __delay_ms(5000);
11    SCCP2_Timer_Start();
12    printf("inicio");
13    while(1)
14    {
15        if(k<1000)
16        {
17            // printf("k=%d\n", k);
18        }
19        else
20        {
21            SCCP2_Timer_Stop();
22            LATEbits.LATE0 = 0;
23            for (int p = 0; p < 1000; p++)
24            {
25                // Imprime el dato en el formato especificado
26                printf("C%.2f/F%.2f/V%d/", Corrientes[p], Flujos[p],
27                    vector[p]);
28            }
29        }
30    }
```

APÉNDICE C. CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

```
30         k=0;
31     }
32 }
33 }
34
35 void __attribute__ ( ( interrupt, no_auto_psv ) ) _CCT2Interrupt (void)
36 {
37
38     i++;
39     ADCON3Lbits.SWCTRG = 1; //SWCTRG = 1;
40     while(ADSTATLbits.AN4RDY==0);
41     Flujo = Flujo + ADCBUF4;
42
43     ADCON3Lbits.SWCTRG = 1; //SWCTRG = 1;
44     while(ADSTATLbits.AN7RDY==0); //Esperar a que finalice la
        conversion
45     Corriente =(ADCBUF7 *3.3)/4095;
46
47     Corriente = Corriente*Corriente;
48     Corriente2 = Corriente2+Corriente;
49
50     if( i == 1000)
51     {
52
53         Flujos[k] = Flujo/i;
54         Corrientes[k] = sqrt(Corriente2/i);
55         Flujo=0;
56         Corriente = 0;
57         Corriente2 = 0;
58
59         bit = ((lfsr >> 0) ^ (lfsr >> 2) ^ (lfsr >> 3) ^ (lfsr >> 5)) &
            1;
60         lfsr = (lfsr >> 1) | (bit << 15); // Desplaza y alimenta el bit
            calculado
61
```

APÉNDICE C. CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

```
62      // Guarda el valor del bit menos significativo en el vector
63      vector[k] = lfsr & 1;
64
65      LATEbits.LATE0 = vector[k];
66
67      k++;
68      i = 0;
69  }
70
71
72  if(NULL != SCCP2_TimeoutHandler)
73  {
74      (*SCCP2_TimeoutHandler)();
75  }
76  IFS1bits.CCT2IF = 0;
77 }
78
79 void SCCP2_Timer_PeriodCountSet(size_t count)
80 {
81     CCP2PRL = (uint16_t)(count & MASK_32_BIT_LOW);
82     CCP2CON1Lbits.T32 = 0;
83 }
```

Apéndice D. Esquema del sistema de electrólisis controlado.

Apéndice E. PCB's del convertidor de potencia.

U_FuentesAisladas
FuentesAisladas.SchDoc

**FUENTES
AISLADAS**

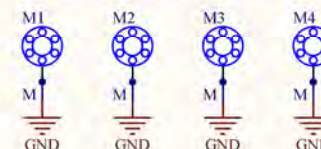
U_Fuente 5V
Fuente 5V.SchDoc

FUENTE +/- 5V

U_Fuente 3V3
Fuente 3V3.SchDoc

FUENTE 3.3 V

Tornillos de montaje



U_Sensores
Sensores.SchDoc

SENSORES

SenFlujo
SenPres
SenCor
SCL
SDA

U_Microcontrolador
Microcontrolador.SchDoc

SenFlujo
SenPres
SenCor
SCL
SDA

MICROCONTROLADOR

PWMH
PWML

Repeat(U_Gate,1,2)
Gate.SchDoc

PWMH
PWML

DRIVER

TITULO: TESIS

DOCUMENTO: Principal.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

HOJA 1 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

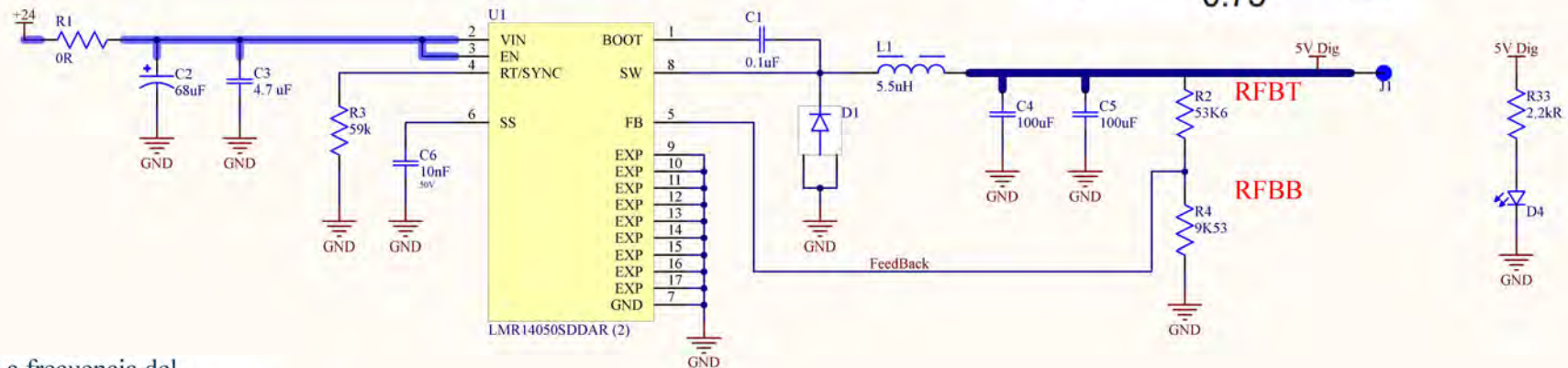
Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Fuente de 5V

El voltaje de salida se controla a través del voltaje en FB a través de las resistencias de feedback.

$$R_{FBT} = \frac{V_{OUT} - 0.75}{0.75} R_{FBB}$$



La frecuencia del convertidor se controla a través de la resistencia de RT/SYNC.

$$R_T(k\Omega) = 32537 \times f_{SW}(kHz)^{-1.045}$$

TITULO: TESIS

DOCUMENTO: Fuente 5V.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

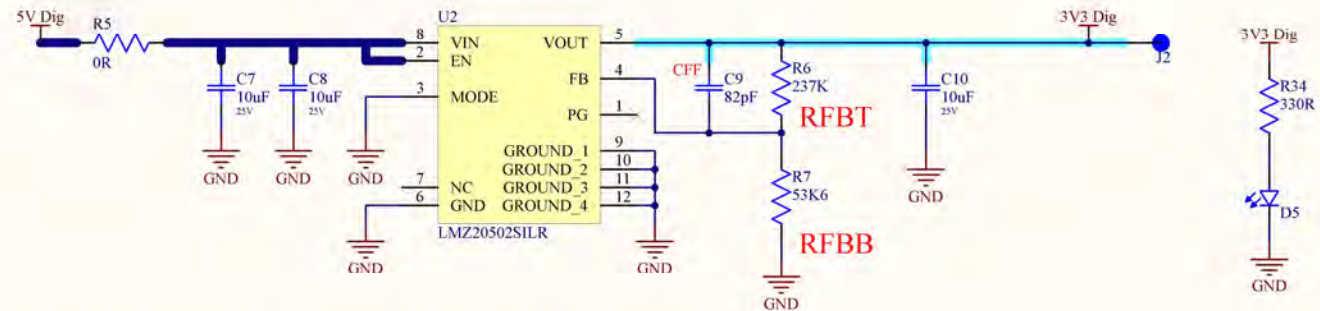
HOJA 2 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Fuente de 3V3



V _{OUT} (V)	R _{FBB} (kΩ)	R _{FBT} (kΩ)	C _{OUT} (μF)	EFFECTIVE C _{OUT} (μF) ⁽²⁾	C _{FF} (pF)	C _{IN} (μF)	EFFECTIVE C _{IN} (μF) ⁽²⁾
0.8	121	40.2	2 x 10	18 μF	39	2 x 10	14
1.2	30.1	30.1	10	8.8 μF	20	2 x 10	14
1.8	40.2	80.6	10	8.4 μF	16	2 x 10	14
2.5	47.5	150	10	7.8 μF	12	2 x 10	14
3.3	53.2	237	10	7.1 μF	82	2 x 10	14
3.6	53.2	267	10	6.8 μF	82	2 x 10	14

El voltaje de salida se controla a través del voltaje en FB a través de las resistencias de feedback.

$$R_{FBB} = \frac{0.6}{(V_{OUT} - 0.6)} \cdot R_{FBT}$$

TITULO: TESIS

DOCUMENTO: Fuente 3V3.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

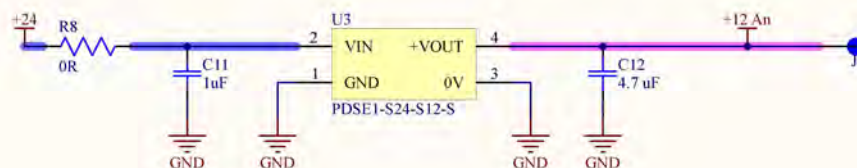
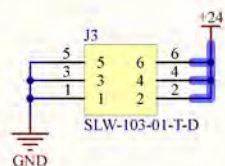
HOJA 3 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

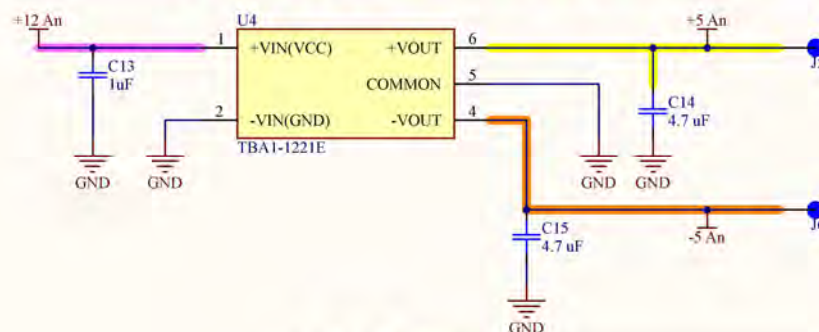
Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Fuente de 12V



Fuente +/- 5V



TITULO: TESIS

DOCUMENTO: FuentesAisladas.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

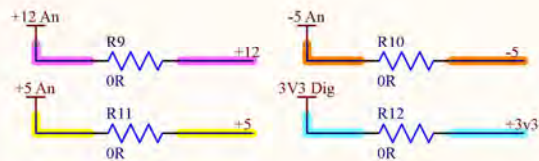
HOJA 4 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

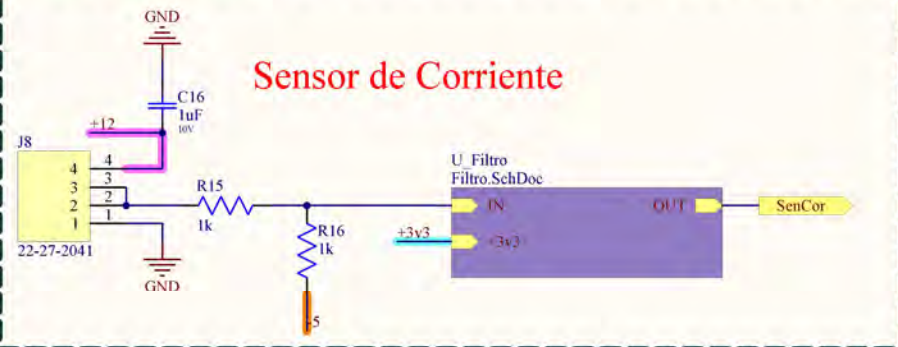
Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Sensores



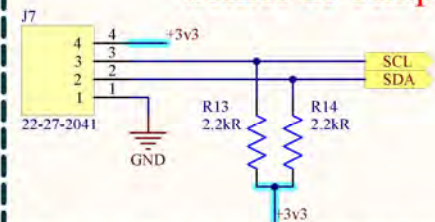
Sensor de Corriente



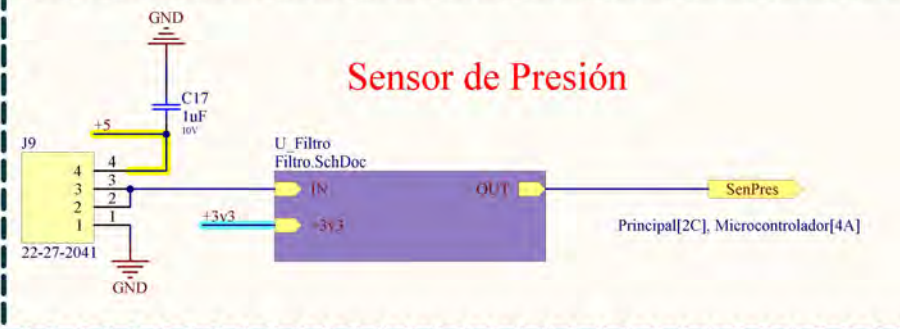
Sensor de Flujo HHO



Sensor de Temperatura



Sensor de Presión



TÍTULO: TESIS

DOCUMENTO: Sensores.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

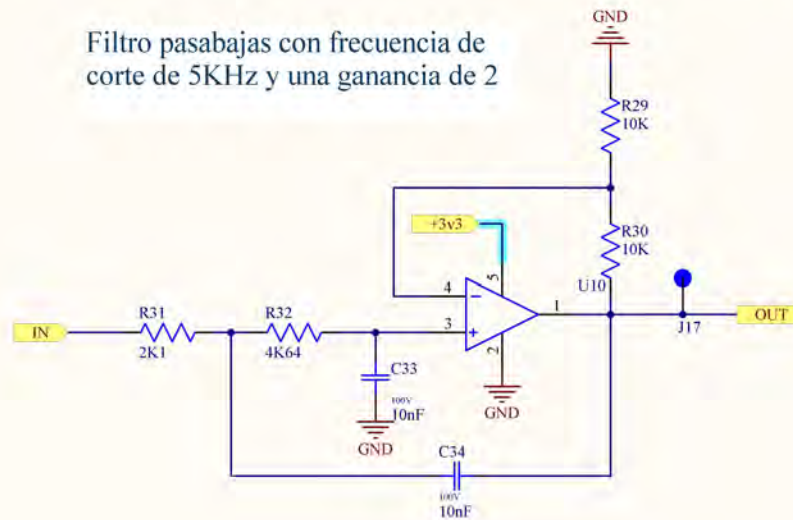
HOJA 5 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

Filtro pasa bajas Sallen-Key

Filtro pasabajas con frecuencia de corte de 5KHz y una ganancia de 2



TITULO: TESIS

DOCUMENTO: Filtro.SchDoc

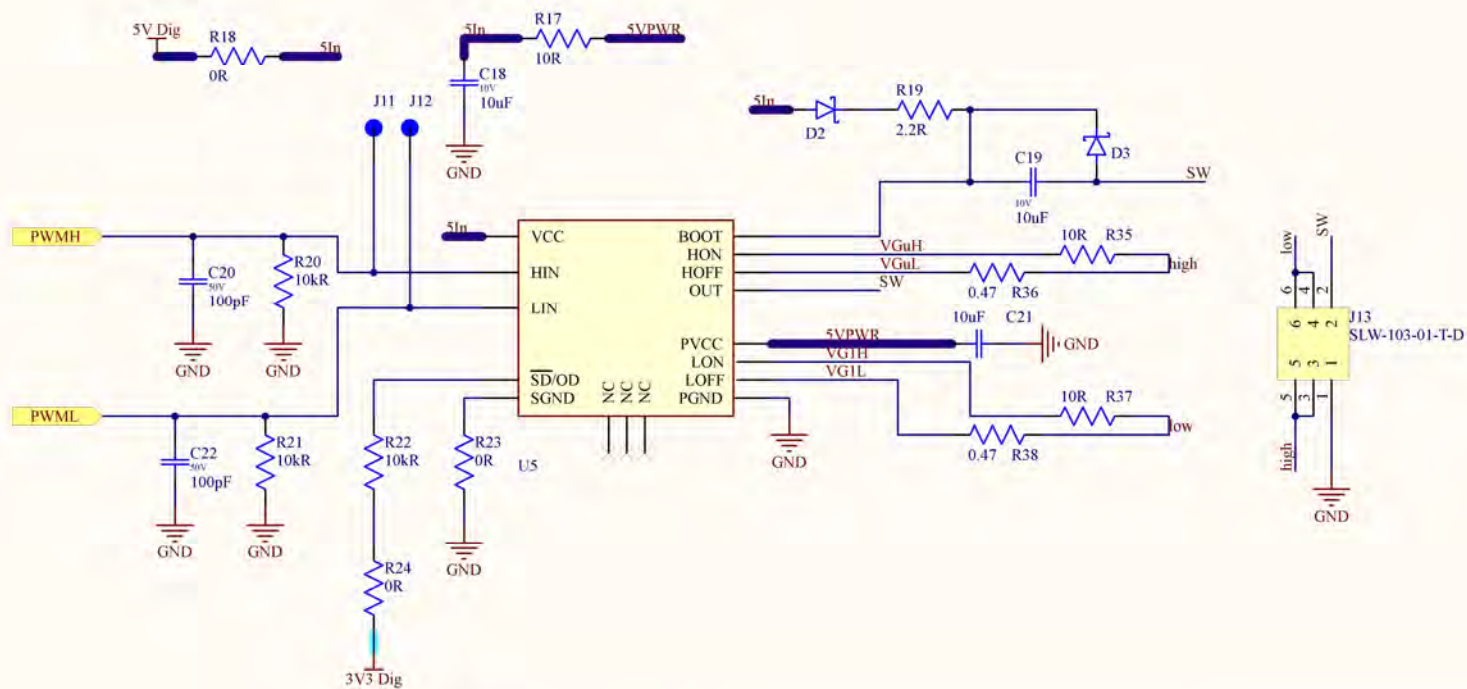
PROYECTO: PRJ_04

HOJA 6 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

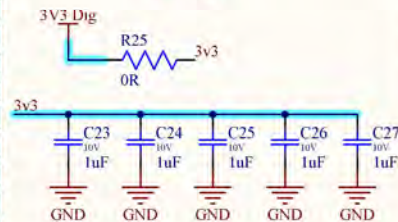
Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

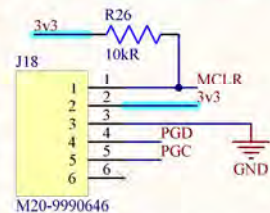


Microcontrolador

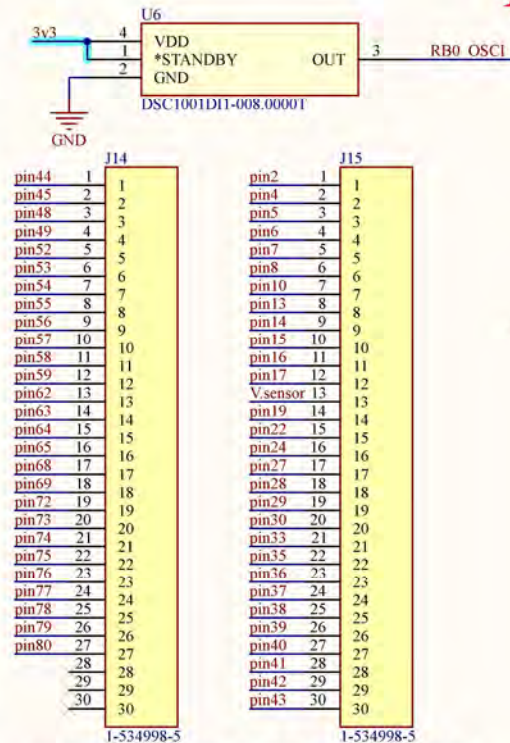
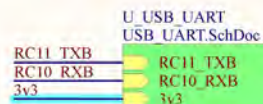
V.Inp



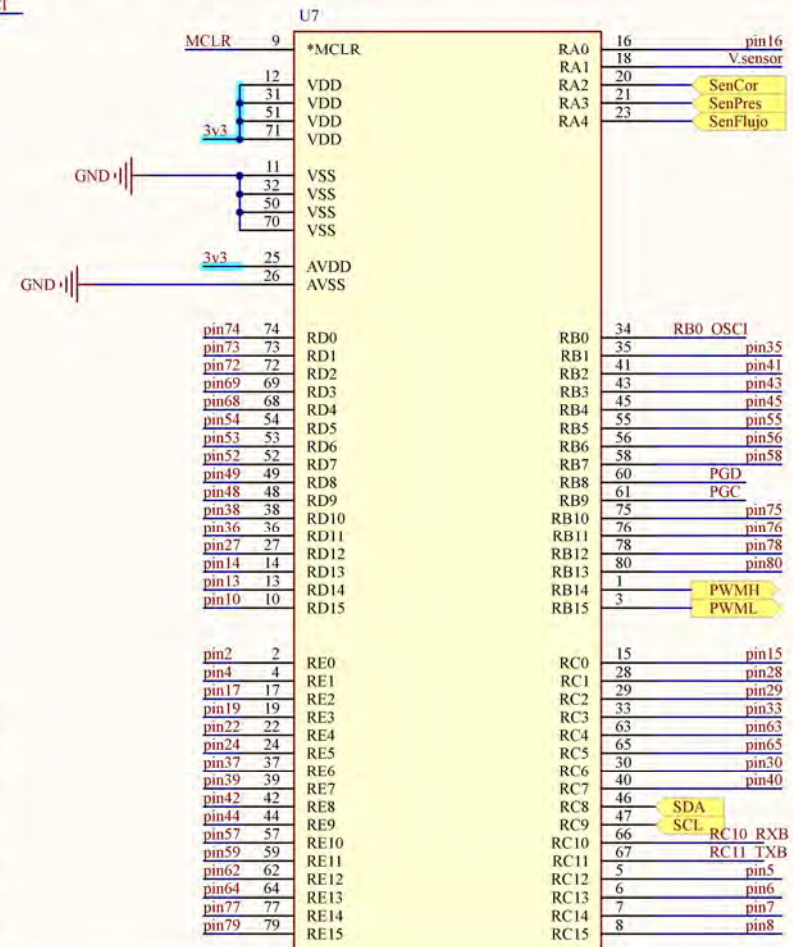
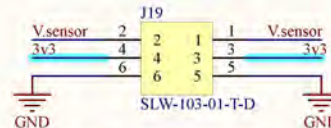
Programming/Debug



UART/USB



FB BUCK



TITULO: TESIS

DOCUMENTO: Microcontrolador.SchDoc

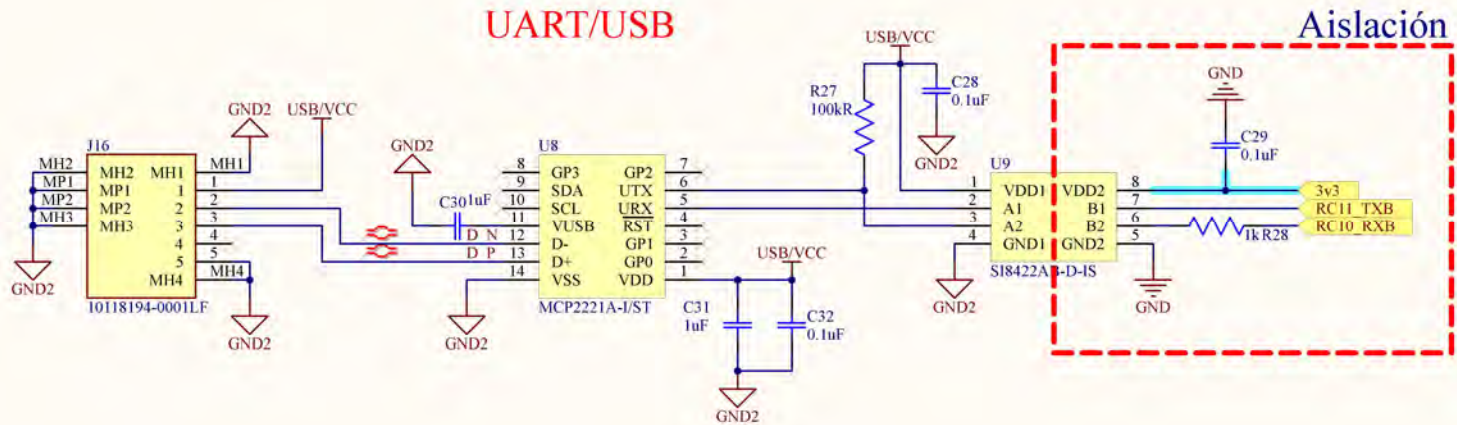
PROYECTO: PRJ_04

HOJA 8 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



TITULO: TESIS

DOCUMENTO: USB_UART.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

HOJA 9 DE 9

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A4 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

D

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE			
		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES:	DRAWN		20/04/2025			
		FRACTIONAL±	CHECKED			TITLE		
		ANGULAR: MACH± BEND ±	ENG APPR.					
		TWO PLACE DECIMAL ±	MFG APPR.					
		THREE PLACE DECIMAL ±						
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:	Q.A.					
		MATERIAL	COMMENTS:			SIZE	DWG. NO.	
NEXT ASSY	USED ON	FINISH						
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING				SCALE: 1:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 2

D

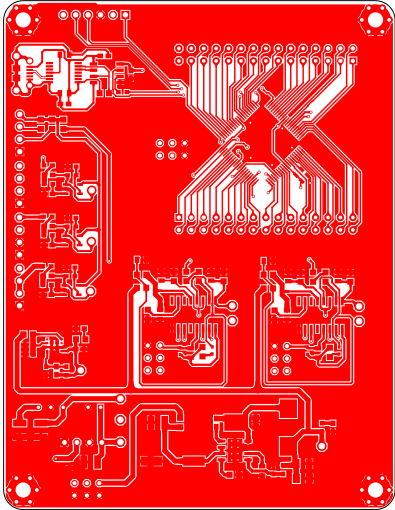
A

B

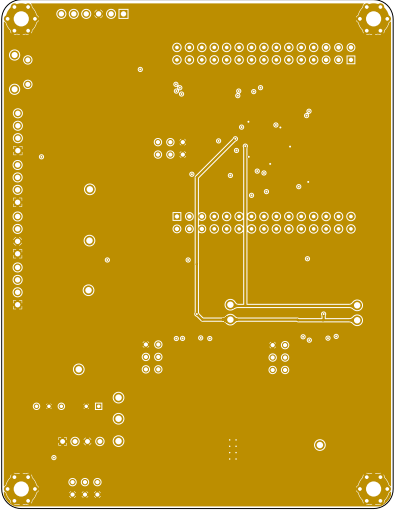
C

D

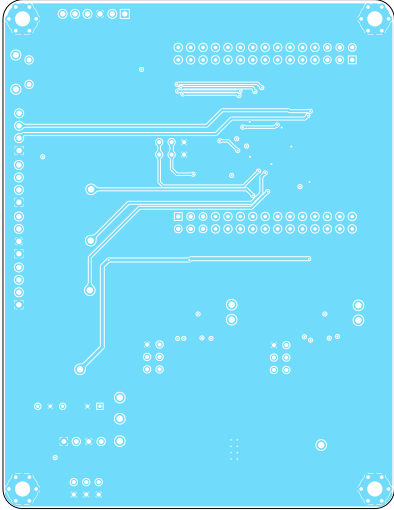
Top Layer (Scale 1:1)



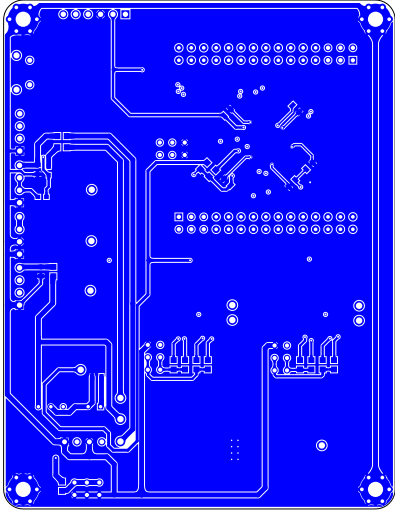
Layer 1 (Scale 1:1)



Layer 2 (Scale 1:1)



Bottom Layer (Scale 1:1)



THE INFORMATION CONTAINED IN
THIS DRAWING IS THE SOLE
PROPERTY OF
. ANY REPRODUCTION IN PART OR
AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF IS

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL± ANGULAR: MACH± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ± INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER: MATERIAL FINISH DO NOT SCALE DRAWING	NAME	DATE	TITLE		
			DRAWN	20/04/2025			
			CHECKED				
			ENG APPR.				
			MFG APPR.				
			Q.A.		COMMENTS:		
					SIZE DWG. NO.		
NEXT ASSY	USED ON				SCALE: 1:1	WEIGHT:	SHEET 2 OF 2
APPLICATION							

A

B

C

D

Lista de materiales

Bill of Materials for Project [AdquisicionControl.PrjPcb] (No PCB Document Selected)

Fuente:

AdquisicionControl.PrjPcb

Proyecto:

AdquisicionControl.PrjPcb

Variante:

None



Report Date:

02:09 a. m.

Print Date:

8:46:45 PM

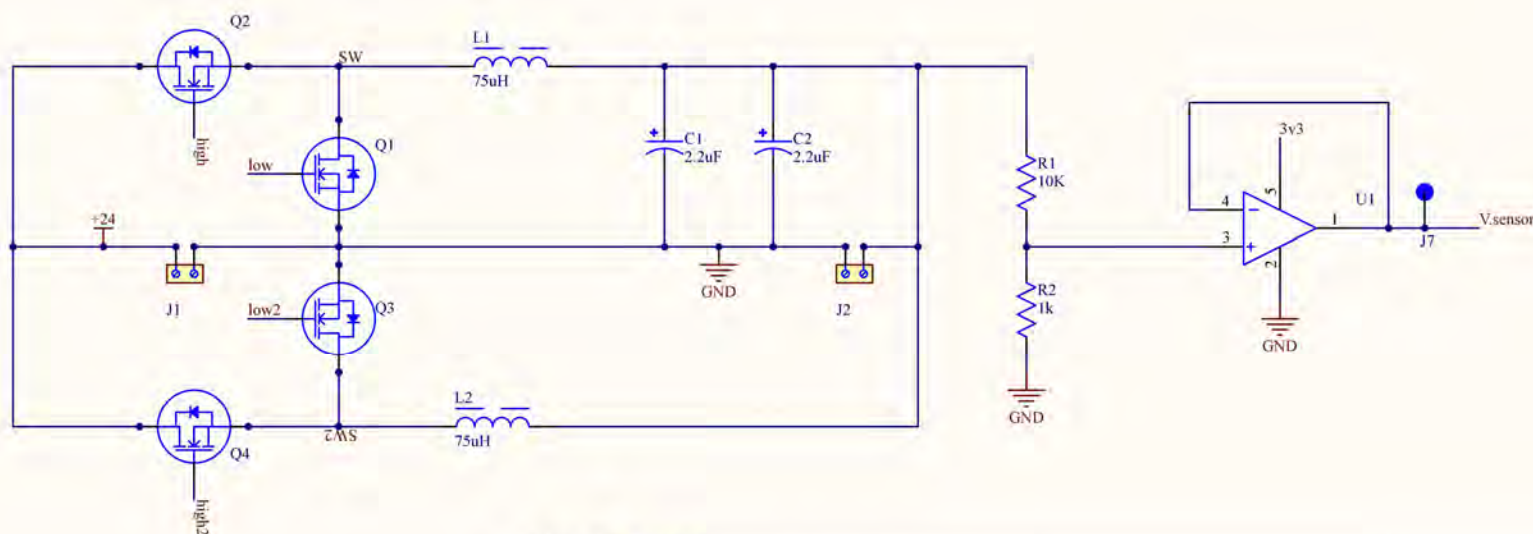
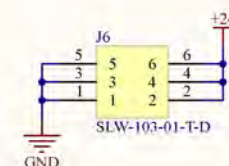
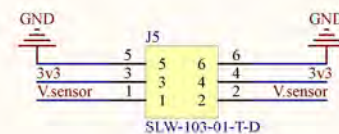
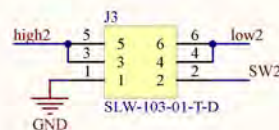
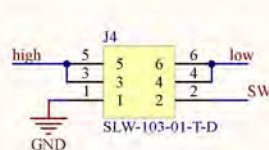
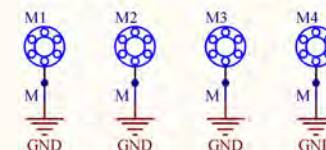
#	Manufacturer Part Number	Manufacturer	Designator	Quantity	Description	Supplier	Pricing
1	885012206071R	Würth Electronics	C1, C28, C29, C32	4	Cap, 0.1uF, 25V, Mlcc, 0603 Rohs Compliant: Yes [Würth Elektronik 885012206071R]	Mouser	1=0.1, 10=0.048, 50=0.038, 100=0.032, 1000=0.032, 10000=0.032 (USD)
2	50SVPF68M	Panasonic	C2	1	Cap Aluminum Polymer 68uF 50VDC 20%(10 X 12.6mm) SMD 0.02 Ohm 4300mA 5000h 105C T/R	Mouser	1=2.4, 10=1.87, 50=1.66, 100=1.21, 1000=0.969, 10000=0.915 (USD)
3	GRM32ER71H475KA88L	Murata	C3, C12, C14, C15	4	Multilayer Ceramic Capacitor, 4.7 uF, 50 V, ± 10%, X7R, 1210 [3225 Metric]	Mouser	1=1.41, 10=0.978, 50=0.978, 100=0.786, 1000=0.553, 10000=0.479 (USD)
4	C3216X5R1A107M160AC	TDK	C4, C5	2	Multilayer Ceramic Capacitor, C Series, 100 - F, - 20%, X5R, 10 V, 1206 [3216 Metric]	Mouser	1=1.03, 10=0.671, 50=0.671, 100=0.529, 1000=0.366, 10000=0.331 (USD)
5	GRM2195C1H103JA01D	Murata	C6	1	Multilayer Ceramic Capacitor, 0.01 uF, 50 V, ± 5%, C0G (NP0), 0805 [2012 Metric]	Digikey	1=0.24, 10=0.158, 50=0.1108, 100=0.0895, 500=0.0665, 1000=0.05818 (USD)
6	GRM188R61E106KA73J	Murata	C7, C8, C10	3	Multilayer Ceramic Capacitor, 10 uF, 25 V, ± 10%, X5R, 0603 [1608 Metric]	Digikey	1=0.26, 10=0.169, 50=0.1186, 100=0.0958, 500=0.0712, 1000=0.06229, 2500=0.05933, 5000=0.05488 (USD)
7	06035A820JAT2A	Kyocera AVX	C9	1	Multilayer Ceramic Capacitor, 82 pF, 50 V, ± 5%, C0G (NP0), 0603 [1608 Metric]	Mouser	1=0.1, 10=0.035, 50=0.035, 100=0.02, 1000=0.015, 10000=0.01 (USD)
8	08055C105K4Z4A	Kyocera AVX	C11, C13, C30, C31	4	Cap Ceramic 1uF 50V X7R 10% 0805 T/R	Mouser	1=0.32, 10=0.213, 50=0.213, 100=0.128, 1000=0.085, 10000=0.069 (USD)
9	0805ZC105JAZ2A	Kyocera AVX	C16, C17, C23, C24, C25, C26, C27	7	Cap Ceramic 1uF 10V X7R 5% SMD 0805 125°C Embossed T/R	Digikey	1=0.17, 10=0.114, 50=0.0682, 100=0.0576, 500=0.0394, 1000=0.03484 (USD)
#	CL21A106KPCLQNC	Samsung	C_1_18, C_1_19, C_1_21, C_2_18, C_2_19, C_2_21	6	Multilayer Ceramic Capacitor, 10 uF, 10 V, ± 10%, X5R, 0805 [2012 Metric]	Digikey	1=0.11, 10=0.077, 50=0.0462, 100=0.0364, 500=0.0269, 1000=0.02226 (USD)
#	KGM21BCG1H101JT	Kyocera AVX	C_1_20, C_1_22, C_2_20, C_2_22	4	Cap 100pF 50V	Mouser	1=0.11, 10=0.045, 50=0.045, 100=0.026, 1000=0.026, 10000=0.026 (USD)
#	GCM188R72A103KA37D	Murata	C_1_33, C_1_34, C_2_33, C_2_34, C_3_33, C_3_34	6	Multilayer Ceramic Capacitor, 0.01 uF, 100 V, ± 10%, X7R, 0603 [1608 Metric]		
#	PDS1045-13	Diodes	D1	1	DIODE SCHOTTKY 45V 10A POWERDI5	Mouser	1=1.5, 10=1.23, 50=1.23, 100=0.955, 1000=0.643, 10000=0.643 (USD)
#	LTST-C193KFKT-5A	Vishay Lite-On	D4, D5	2	LED; SMD; 0603; orange; 11.2+45mcd; 1.6x0.8x0.35mm; 130°; 1.7+2.3V	Digikey	1=0.39, 10=0.211, 100=0.0981, 500=0.0906, 1000=0.07097, 2000=0.06946 (USD)
#	BAT41KFILM	STMicroelectronics	D_1_2, D_2_2	2	Low Capacitance Small Signal 200 mA 1 V Schottky Diode Surface Mount - SOD-523	Digikey	1=0.42, 10=0.324, 100=0.1944, 500=0.18004, 1000=0.12242 (USD)
#	MM5Z5V6ST1G	ON Semiconductor	D_1_3, D_2_3	2	MM5Z5V6ST1 Series 500 mW 10 mA 5.6 V SMT Zener Voltage Regulator - SOD-523	Digikey	1=0.27, 10=0.188, 100=0.092, 500=0.07672, 1000=0.05331 (USD)
#	1040	Keystone Electronics	J1, J2, J4, J5, J6, J_1_11, J_1_12, J_1_17, J_2_11, J_2_12, J_2_17, J_3_17	12	MS27478 - Connectors Receptacle Electrical Solder Mounting Solder Type Hermetic Seal 38999 Series II	Digikey	1=0.25, 25=0.1992, 100=0.1618, 250=0.14308, 500=0.13688, 1000=0.11199, 2500=0.10266, 5000=0.09955 (USD)
#	SLW-103-01-T-D	Samtec	J3, J_1_13, J_2_13	3	Connector Female SLW/103/01/T/D SAMTEC X3=2 DUAL pas2.54	Mouser	1=0.86, 10=0.86, 50=0.66, 100=0.54, 1000=0.34, 10000=0.16 (USD)
#	22-27-2041	Molex	J7, J8, J9, J10	4	KK® 254 Wire-to-Board Header, Vertical, with Friction Lock, 4 Circuits, Tin (Sn) Plating	Mouser	1=0.43, 10=0.291, 50=0.291, 100=0.251, 1000=0.211, 10000=0.189 (USD)
#	1-534998-5	TE Connectivity	J14, J15	2	Conn Socket Strip RCP 30 POS 2.54mm Solder ST Thru-Hole Automotive Tube	Mouser	1=5.94, 10=5.48, 50=5.34, 100=5.34, 1000=4.08, 10000=3.97 (USD)
#	10118194-0001LF	Amphenol ICC / FCI	J16	1	USB Connector, 5 Contact(s), Female, Right Angle, Surface Mount Terminal, Locking, Receptacle	Mouser	1=0.43, 10=0.339, 50=0.339, 100=0.299, 1000=0.272, 10000=0.205 (USD)

#	M20-9990646	Harwin	J18	1	Conn Unshrouded Header HDR 6 POS 2.54mm Solder ST Thru-Hole Bulk/Loose	Mouser	1=0.3, 10=0.255, 50=0.255, 100=0.198, 1000=0.141, 10000=0.114 (USD)
#	744325550	Würth Electronics	L1	1	Power Choke Shielded Wirewound 5.5uH/4.3uH 20% 100KHz 10A 10.3mOhm DCR T/R	Mouser	1=4.27, 10=4.19, 50=3.87, 100=3.71, 1000=3.06, 10000=3.05 (USD)
#	ERJ-6GEY0R00V	Panasonic	R1, R5, R8, R9, R10, R11, R12, R25, R_1_18, R_1_23, R_1_24, R_2_18, R_2_23, R_2_24	14	Resistor Thick Film 0805 0 Ohm 1-8w Surface Mount Embossed Carrier Tape and Reel		
#	CRCW060353K6FKEA	Vishay	R2, R7	2	SMD Chip Resistor, 53.6 kOhm, ± 1%, 100 mW, 0603 [1608 Metric], Thick Film, General Purpose	Mouser	1=0.1, 10=0.017, 50=0.017, 100=0.01, 1000=0.007, 10000=0.003 (USD)
#	CRCW080559K0FKEA	Vishay	R3	1	SMD Chip Resistor, 59 kOhm, ± 1%, 125 mW, 0805 [2012 Metric], Thick Film, General Purpose	Mouser	1=0.1, 10=0.025, 50=0.025, 100=0.015, 1000=0.011, 10000=0.006 (USD)
#	CRCW06039K53FKEA	Vishay	R4	1	SMD Chip Resistor, 9.53 kOhm, ± 1%, 100 mW, 0603 [1608 Metric], Thick Film, General Purpose	Mouser	1=0.1, 10=0.017, 50=0.017, 100=0.01, 1000=0.008, 10000=0.004 (USD)
#	CRCW0603237KFKEA	Vishay	R6	1	SMD Chip Resistor, 237 kOhm, ± 1%, 100 mW, 0603 [1608 Metric], Thick Film, General Purpose	Mouser	1=0.1, 10=0.017, 50=0.017, 100=0.01, 1000=0.008, 10000=0.004 (USD)
#	RG2012N-222-W-T1	Susumu	R13, R14	2	Thin Film Chip Resistors 0805 Size, 1/10W, 2.2 Kohm, 0.05%, 10Ppm Susumu RG2012N-222-W-T1	Digikey	1=0.9, 10=0.631, 50=0.4792, 100=0.423, 500=0.31288 (USD)
#	ERJ-3EKF1001V	Panasonic	R15, R16, R28	3	Res Thick Film 0603 1K Ohm 1% 1/10W ±100ppm/°C Molded SMD Punched Carrier T/R	Mouser	1=0.1, 10=0.02, 50=0.02, 100=0.012, 1000=0.009, 10000=0.007 (USD)
#	RNCP0805FTD10K0	Stackpole Electronics	R26, R_1_20, R_1_21, R_1_22, R_2_20, R_2_21, R_2_22	7	Res Thin Film 0805 10K Ohm 1% 1/4W ±100ppm/°C Molded SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.025, 50=0.0208, 100=0.019, 500=0.01506, 1000=0.01349 (USD)
#	RG2012N-104-W-T1	Susumu	R27	1	SMD-Thin Film Res. 0805 0, 125W 0, 05% 100	Digikey	1=0.9, 10=0.631, 50=0.4792, 100=0.423, 500=0.31288 (USD)
#	WR06X2201FTL	Walsin Technologies	R33	1	Res Thick Film 0603 2.2K Ohm 1% 0.1W(1/10W) ±100ppm/°C Pad SMD T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.016, 50=0.009, 100=0.0072, 500=0.00462, 1000=0.00389 (USD)
#	RMCF0805FT330R	Stackpole Electronics	R34	1	Res Thick Film 0805 330 Ohm 1% 0.125W ±100ppm/°C Molded SMD Paper T/R	Digikey	1=0.1, 10=0.02, 50=0.0124, 100=0.0103, 500=0.007, 1000=0.00601 (USD)
#	RT0805BRD0710RL	Yageo	R_1_17, R_2_17	2	SMD Chip Resistor, 10 Ohm, ± 0.1%, 125 mW, 0805 [2012 Metric], Thin Film, High Precision High Stability	Digikey	1=0.34, 10=0.244, 50=0.1882, 100=0.1672, 500=0.12508, 1000=0.1098 (USD)
#	ESR10EZPJ2R2	Rohm	R_1_19, R_2_19	2	Res Thick Film 0805 2.2 Ohm 5% 2/5W ±200ppm/°C Molded SMD Paper T/R	Digikey	1=0.13, 10=0.065, 50=0.0434, 100=0.037, 500=0.02654, 1000=0.02336 (USD)
#	RC0201FR-7D10KL	Yageo	R_1_29, R_1_30, R_2_29, R_2_30, R_3_29, R_3_30	6	General Purpose Chip Resistor Thick Film 0201 10kOhm 1% Paper T/R	Mouser	1=0.1, 10=0.025, 50=0.025, 100=0.013, 1000=0.008, 10000=0.005 (USD)
#	ERJ-1GNF2101C	Panasonic	R_1_31, R_2_31, R_3_31	3	SMD Chip Resistor, 2.1 kOhm, ± 1%, 50 mW, 0201 [0603 Metric], Thick Film, General Purpose	Mouser	1=0.1, 10=0.023, 50=0.023, 100=0.014, 1000=0.01, 10000=0.007 (USD)
#	CRCW02014K64FNED	Vishay	R_1_32, R_2_32, R_3_32	3	SMD Chip Resistor, 4.64 kOhm, ± 1%, 50 mW, 0201 [0603 Metric], Thick Film, General Purpose	Mouser	1=0.1, 10=0.032, 50=0.032, 100=0.015, 1000=0.01, 10000=0.006 (USD)
#	LMR14050SDDAR	Texas Instruments	U1	1	IC REG BUCK ADJ 5A	Mouser	1=3.11, 10=2.64, 50=2.64, 100=2.29, 1000=1.65, 10000=1.46 (USD)
#	LMZ20502SILR	Texas Instruments	U2	1	2.7V to 5.5V, 2A High Density Nano Module 8-uSiP -40 to 125	Mouser	1=4.55, 10=3.87, 50=3.87, 100=3.35, 1000=2.41, 10000=2.28 (USD)
#	PDSE1-S24-S12-S	CUI	U3	1	12 Vdc, 0.083 A, 1 W, 21.6~26.4 Vdc Input Range	Mouser	1=2.53, 10=2.52, 50=2.38, 100=2.37, 1000=2.37, 10000=2.37 (USD)
#	TBA1-1221E	Traco Power	U4	1	DC DC CONVERTER +/-5V 1W	Mouser	1=3.48, 10=3.47, 50=3.37, 100=3.07, 1000=2.96, 10000=2.96 (USD)
#	DSC1001DI1-008.0000T	Microchip	U6	1	MEMS Oscillator, Low Power, -40C-85C, 50ppm 4 VDFN 2.0x2.5mm T/R RoHS Compliant: Yes		
#	DSPIC33CH512MP508T-I/PT	Microchip	U7	1	16-bit MCU/DSC, 512 KB, 49152 Bytes, 100 MHz, 3 to 3.6V, TQFP-80, RoHS	Digikey	1=6.6, 25=6.06, 100=5.48 (USD)
#	MCP2221A-I/ST	Microchip	U8	1	USB 2.0 to I2C/UART Protocol Converter with GPIO I2C/UART Interface 3.3V/5V 14-Pin TSSOP Tube	Mouser	1=2.73, 10=2.64, 50=2.31, 100=2.12, 1000=2.1, 10000=2.03 (USD)
#	SI8422AB-D-IS	Skyworks Solutions	U9	1	Dual Ch 2.5kV Isolator, 1M, 1/1, SOIC8, lead free, ADuM 1200 pinout	Mouser	1=2.59, 10=2.2, 50=2.2, 100=1.75, 1000=1.27, 10000=1.14 (USD)
#	STDRIVEG600	STMicroelectronics	U_1_5, U_2_5	2	Gate Driver, 4.75V-20V, SOIC;	Digikey	1=2.92, 10=2.626, 50=2.4778, 100=2.1111, 250=1.98224, 500=1.73444, 1000=1.43711, 2500=1.338, 5000=1.28845 (USD)

	#	OPA365AIDBVR	Texas Instruments	U_1_10, U_2_10, U_3_10	3	IC OPAMP GP 50MHZ RRO SOT23-5	Digikey	1=2.16, 10=1.938, 25=1.828, 100=1.5575, 250=1.46248, 500=1.27968, 1000=1.0603 (USD)
	Aprobado				137			
	Notas							

Convertidor BUCK

Tornillos de montaje



TITULO: TESIS

DOCUMENTO: Buck.SchDoc

PROYECTO: PRJ_04

HOJA 1 DE 1

ESCAL 1:1 TAMAÑO: A3 AUTOR: Gabriel Cervantes Mejia

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

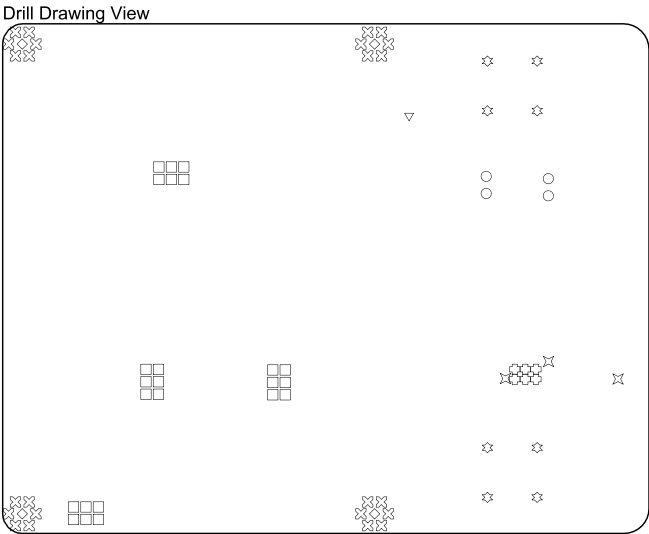
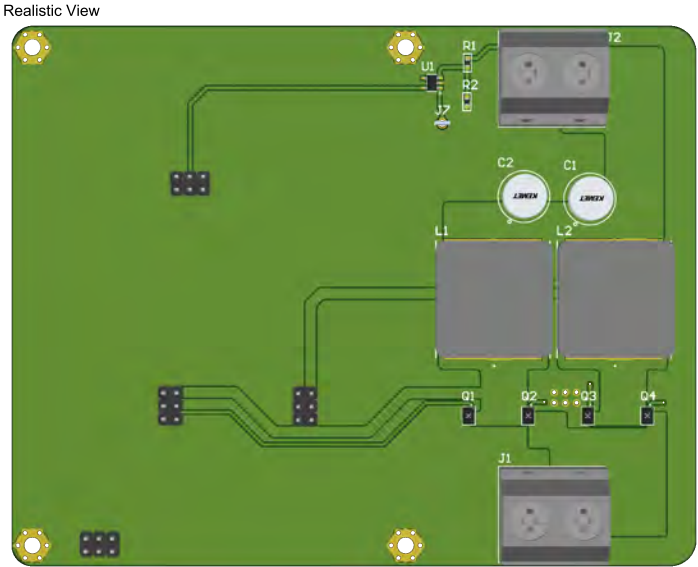
cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

A

B

C

D



Layer Stack Legend

Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber
	Top Overlay			Legend	GTO
Surface Material	Top Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GTS
Copper	Top Layer	0.04mm		Signal	GTL
		0.32mm	FR-4	Dielectric	
		0.32mm	FR-4	Dielectric	
		0.32mm	FR-4	Dielectric	
Copper	Bottom Layer	0.04mm		Signal	GBL
Surface Material	Bottom Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GBS
	Bottom Overlay			Legend	GBO

Total thickness: 1.05mm

Drill Table

Symbol	Count	Hole Size	Plated	Hole Tolerance
□	24	0.86	Plated	
☆	8	1.60	Plated	
◇	4	3.10	Plated	
⊠	24	0.76	Plated	
○	4	0.80	Plated	
▽	1	1.32	Plated	
✱	3	0.40	Plated	
⊗	6	0.71	Plated	

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF . ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	
		DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN		20/04/2025	
		TOLERANCES:	CHECKED			TITLE
		FRACTIONAL±	ENG APPR.			
		ANGULAR: MACH± BEND ±	MFG APPR.			
		TWO PLACE DECIMAL ±	Q.A.			
		THREE PLACE DECIMAL ±	COMMENTS:			
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:				SIZE DWG. NO.
		MATERIAL				
		FINISH				
NEXT ASSY	USED ON	DO NOT SCALE DRAWING				SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 2
APPLICATION						

A

B

C

D

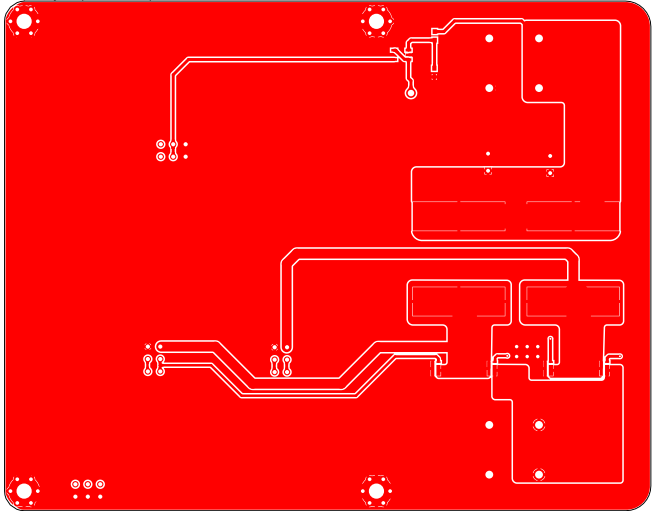
A

B

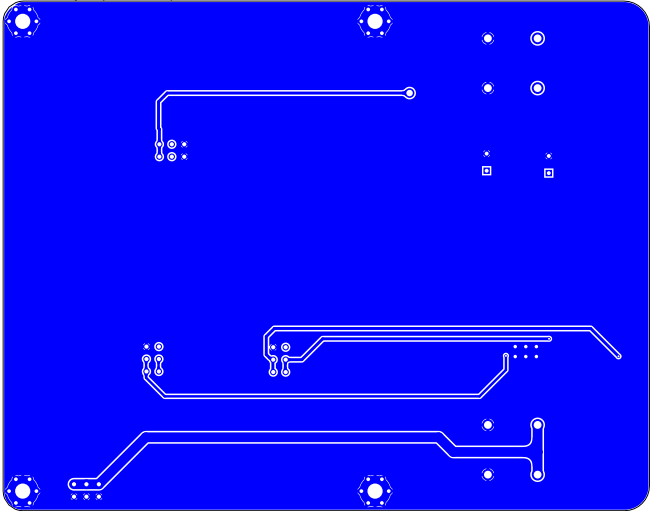
C

D

Top Layer (Scale 1:1)



Bottom Layer (Scale 1:1)



THE INFORMATION CONTAINED IN
THIS DRAWING IS THE SOLE
PROPERTY OF
. ANY REPRODUCTION IN PART OR
AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF IS

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE			
		DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN		20/04/2025	TITLE		
		TOLERANCES:	CHECKED					
		FRACTIONAL ±	ENG APPR.					
		ANGULAR: MACH ± BEND ±	MFG APPR.					
		TWO PLACE DECIMAL ±	Q.A.			COMMENTS:		
		THREE PLACE DECIMAL ±						
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:				SIZE	DWG. NO.	
		MATERIAL						
		FINISH						
	NEXT ASSY	USED ON						
	APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING			SCALE: 1:1	WEIGHT:	SHEET 2 OF 2

A

B

C

D

Lista de materiale Bill of Materials for Project [Convertidor de potencia.PrjPcb] (No PCB Document Selected)

Fuente:	Convertidor de potencia.PrjPcb
Proyecto:	Convertidor de potencia.PrjPcb
Variante:	None

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Report Date:	02:06 a. m.
--------------	-------------

Print Date: 8:50:36 PM

#	Manufacturer Part Number	Manufacturer	Designator	Quantity	Description	Supplier	Pricing
1	A759KK225M2EAAE685	KEMET	C1, C2	2	Cap Aluminum 2.2uF 250V 20% (8 X 8mm) Radial Aluminum Cylindrical Can 3.5mm 0.685 Ohm 210mA 2000hr 125°C Bulk	Mouser	1=1.09, 10=0.815, 50=0.815, 100=0.61, 1000=0.429, 10000=0.364 (USD)
2	691256610002	Würth Electronics	J1, J2	2	Serie 2566 - 10.16 mm Horizontal Entry with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	Digikey	1=3.73, 10=3.272, 50=2.953, 100=2.644, 500=2.49502 (USD)
3	IHLP8787MZER750M51	Vishay Dale	L1, L2	2	Inductor Power Shielded Wirewound 75uH 20% 100KHz Powdered Iron 12A 32.35mOhm DCR 8787 T/R	Mouser	1=7.31, 10=6.53, 50=6.04, 100=5.81, 1000=5.76, 10000=5.76 (USD)
4	GAN7R0-150LBEZ	Nexperia	Q1, Q2, Q3, Q4	4	150 V, 7 mOhm Gallium Nitride (GaN) FET in a 2.2 mm x 3.2 mm x 0.774 mm Land Gri	Mouser	1=2.94, 10=2.65, 50=2.65, 100=2.14, 1000=1.63, 10000=1.25 (USD)

Aprobado

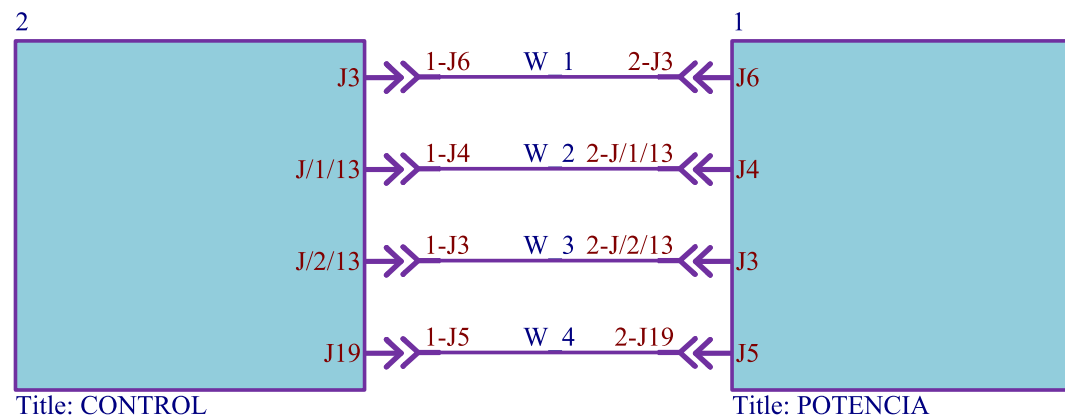
Notas

A

B

C

D

TITULO: **TESIS**DOCUMENTO: **MultiBoardSchematic1.MbsDoc**PROYECTO: **PRJ_04**HOJA **1** DE **1**ESCAL 1:1 | TAMAÑO: **A4** | AUTOR: **Gabriel Cervantes Mejia**

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

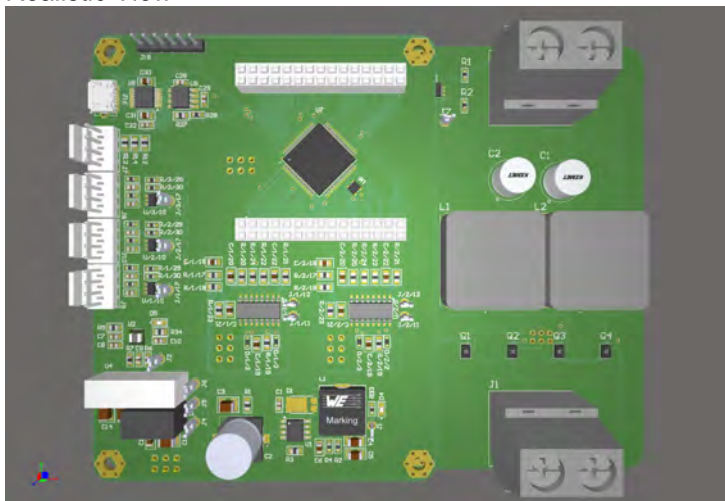
A

B

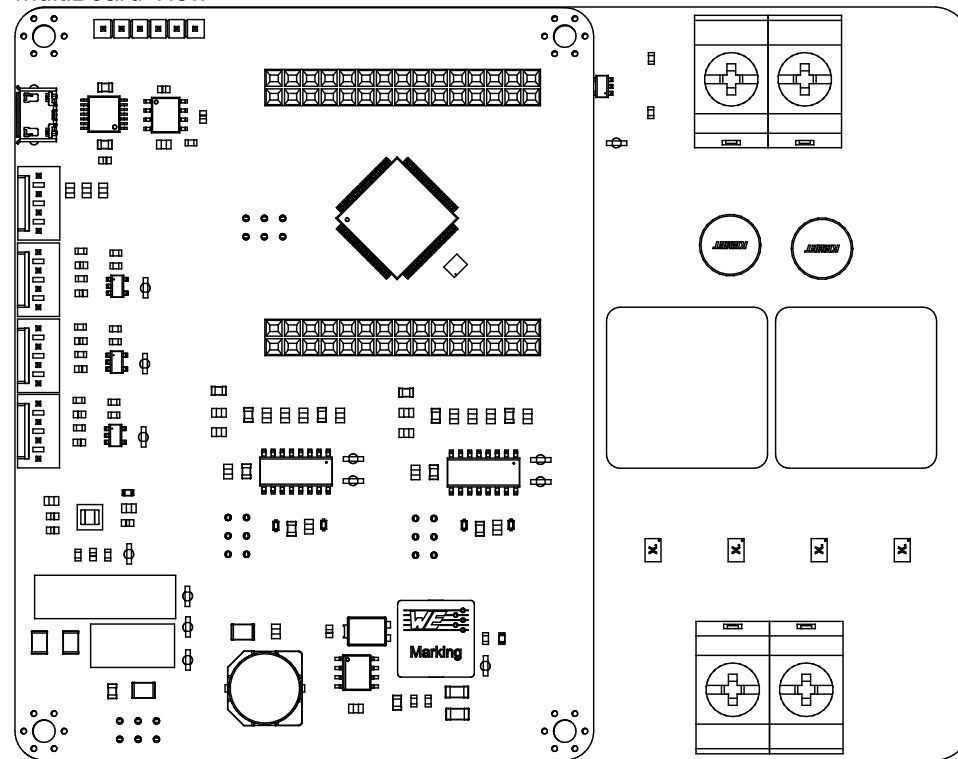
C

D

Realistic View



MultiBoard View

TITULO: **TESIS**DOCUMENTO: **Assembly1.MbDwf**PROYECTO: **PRJ_04**HOJA **1** DE **1**ESCAL 1:1 TAMAÑO: **A4** AUTOR: **Gabriel Cervantes Mejia**

Contacto: "m23ce012@cenidet.tecnm.mx" para más detalles

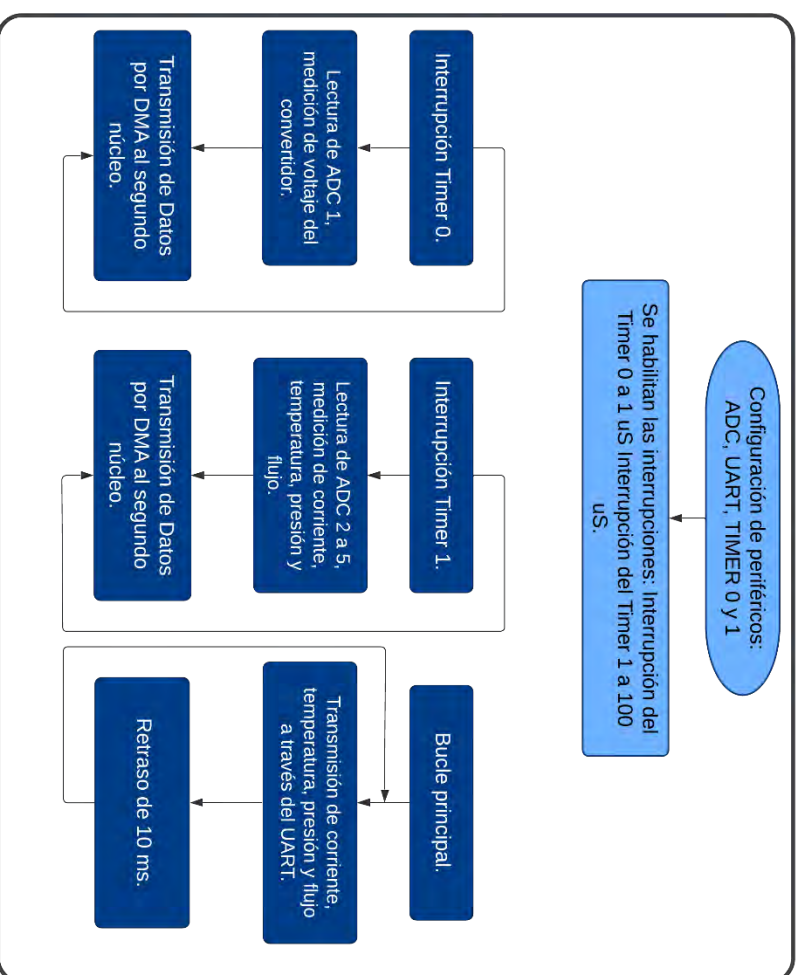
cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Apéndice F. Flujo de trabajo en los núcleos del DSP y el código ensamblador del controlador PI y la RNA inversa.

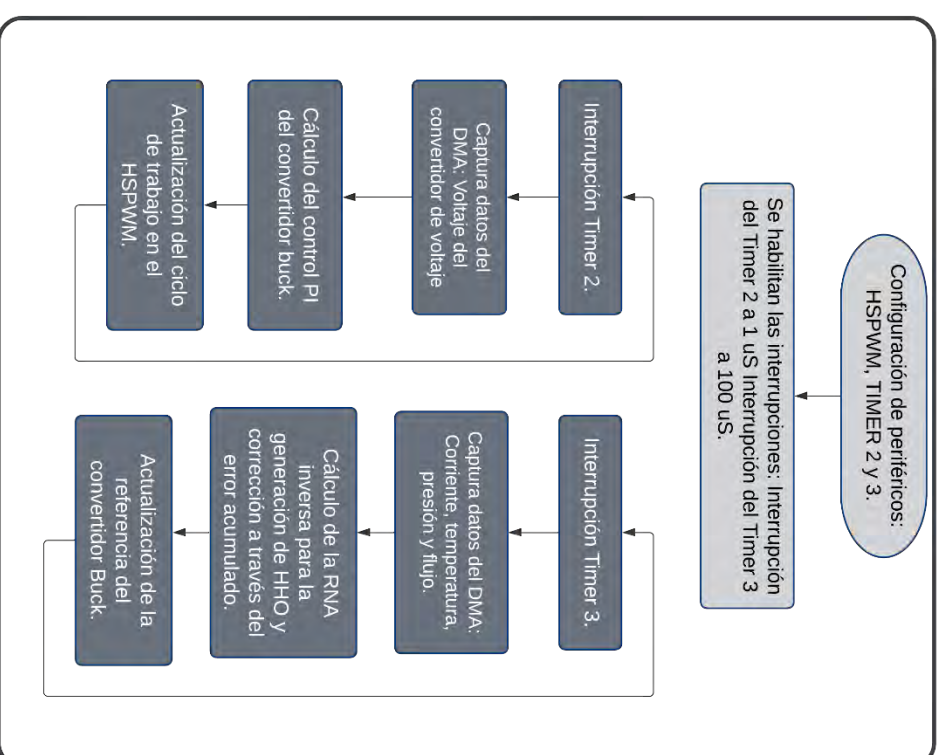
Proceso de flujo de ejecución del DSP.

Cervantes Mejía Gabriel MIE

Núcleo principal.



Núcleo Secundario



APÉNDICE F. FLUJO DE TRABAJO EN LOS NÚCLEOS DEL DSP Y EL CÓDIGO ENSAMBLADOR DEL CONTROLADOR PI Y LA RNA INVERSA.

```
1      ; ADCON3Lbits.SWCTRG = 1;
2      bset      ADCON3L, #0      ; Bit 0 = SWCTRG
3
4      ; while(ADSTATLbits.AN1RDY==0);
5      esperar_adc:
6      btss      ADSTATL, #1      ; AN1RDY en bit 1
7      bra       esperar_adc
8
9      ; Cargar ADCBUF1 y convertir a float
10     mov        ADCBUF1, W0
11     rcall      __int_to_float    ; Convierte W0 a float en ACCA
12
13     ; Multiplicar por 36.3
14     mov        #_const36_3, W1
15     rcall      __fmul           ; ACCA = ACCA * [W1]
16
17     ; Dividir por 4095.0
18     mov        #_const4095, W1
19     rcall      __fdiv           ; ACCA = ACCA / [W1]
20
21     ; Guardar resultado como "Voltaje"
22     mov        #Voltaje, W1
23     rcall      __store_float_acca ; Guarda ACCA en Voltaje
24
25     ; error = SetPoint - Voltaje
26     mov        #SetPoint, W0
27     rcall      __load_float     ; Cargar SetPoint en ACCA
28
29     mov        #Voltaje, W1
30     rcall      __fsub           ; ACCA = SetPoint - Voltaje
31
32     mov        #error, W1
33     rcall      __store_float_acca ; Guardar ACCA en error
34
35     ; proporcional = KP * error
```

APÉNDICE F. FLUJO DE TRABAJO EN LOS NÚCLEOS DEL DSP Y EL CÓDIGO ENSAMBLADOR DEL CONTROLADOR PI Y LA RNA INVERSA.

```
36      mov      #KP, W0
37      rcall    __load_float      ; KP -> ACCA
38
39      mov      #error, W1
40      rcall    __fmul            ; ACCA = KP * error
41
42      mov      #proporcional, W1
43      rcall    __store_float_acca
44
45      ; integral += KI * error * 0.00005
46      mov      #KI, W0
47      rcall    __load_float
48      mov      #error, W1
49      rcall    __fmul            ; ACCA = KI * error
50
51      mov      #_const_0_00005, W1
52      rcall    __fmul
53
54      mov      #integral, W1
55      rcall    __fadd            ; ACCA = integral + temp
56
57      rcall    __store_float_acca ; integral = nuevo valor
58
59      ; if (integral > 100.0) integral = 100.0;
60      mov      #integral, W0
61      rcall    __load_float
62
63      mov      #_const_100, W1
64      rcall    __fcmpgt
65
66      bra      Z, comprobar_bajo
67      mov      #_const_100, W0
68      mov      #integral, W1
69      rcall    __store_float
70
```

APÉNDICE F. FLUJO DE TRABAJO EN LOS NÚCLEOS DEL DSP Y EL CÓDIGO ENSAMBLADOR DEL CONTROLADOR PI Y LA RNA INVERSA.

```
71     comprobar_bajo:
72     mov     #integral, W0
73     rcall   __load_float
74     clr     W1
75     rcall   __fcmpgt
76
77     bra     Z, calcular_duty
78     clr     W0
79     mov     #integral, W1
80     rcall   __store_float
81
82     calcular_duty:
83     ; duty = proporcional + integral
84     mov     #proporcional, W0
85     rcall   __load_float
86
87     mov     #integral, W1
88     rcall   __fadd
89
90     mov     #duty, W1
91     rcall   __store_float_acca
92
93     ; duty = duty / 100
94     mov     #duty, W0
95     rcall   __load_float
96
97     mov     #_const_100, W1
98     rcall   __fdiv
99
100    ; PG1DC = duty * 80
101    mov     #_const_80, W1
102    rcall   __fmul
103
104    ; Convertir a entero
105    rcall   __float_to_int
```

APÉNDICE F. FLUJO DE TRABAJO EN LOS NÚCLEOS DEL DSP Y EL CÓDIGO ENSAMBLADOR DEL CONTROLADOR PI Y LA RNA INVERSA.

```
106
107     ; Guardar en PG1DC
108     mov     W0, PG1DC
109
110     ; if(NULL != SCCP2_TimeoutHandler)
111     mov     #SCCP2_TimeoutHandler, W0
112     cp0     W0
113     bra     Z, omitir_llamada
114
115     call    [W0]
116
117     omitir_llamada:
118     bclr    IFS1, #CCT2IF      ; Limpiar bandera de interrupcion
```