



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL  
SISTEMA DE CONTROL DE UN  
REACTOR OXIHIDRÓGENO PARA EL  
ENRIQUECIMIENTO DE GASOLINA.**

---

**TESIS**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**MAESTRO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTA**  
**ING. CARLOS ALEJANDRO CEDANO MARTÍNEZ**

**DIRECTOR**  
**DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA**

**CO-DIRECTOR**  
**DRA. ROSA DE GUADALUPE GONZÁLEZ HUERTA**

**ASESORES**

**DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL**

**DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC**

**DR. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ**



UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
**SERVICIOS ESCOLARES**  
**TITULACIONES**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2017



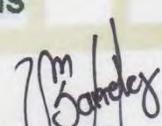
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL  
COMITÉ DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y APROBADA  
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

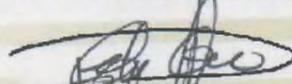
MAESTRO EN MECATRÓNICA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

CO-DIRECTOR:

  
DRA. ROSA DE GUADALUPE GONZÁLEZ HUERTA

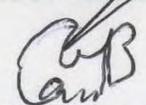
ASESOR:

  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:

  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

ASESOR:  
  
UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
SERVICIOS ESCOLARES  
TITULACIONES

  
DR. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2017.

## **Agradecimientos**

A mi mamá Rosa María, a mis hermanas Mónica Alejandra y Rosa María y toda mi familia les doy las gracias por nunca dudar de mí, por siempre apoyarme cuando más lo necesite y por siempre apreciar mi forma de hacer las cosas.

A mis hermanos no consanguíneos Luis Arturo y Luis Tello les doy las gracias por siempre apoyarme, por siempre extenderme la mano y siempre estar a mi lado sin importar cuan bizarra fue la situación.

A mis amigos y compañeros de maestría les agradezco su amistad, apoyo y unidad los cuales fueron esenciales para superar los retos a los que nos enfrentamos.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta por su vital apoyo, guía y paciencia que me ayudo a desarrollarme e hizo posible la realización de esta tesis.

Agradezco a mi co-directora la Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta y mi asesor el Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool por enlazar caminos y proyectos entre la UQROO y el IPN. Su apoyo y diferentes perspectivas fueron esenciales para enriquecer y llevar a término a esta tesis.

Al Dr. Freddy Ignacio Chan Puc y al Dr. Guillermo Becerra Núñez les agradezco por ser mis asesores ya que su guía fue de suma importancia.

Agradecimientos bastos al IPN por el apoyo otorgado al proyecto multidisciplinario 1820 (2017-2018).

Agradecimientos bastos al CONACYT por el apoyo otorgado para el desarrollo del proyecto 280335 de la Red Temática del Hidrógeno, 280088 del Laboratorio Nacional de Tecnologías del Hidrógeno y proyector PIE 240368 y 240366.

# **Diseño y construcción del sistema de control de un reactor oxihidrógeno para el enriquecimiento de gasolina.**

Carlos Alejandro Cedano Martínez

## Resumen

Los vehículos de motor de combustión interna son un factor clave en la economía y se espera que continúe el crecimiento de la demanda de vehículos que utilizan gasolina.

La gasolina, como otros combustibles fósiles, son un recurso no renovable y cuyas reservas disminuyen constantemente, por esta razón, mejorar la eficiencia y reducir las emisiones es de gran importancia para las reservas energéticas y protección ambiental.

Existen vehículos con sistemas híbridos y otras tecnologías que disminuyen el consumo de combustible y generación de contaminantes, no obstante la mayoría de los vehículos en circulación no cuentan o no son compatibles con las nuevas tecnologías.

En esta tesis se propone el enriquecer a la gasolina con la adición de hidrógeno a la mezcla para mejorar la combustión y disminuir los contaminantes. El hidrógeno es considerado como un combustible alternativo prometedor para los motores de combustión interna, que a diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno puede ser generado mediante energías renovables.

El desarrollo central del trabajo de tesis es diseñar y construir un sistema de control. Mediante un convertidor reductor de corriente directa a corriente directa (CD-CD), que proporciona la potencia de forma eficiente a un electrolizador alcalino, se produce hidrógeno y oxígeno con hasta un 99% de pureza.

# **Design and construction of a control system of an oxyhydrogen reactor for the enrichment of gasoline.**

Carlos Alejandro Cedano Martínez

## Abstract

Internal combustion engine vehicles are a key factor in the economy and is expected to continue the growth in demand for vehicles using gasoline.

Gasoline, like other fossil fuels, is a non-renewable resource whose reserves are constantly declining. Due to this reason, to improve the efficiency and to reduce emissions is of great importance for energy reserves and environmental protection

There are vehicles with hybrid systems and other technologies that reduce fuel consumption and pollutants generation, however most of the vehicles do not have or they are not compatible with the new technologies.

This thesis proposes to enrich gasoline by adding hydrogen to the mixture of fuel and oxygen in order to improve combustion and reduce pollutants. Hydrogen is regarded as a promising alternative fuel for internal combustion engines, which unlike fossil fuels, it can be generated by renewable energy.

The central development of this thesis is to design and build a control system. By using a buck converter that provides power to an alkaline electrolyzer that produces hydrogen and oxygen with up to 99% purity.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABLAS.....	ix

### CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción .....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivo general.....	2
1.4 Objetivos particulares .....	2
1.5 Metodología .....	3
1.6 Alcance de la tesis.....	3

### CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1 Combustibles fósiles y autotransporte .....	5
2.2 Motor de combustión interna .....	6
2.2.1 Análisis termodinámico.....	9
2.3 Hidrógeno como combustible.....	13
2.3.1 Propiedades del hidrógeno .....	15
2.3.2 Consecuencias de las propiedades del hidrógeno en motores de combustión interna.....	17
2.4 Fuentes de hidrógeno convencionales .....	19
2.4.1 Metano reformado con vapor .....	19
2.4.2 Reacción de desplazamiento agua-gas .....	21
2.4.3 Oxidación parcial de metano.....	21
2.4.4 Reforma autotérmica de metano .....	21

2.4.5 Producción de hidrógeno a partir de aceite pesado y carbón .....	22
2.5 Electrólisis del agua para la producción de hidrógeno .....	22
2.6 Electrolizador alcalino .....	23
2.6.1 Química de electrólisis del agua.....	24
2.6.2 Analogía del circuito eléctrico de las celdas de electrólisis del agua.....	27
2.6.3 Resistencias en un sistema de electrólisis de agua .....	28
2.6.4 Tensiones teóricas de celda .....	29
2.6.5 Eficiencias de las celdas. ....	31
Conclusiones .....	34

### CAPÍTULO III                      EL ELECTROLIZADOR ALCALINO

3.1 Electrolizador alcalino .....	35
3.2 Caracterización de un electrolizador alcalino .....	37
3.3 Cálculo teórico de hidrógeno generado .....	48
Conclusiones.....	49

### CAPÍTULO IV                      DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA Y CONTROL

4.1 Requerimiento de la etapa de potencia .....	51
4.2 Convertidor reductor.....	52
4.3 Convertidor reductor síncrono .....	53
4.4 Cálculo de un convertidor reductor síncrono.....	55
4.5 Diseño de la etapa de control del convertidor reductor .....	57
4.6 Simulación de convertidor reductor y control PI.....	60
4.7 Construcción de convertidor reductor y control PI.....	63
Conclusiones.....	67

## CAPÍTULO V RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Introducción .....	69
5.2 Pruebas en puntos de operación .....	71
5.3 Eficiencia del convertidor reductor.....	73
5.4 Respuesta dinámica.....	74
Conclusiones .....	79

## CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

6.1 Trabajos futuros .....	82
REFERENCIAS.....	83



## LISTA DE FIGURAS

Figura. 2.1 Consumo energético total en México en el año 2015. ....	5
Figura. 2.2 Motor de combustión por chispa (bujía). ....	6
Figura. 2.3 Ciclo de Otto en coordenadas P/V y T/S .....	7
Figura. 2.4 Relación potencia de salida y el número de octanaje de un motor a gasolina típico. ....	10
Figura. 2.5 Presión en función del volumen de un motor a gasolina típico. ....	11
Figura. 2.6 Reformación de vapor de metano, 4 pasos típicos. ....	20
Figura. 2.7 Electrolizador alcalino de dos celdas. ....	25
Figura. 2.8 Las resistencias eléctricas típicas en un sistema de electrólisis de agua. ....	27
Figura. 2.9 Tensión de celda del electrolizador Vs la temperatura de funcionamiento. ....	30
Figura. 3.1 Electrolizador alcalino mono-celda. ....	35
Figura. 3.2 Curva característica tensión Vs corriente del electrolizador alcalino de 7 celdas. ....	36
Figura. 3.3 Fuente de alimentación BK PRECISION XLN10014. ....	37
Figura. 3.4 Composiciones típicas de la tensión de una celda de electrólisis de agua alcalina. ....	38
Figura. 3.5 Electrolizador alcalino en etapas de escalamiento, 1, 4 y 7 celdas. ....	39
Figura. 3.6 Arreglo para pruebas con fuente de alimentación y electrolizador alcalino. ....	40
Figura. 3.7 Curva característica de electrolizador alcalino de 1 celda con escalones de corriente de 5 segundos de duración. ....	41
Figura. 3.8 Curva característica de electrolizador alcalino de 1 celda con escalones de corriente de 5 minutos por escalón. ....	41
Figura. 3.9 Curva característica de electrolizador alcalino de 4 celdas con escalones de corriente de 5 segundos de duración. ....	42
Figura. 3.10 Curva característica de electrolizador alcalino de 4 celdas con escalones de corriente de 5 minutos de duración. ....	42
Figura. 3.11 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas con escalones de corriente de 5 segundos de duración. ....	43

Figura. 3.12 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas con escalones de corriente de 5 minutos de duración.....	43
Figura. 3.13 Electrolizador de 7 celdas instrumentado con termopares.....	45
Figura. 3.14 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, tensión Vs corriente, de 16 a 14 V, 2 horas por escalón.....	45
Figura. 3.15 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, corriente vs temperatura, de 16 a 14 V, 2 horas por escalón.....	46
Figura. 3.16 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, tensión Vs corriente, de 14 a 16 V, 2 horas por escalón.....	47
Figura. 3.17 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, corriente vs temperatura, de 14 a 16 V, 2 horas por escalón.....	47
Figura. 4.1 Convertidor reductor.....	52
Figura. 4.2 Convertidor reductor síncrono.....	54
Figura. 4.3 Respuesta en frecuencia del convertidor reductor a lazo abierto.....	58
Figura. 4.4 Red de compensación PI con dos polos y un cero.....	59
Figura. 4.5 Circuito del convertidor reductor, control PI modo tensión y generador de PWM.....	60
Figura. 4.6 Cambio de corriente a) y tensión b) en tres puntos de operación.....	61
Figura. 4.7 Tiempo de recuperación del segundo escalón de corriente a) y tensión b).....	62
Figura. 4.8 Tiempo de recuperación del tercer escalón de corriente a) y tensión b).....	62
Figura. 4.9 Esquema de convertidor reductor, control PI y generador de PWM.....	63
Figura. 4.10 Control PI con Op-Amp TL081CP.....	63
Figura. 4.11 Conexiones de componentes TL494 a) y LM339 b).....	64
Figura. 4.12 Conexiones de driver IR21844.....	65
Figura. 4.13 Control (PI), el PWM y al convertidor reductor.....	66
Figura. 5.1 Sistema de control, etapa de potencia y fuente de alimentación.....	69
Figura. 5.2 Osciloscopio y sensor de corriente.....	70
Figura. 5.3 Electrolizador, osciloscopio y multímetro.....	70
Figura. 5.4 Señal de corriente en el electrolizador alcalino de 7 celdas.....	71

Figura. 5.5 Punto de operación a 16 V, CH1 Vref, CH2 PWM a MOSFET 1.....	72
Figura. 5.6 Corriente promedio Vs Eficiencia $\eta$ (%), operación continua a 16 V.....	73
Figura. 5.7 Osciloscopio (TDS1001B), punta de corriente (TCPA300), generador de funciones (4011A) y sumador no inversor (TL081).....	75
Figura. 5.8 Prueba $V_{ref}$ cuadrada, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).....	75
Figura. 5.9 Tiempo de establecimiento en la tensión de salida de la prueba $V_{ref}$ cuadrada, de 12.6 a 15.7 V. ....	76
Figura. 5.10 Prueba $V_{ref}$ triangular, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2). ....	77
Figura. 5.11 Prueba $V_{ref}$ triangular a 50 Hz, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).....	77
Figura. 5.12 Prueba $V_{ref}$ triangular a 101 Hz, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).....	78



## LISTA DE TABLAS

Tabla. 2.1 Dependencia de la eficiencia térmica teórica sobre la relación de los calores específicos [11].	9
Tabla. 2.2 El poder calorífico inferior (LHV) de algunos combustibles de uso común [11].	12
Tabla. 2.3 Resumen del diseño típico y funcionamiento de motores de combustión interna [11].	13
Tabla. 2.4. Propiedades de la gasolina, gas natural y el hidrógeno [13]. * Indica las propiedades no favorables para el hidrógeno.	17
Tabla 3.1 Tensión aplicada y consumo de corriente a los escalamientos de 1, 4 y 7 celdas.	44
Tabla 3. 2 Cálculo teórico de volumen de H <sub>2</sub> generado y $\eta_{\text{Termica}}$ de escalamiento de 1, 4 y 7 celdas.	48
Tabla 4.1 Parámetros de operación del convertidor.	55
Tabla 4.2 Resultados de los cálculos teóricos de los componentes.	56
Tabla 4.3 Componentes seleccionados y características principales.	56
Tabla 4. 4 Valores de los componentes del controlador PI.	60
Tabla 4.5 Datos de simulación de escalones de corriente.	61
Tabla 5.1 Tensión, corriente y potencia promedio en prueba a 14, 15 y 16 V.	72



---

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

Los combustibles fósiles [1, 2] que se consumen para la operación de la mayoría de los vehículos, ya sea particular o público, son recursos no renovables y al detonar el combustible generan contaminantes que se liberan al medio ambiente, debido a esto se vuelve prioritario la disminución de consumo de combustible y emisión de contaminantes.

El objetivo de un menor consumo de combustible [3, 4] y menos emisiones es posible mediante el enriquecimiento del combustible, es decir, agregar un combustible suplementario (aditivo), como agregar oxígeno e hidrógeno a la mezcla de combustión.

Las tecnologías utilizadas como los electrolizadores alcalinos (EA) [5, 6], son económicos en su manufactura, porque no utilizan metales nobles en los electrodos, la pureza del H<sub>2</sub> es de hasta 99%. El electrolizador alcalino genera H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> al mismo tiempo y es denominado reactor oxihidrógeno. Los electrolizadores son una tecnología que lleva varios años de ser probada y aplicada en varios sectores de la industria y con sistemas de control adecuado se consideran sistemas confiables de generación de hidrógeno

El sistema de control se encarga de monitorear el punto de operación del motor y con las mediciones obtenidas, estima el volumen de hidrógeno que se debe generar y entregar para tener un combustible enriquecido que mejore el desempeño del motor. La forma en que el sistema controla la generación de H<sub>2</sub> es mediante un convertidor de corriente directa a corriente directa (CD-CD) [7] que ingresará una tensión controlada al electrolizador y de esta manera se obtiene el volumen de H<sub>2</sub> requerido.

## 1.2 Planteamiento del problema

La tesis surge de la necesidad de tener un sistema de generación de hidrógeno bajo demanda con un comportamiento dinámico. Los motores de combustión interna durante su operación real cambian constantemente las revoluciones por minuto (RPM), esto implica que cambia las necesidades de la mezcla de combustible y oxígeno y por ende la cantidad de hidrógeno requerido para el enriquecimiento de la mezcla [3, 4].

En la recopilación de publicaciones y otros trabajos, se explican diferentes configuraciones y aproximaciones del sistema de enriquecimiento de gasolina, en los cuales no se puntualiza ni se especifica las características del sistema de control.

En publicaciones y otros trabajos, las pruebas son realizadas a una RPM específica y estática, es decir que no se sigue el comportamiento del motor y por tanto no hay un seguimiento continuo.

Por lo anterior esta tesis presenta el cálculo y simulación del control y diseño de etapa de potencia para un reactor oxihidrógeno alcalino que tenga un comportamiento dinámico en la producción de hidrógeno [8, 9].

## 1.3 Objetivo general

Diseñar, construir y desarrollar un sistema de control de un reactor oxihidrógeno para el enriquecimiento de gasolinas, mediante un convertidor electrónico de potencia eficiente.

## 1.4 Objetivos particulares

- Caracterizar el comportamiento dinámico del electrolizador alcalino.
- Seleccionar la topología apropiada del convertidor electrónico con base en las necesidades del electrolizador.
- Diseñar el sistema de control para el convertidor electrónico.

- Integrar el control, el convertidor electrónico y el electrolizador alcalino para realizar pruebas.

## 1.5 Metodología

El primer paso es recopilar información de caracterización del electrolizador y comprobar la información antecedente, para determinar la confiabilidad de los datos recopilados.

Con base en las características del electrolizador y condiciones de operación se selecciona la topología y componentes del convertidor electrónico.

Se selecciona y calcula el sistema de control considerando las características del convertidor electrónico.

El segundo paso es realizar las simulaciones correspondientes a la planta con el sistema de control diseñado y posteriormente se realiza la selección de componentes del control.

El tercer paso es el acoplamiento y construcción del control y el convertidor electrónico.

Para el cuarto y último paso se realizan la experimentación con el circuito construido y el electrolizador para determinar la dinámica del sistema.

## 1.6 Alcance de la tesis

La tesis tiene como alcance la selección de topología, diseño, simulación y construcción del sistema de control de un electrolizador alcalino.

Con base en las características del electrolizador, el control está diseñado para operar y mantener tres puntos de operación a 14, 15 y 16 V.

El convertidor electrónico entrega una potencia nominal de 4.7, 21.4 y 58 W en los puntos de operación a 14, 15 y 16 V, bajo estas características el rango de la corriente de operación es 0.335, 1.426 y 3.625 A, respectivamente.



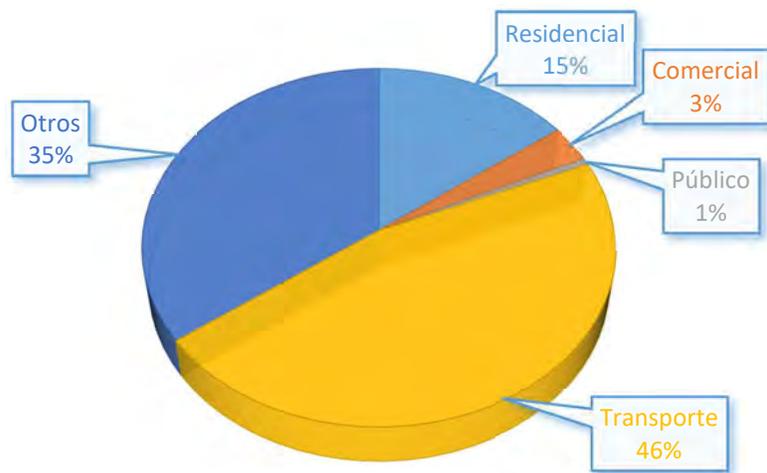
---

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Combustibles fósiles y autotransporte

Los combustibles fósiles son un recurso no renovable y cuyas reservas disminuyen constantemente y los precios suben de igual forma. En México en el año 2015 [1, 2] el consumo energético total fue de 5,094.74 petajoules, de los cuales 2,361.74 petajoules (46.35%) corresponde al autotransporte como se observa en la Figura 2.1.



*Figura. 2 1 Consumo energético total en México en el año 2015.*

Los vehículos de motor de combustión interna [10], sean ligeros o pesados de carga son un factor clave que influye en la economía, en el estilo y estatus de vida de las poblaciones de los países ricos, y emergentes.

Se espera que continúe el crecimiento de la demanda de vehículos que utilizan gasolina u otros combustibles fósiles, intensificando el impacto negativo en el medio ambiente.

En años recientes se han realizado grandes esfuerzos en el desarrollo de combustibles alternativos para motores de combustión interna, como etanol-gasolina, mezclas dimetiléter (DME) entre otros.

## 2.2 Motor de combustión interna

En 1876, el Dr. N. A. Otto patentó su primer motor de combustión interna de cuatro tiempos, un motor estacionario a gas. El Dr. Otto, afirmó que su motor era más silencioso y eficiente que los motores de vapor. El motor de combustión por chispa (bujía) presentado por Otto fue el precursor para el que hoy se conoce como motor a gasolina, también llamado motor de ciclo de Otto [10].

Los motores modernos de combustión por chispa SI (por sus siglas en inglés de spark-ignited), se pueden encontrar en todos los rincones del globo. Debido a la alta densidad de potencia, bajo costo de producción, y la gran infraestructura para el suministro de gasolina, los motores SI son plataformas de energía para los vehículos de pasajeros, camiones pequeños, motocicletas, cortadoras de césped y pequeños generadores de energía eléctrica.

Los motores SI son robustos y capaces de producir altos niveles de potencia en un gran rango de velocidades. Sin embargo, los motores de combustión por chispa para controlar la potencia de salida requieren de reducir el flujo de combustible, lo que aumenta las pérdidas de bombeo del motor y disminuye la eficiencia general. La Figura 2.2 [10] muestra el diagrama de un motor SI.

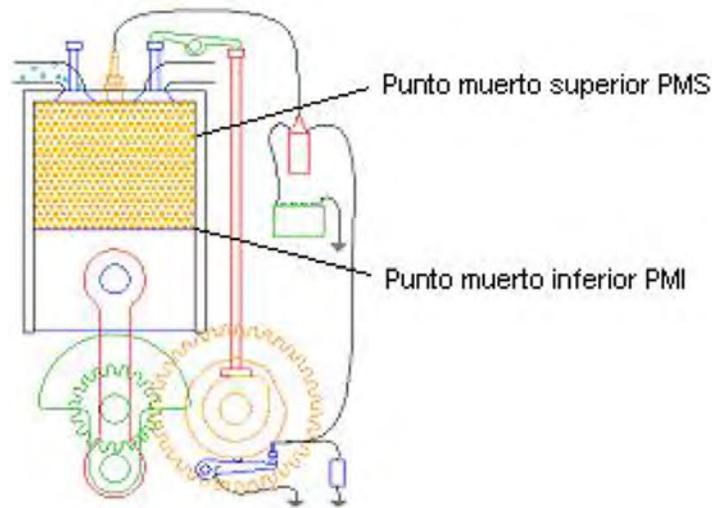


Figura. 2.2 Motor de combustión por chispa (bujía).

El pistón está conectado a una manivela por medio de una barra de conexión. La manivela rota, y el pistón se desplaza hacia arriba y hacia abajo. Hay dos válvulas, una válvula de entrada y una válvula de escape, y un arreglo mecánico para abrirlas y cerrarlas.

El ciclo ideal Otto que se asocia al motor SI, aunque difiere del ciclo real, sirve para explicar el proceso de forma sencilla. Los procesos termodinámicos que se producen están representados en la Figura 2.3, donde  $V$  es volumen,  $P$  es presión,  $T$  es temperatura,  $S$  es entropía,  $Q$  es calor y  $W$  es trabajo de compresión.

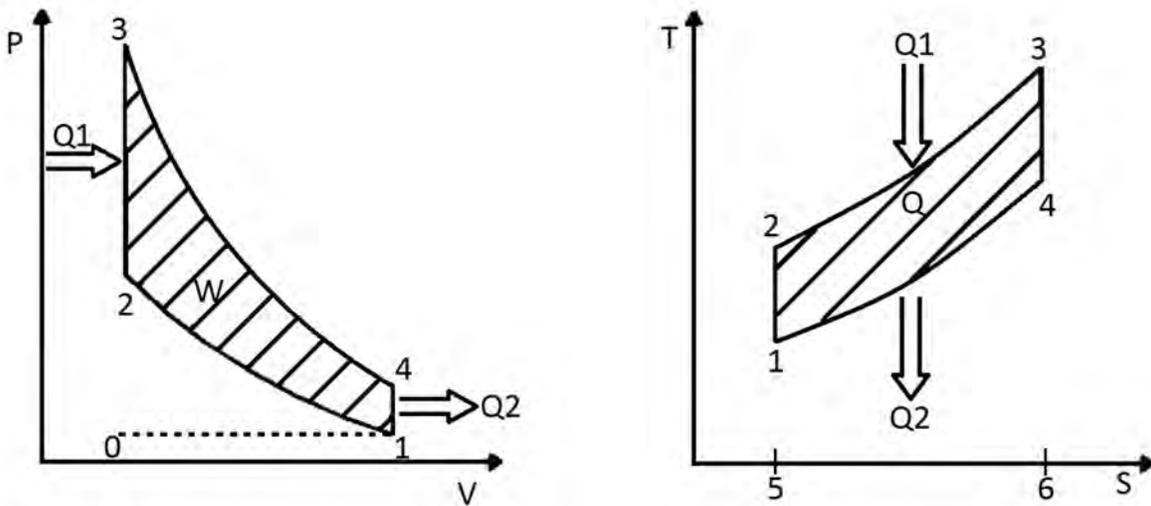


Figura. 2.3 Ciclo de Otto en coordenadas  $P/V$  y  $T/S$

Los procesos termodinámicos son los siguientes:

- 1-2 Compresión adiabática: compresión del fluido de trabajo, el pistón tiene que realizar trabajo de compresión  $W_1$ .
- 2-3 Aportación de calor a volumen constante: introducción instantánea de calor aportado  $Q_1$ .
- 3-4 Expansión adiabática: expansión correspondiente al trabajo  $W_2$ , realizado por el fluido de trabajo sobre el pistón.
- 4-1 Extracción de calor a volumen constante: extracción de calor instantánea de calor  $Q_2$ .

En los motores de 4 tiempos la extracción de calor se produce en la fase de escape, con la apertura de la válvula de escape, y el fluido se introduce en el motor en la carrera de

admisión. Este hecho queda representado gráficamente en el diagrama P/V de la Figura 2.3 por una línea horizontal discontinua. Estos dos procesos se anulan teóricamente entre ellos, dando una pérdida o ganancia de calor nulos. Así, en el diagrama P/V del ciclo Otto ideal sólo se considerará el ciclo cerrado.

El ciclo Otto es el ciclo ideal que se asocia al motor SI. Sin embargo el ciclo real de un motor de cuatro tiempos se caracteriza por:

- a) El tiempo de admisión: El pistón baja hacia el punto muerto inferior (PMI) y hace entrar la mezcla de aire y combustible preparada por el carburador o inyector en la cámara de combustión abriendo la válvula de admisión (Fase Abierta).
- b) El tiempo de compresión: Se cierra la válvula de admisión (Fase Cerrada) y el pistón comprime la mezcla inflamable moviéndose hacia el punto muerto superior PMS. Aumenta la temperatura.
- c) El tiempo de potencia: Mientras las válvulas de admisión y escape están cerradas (Fase Cerrada) una chispa de la bujía inicia la combustión del gas, la presión aumenta y empuja el pistón hacia abajo. Así el gas caliente realiza un trabajo.
- d) El tiempo de escape: Se abre la válvula de escape (Fase Abierta) y el pistón empuja los gases de combustión hacia el tubo de escape.

En el desarrollo de las etapas anteriores hay pérdidas que no permiten obtener la eficiencia ideal del ciclo de Otto.

### 2.2.1 Análisis termodinámico

El ciclo termodinámico que describe el motor SI es el ciclo Otto. Por lo tanto, la eficiencia ( $\eta$ ) termodinámica de un motor de SI en condiciones idealizadas (considerando aire estándar) viene dada por la ecuación (2.1) [11]. La información de “análisis termodinámico”, corresponde a la referencia [11].

$$\eta = 1 - \frac{1}{CR^{\gamma-1}} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1)  $\gamma$  es la relación de calores específicos  $c_p/c_v$ , y CR es la relación de compresión,  $V_{\max}/V_{\min}$ . La eficiencia térmica depende sólo de la relación de compresión y  $\gamma$ . La temperatura después de la carrera de compresión isentrópica es  $T_2 = T_1 CR^{\gamma-1}$ .

Las relaciones de mayor compresión conducen a mayores temperaturas de llama y por lo tanto se anticipa un aumento de la eficiencia termodinámica. Por la misma razón, a una CR dado, la  $\eta$  aumenta con  $\gamma$  como se muestra en la Tabla 2.1 para un CR = 8.5.

Tabla. 2.1 Dependencia de la eficiencia térmica teórica sobre la relación de los calores específicos [11].

Medio de trabajo	$\gamma = c_p/c_v$	Eficiencia, $\eta$ (%)
Aire	1.4	57.5
CO <sub>2</sub>	1.288	46.0
Ar	1.667	76.0
He	1.667	76.0

Los supuestos de aire estándar son que la mezcla es completamente de aire y se comporta como un gas ideal, todos los procesos son internamente reversibles y los procesos de combustión y de escape son procesos de calor de adición/rechazo.

Por lo tanto, es deseable utilizar un medio de trabajo con un valor grande de  $\gamma$ . La mayor relación de compresión que se puede utilizar en un motor SI está limitada por la auto-ignición durante la combustión (golpeteo del motor).

Cuanto se produce la compresión, la temperatura y presión de la mezcla aumenta. La mezcla es normalmente encendida con una bujía antes de que termine la carrera de compresión. La llama se propaga entonces a través de la mezcla, los productos calientes de combustión se expanden y los gases no quemados son calentados y comprimidos.

Idealmente, la llama se propagará a través de toda la mezcla antes de que los gases no quemados alcancen la presión y temperatura crítica. Una mezcla en condiciones estequiométricas produce la mayor temperatura de llama posible y en consecuencia la potencia de salida es mayor. Desafortunadamente, las altas temperaturas también generan altos niveles de óxidos de nitrógeno (NOx).

Si la mezcla alcanza la presión y temperatura crítica, la auto-ignición puede ocurrir causando que el motor golpetee. El aumento de la relación de compresión aumenta la temperatura y la presión al final de la carrera de compresión y por lo tanto aumenta la probabilidad de auto-ignición. Además, cualquier punto caliente en la cámara de combustión también puede promover la auto-ignición.

La capacidad de un combustible para resistir la auto-ignición se cuantifica por su número de octanos. El aumento de número de octanos permite alcanzar una mayor temperatura y presión, y por lo tanto la relación de compresión, se puede alcanzar sin auto-ignición. Cuando la relación de compresión se incrementa, la potencia de salida del motor aumenta, pero se necesita un combustible con octanaje superior para evitar la auto-ignición.

La Figura 2.4 muestra la potencia de salida y el número de octanaje requerido en función de la relación de compresión de un motor de gasolina típico.

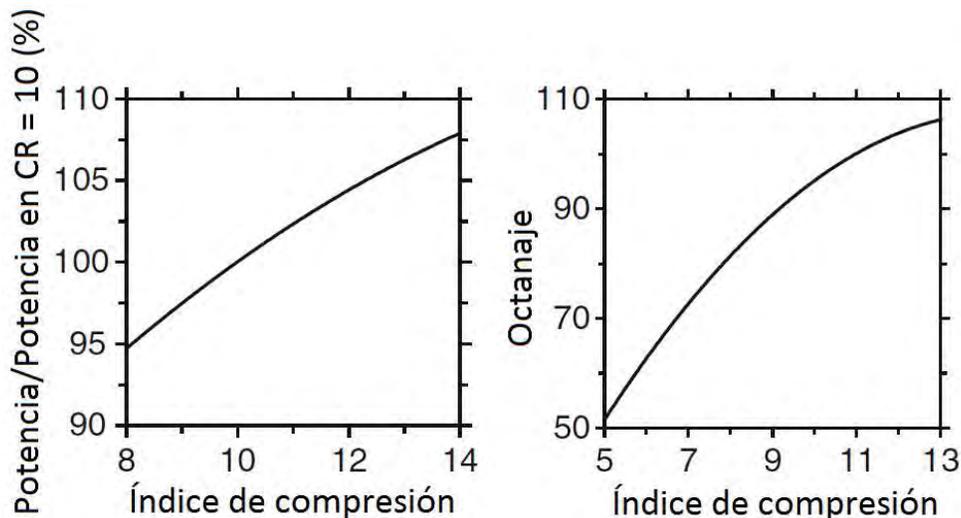


Figura. 2.4 Relación potencia de salida y el número de octanaje de un motor a gasolina típico.

El diagrama de presión-volumen de los motores reales difiere del diagrama de ciclo ideal de Otto debido a las pérdidas de calor, la fricción, y la cantidad finita de tiempo requerido para la liberación de la energía del combustible. La Figura 2.5 muestra el comportamiento de la presión en función del volumen de un motor a gasolina típico.

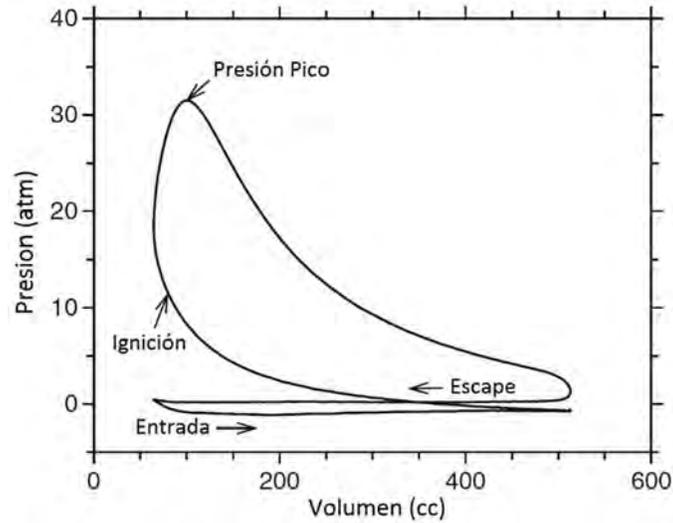


Figura. 2.5 Presión en función del volumen de un motor a gasolina típico.

La presión media efectiva BMEP (por sus siglas en inglés de Brake mean effective pressure) es la presión efectiva media medida en la prueba de dinamómetro del motor. El consumo específico de combustible de freno BSFC (por sus siglas en inglés de Brake specific fuel consumption) es una medida de la eficiencia de un motor. Es la tasa de consumo de combustible dividida por la producción de energía.

La eficiencia ( $\eta_i$ ) de la ecuación (2.2) [11] donde la potencia indicada se mide en kW,

$$\eta_i = \frac{Power_i}{\dot{m}_f LHV} \quad (2.2)$$

$\dot{m}_f$  es la tasa de flujo de masa de combustible (kg/s) y el poder calorífico inferior del combustible LHV (por sus siglas en inglés de Lower Heating Value) en MJ/kg.

La Tabla 2.2 muestra el LHV de los combustibles de uso común. Esta definición es solamente una medida termodinámica y deja de lado las pérdidas mecánicas, tales como pérdidas de la transmisión y las pérdidas de la bomba de aceite/refrigerante.

Tabla. 2.2 El poder calorífico inferior (LHV) de algunos combustibles de uso común [11].

Combustible	(MJ/kmol)	(MJ/kg)
Metano (CH <sub>4</sub> )	802.64	50.031
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2043.15	46.334
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	2652.34	45.73
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	676.22	21.104
Iso-octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	5100.50	44.651

Cuando el motor está conectado a un dinamómetro, la potencia producida por un motor puede ser determinado por la ecuación (2.3) [11].

$$Power = \frac{2\pi * Torque * RPM}{60,000} \quad (2.3)$$

Debido a las pérdidas de fluido dinámico durante los intercambios de gases de admisión y de escape, la transferencia de gases a través de válvulas de cámara de combustión no es perfecta. La eficiencia volumétrica ( $\eta_v$ ) definida en la ecuación (2.4) [11] es una indicación del rendimiento de admisión y de escape del motor en comparación con la situación ideal, sin ninguna pérdida.

$$\eta_v = \frac{\dot{V}_a}{(V_s)(N)} \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4) la  $\dot{V}_a$  es la tasa de flujo volumétrico actual a temperatura y presión estándar para motores sin sobrealimentación de presión (turboalimentación o sobrealimentación),  $V_s$  es el volumen del cilindro barrido y  $N$  es la mitad del número de revoluciones por segundo para motores de 4 tiempos.

Puesto que la mezcla de combustible se introduce en el cilindro a través de una abertura relativamente pequeña entre la válvula de admisión y el bloque del motor, la eficiencia volumétrica disminuye con la velocidad del motor. Con la sintonización adecuada de un colector de admisión (a veces con ayuda de una caja acústica), la eficiencia volumétrica se puede extender a velocidades mayores del motor antes de que comience a disminuir.

La eficiencia de combustión ( $\eta_c$ ) (ecuación 2.5) [11] es una medida de que tanto una mezcla arde completamente en el cilindro del motor.

$$\eta_c = \frac{(\dot{m}_f h_f) + (\dot{m}_a h_a) - (\dot{m}_e h_e)}{\dot{m}_f LHV} \quad (2.5)$$

Donde  $\dot{m}_f$  es la tasa de flujo másico del combustible en el motor,  $\dot{m}_a$  es la tasa de flujo másico de aire en el motor,  $\dot{m}_e$  es el caudal másico de gases de escape que fluye hacia fuera del motor, y  $h_f$ ,  $h_a$  y  $h_e$  son la entalpía de combustible, aire y gases de escape, respectivamente.

Una  $\eta_c$  de aproximadamente 90% se considera como un evento de combustión exitosa. En la mayoría de los motores SI, alrededor del 10% de la masa inducido deja el motor sin quemar debido a las capas límite frías cerca de las paredes del cilindro y hendiduras.

En la Tabla 2.3 se observa un resume del diseño típico y funcionamiento de motores de combustión interna.

Tabla. 2.3 Resumen del diseño típico y funcionamiento de motores de combustión interna [11].

Motor	Operación, tiempos	Relación de compresión CR	Max. RPM	BMEP (atm)	BSFC (g/kW-h)
Pequeño	2, 4	6-11	4,500-7,500	4-10	350
Coches	4	8-10	4,500-6,500	7-10	270
Camiones	4	8-12	3,600-5,000	6.5-7	300
Motores de gas grande	2, 4	8-12	300-900	6.8-12	200
Motores Wankel	4	9	6,000-8,000	9.5-10.5	300

### 2.3 Hidrógeno como combustible

Los motores de combustión interna sigue siendo utilizados en todo el mundo, por esta razón mejorar la eficiencia térmica y reducir las emisiones tóxicas es de gran importancia para las reservas energéticas y protección ambiental.

El hidrógeno [12] es considerado como un combustible alternativo prometedor para los motores de combustión interna, que a diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno

puede ser generado de varias formas, como electrólisis de agua, reformado de gas o algún hidrocarburo ó por medios biológicos.

En los últimos años el hidrógeno ha llegado a ser popular como combustible por las siguientes razones: (1) se percibe como un combustible limpio, que emite casi ningún compuesto que no sea agua utilizable; (2) puede ser producido utilizando cualquier fuente de energía, siendo la energía renovable la de mayor atractivo; (3) funciona con celdas de combustible y en conjunto pueden ser la solución para el suministro de energía sostenible y ser una pieza a largo plazo, en la llamada " Economía del Hidrógeno".

Existen tres formas típicas para aplicar el hidrógeno en vehículos: mediante las celdas de combustible, motores para hidrógeno puro y motores para mezclas con hidrógeno. Los vehículos impulsados por celdas de combustibles son eléctricos y tienen muy pocas o nulas emisiones durante su manejo, sin embargo el alto precio y el ciclo de vida de la celda de combustible son una barrera para su comercialización a gran escala, aunado a la falta de infraestructura para la distribución del hidrógeno lo que genera dificultades para recargar el combustible. Actualmente ya existen algunos autos con celdas de combustible que se están comercializando (Mirai de Toyota) pero están limitados a un par de países y hay unas 6 mil unidades en el mercado.

El motor de combustión interna de hidrógeno puro es mucho más limpio que los motores a gasolina o diésel. Sin embargo los motores de hidrógeno puro siempre sufren de elevadas emisiones de NOx y reducción en la potencia de salida, además existen fenómenos de combustión anormales como pre-ignición y golpeteo.

En comparación con celdas de combustible y motores de hidrógeno puro, el motor de combustión interna de mezcla de hidrógeno tiene emisiones menos tóxicas y tienen una mejor relación de consumo de combustible y potencia entregada.

Generalmente la conversión de un motor convencional de combustión interna a uno que maneja la mezcla hidrógeno-gasolina requiere un sistema de inyectores de hidrógeno de acero inoxidable. El hidrógeno requerido en esta modalidad puede ser almacenado en tanques o ser producido "in situ".

Las propiedades de combustión de hidrógeno [3, 4] pueden mejorar la eficiencia y emisiones. El hidrógeno posee un coeficiente de difusión de  $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$  que es mayor que el coeficiente de la gasolina con  $0.16 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Esto permite que la mezcla de combustible tenga un mayor grado de homogeneidad, además la velocidad de la llama adiabática del hidrógeno es de  $237 \text{ cm/s}$  por lo que es cinco veces mayor al de la gasolina con  $42 \text{ cm/s}$ , esto acorta el tiempo de duración de la combustión, acercándolo a los valores ideales de combustión de volumen constante y por tanto tiene una mejor eficiencia térmica. El aumento en la eficiencia disminuye el consumo de combustible y las emisiones, especialmente de combustible no quemado (HC) y monóxido de carbono (CO).

Hay varias formas de suministrar el hidrógeno a un motor. Una solución consiste en utilizar un tanque de almacenamiento [10]. Sin embargo un tanque del almacenamiento aumenta el peso del vehículo y requiere energía para comprimir el hidrógeno almacenado. Otra solución es la de generar el gas “in situ” con lo cual se eliminan los problemas generados por el almacenamiento ya que el hidrógeno generado se consume en el momento.

### 2.3.1 Propiedades del hidrógeno

Las propiedades del hidrógeno que lo hacen atractivo para el enriquecimiento de gasolina son: amplia gama de inflamabilidad, baja energía de encendido, alta temperatura de auto-ignición, distancia de extinción pequeña, alta difusividad, baja densidad, y alta velocidad de la llama [13]. A continuación se describen estas propiedades.

**Amplia gama de inflamabilidad.** El hidrógeno puede ser quemado en una amplia gama de relaciones de mezcla aire-combustible (del 4 al 74%). Dado que se requiere muy poco hidrógeno para quemar en el aire, el hidrógeno puede ser quemado en una mezcla pobre. Esto hace que sea posible tener una combustión más completa con una mejor relación de consumo de combustible y potencia entregada.

La mezcla pobre también puede reducir la temperatura de la combustión y producir menos NOx. Sin embargo, esto se traducirá en una reducción significativa de la energía y puede necesitar el uso de un turbo cargador para aumentar la potencia.

Aunque algunas referencias indican un límite inferior de inflamabilidad de hidrógeno a ser 4% en el aire, en la práctica el hidrógeno necesita ser aproximadamente 10% en aire para la ignición

**Baja energía de ignición.** El hidrógeno necesita muy poca energía para encender. Se trata de un orden de magnitud menor que la gasolina. Esto significa que las fuentes y puntos calientes en el cilindro podrían actuar como fuentes de ignición, que pueden conducir a la ignición prematura.

**Alta temperatura de auto-ignición.** La temperatura de ignición de una sustancia es la temperatura menor a la que una sustancia química se inflama espontáneamente en un ambiente normal sin una fuente externa de ignición, tales como una llama o chispa. Esta temperatura se requiere para suministrar la energía de activación necesaria para la combustión. La temperatura de ignición es un factor importante para determinar la relación de compresión.

El aumento de temperatura durante la compresión está relacionada con la relación de compresión por la ecuación (2.6) [13].

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad (2.6)$$

Donde  $V_1/V_2$  es la relación de compresión,  $T_1$  es la temperatura absoluta inicial,  $T_2$  es la temperatura final absoluta, y  $\gamma$  es la relación de calores específicos. Sin embargo, la temperatura final no podrá superar la temperatura de auto-ignición sin causar preignición. Por lo tanto, la alta temperatura de auto-ignición de hidrógeno conduce a una mayor relación de compresión en comparación con los combustibles de hidrocarburos.

**Distancia de extinción Pequeña.** La distancia de extinción se define como una escala de longitud característica asociada con la extinción de la llama laminar durante la propagación en un canal o tubo estrecho. Esta distancia varía inversamente con la presión inicial y es menor para los gases con altas velocidades de llama laminares. El enfriamiento rápido del hidrógeno es menor que la gasolina. Esto implica que las posibilidades de retorno de llama se incrementan con el hidrógeno en comparación con la gasolina o gas natural.

**Alta difusividad.** La difusividad del hidrógeno en el aire es mucho mayor que la gasolina. Esto asegura que si se produce una fuga, el hidrógeno se dispersa rápidamente. Además, se produce una mezcla de mayor uniformidad de aire-combustible. Esto es importante en el cilindro de un motor para conseguir aun el "quemado" del combustible.

**Baja densidad.** La baja densidad del hidrógeno es una gran desventaja. Se requiere un mayor volumen para el almacenamiento y una potencia de salida reducida a causa de la densidad de energía menor.

**Alta velocidad de la llama.** El hidrógeno se quema en alrededor de 2.83 metros por segundo frente a 0.34 metros por segundo para la gasolina a presión atmosférica y bajo condiciones estequiométricas. La velocidad de llama es mayor y requiere menos tiempo de encendido.

La Tabla 2.4 muestra una comparación de las propiedades entre la gasolina, gas natural e hidrógeno cuando se utiliza en un motor de combustión interna.

*Tabla. 2.4. Propiedades de la gasolina, gas natural y el hidrógeno [13]. \* Indica las propiedades no favorables para el hidrógeno.*

Propiedad	Gasolina	Gas natural	Hidrógeno
Límites de inflamabilidad ( $\phi$ )	0.7-4	0.4-1.6	0.1-7.4 <sup>1</sup>
Velocidad de la llama laminar (m/s)	0.37-0.43	0.38	1.85
Número octanaje	85-99	>130	>140
Temperatura de llama adiabática (°C)	2306.7	1967.8	2206.7
Temperatura de ignición espontánea. (°C)	276.7	449.4	584.4
*Volumen estequiométrico (%)	2	9.48	29.53
*La energía mínima de ignición (mJ)	0.24	0.28	0.02
*Distancia de extinción (mm)	2	2.1	0.076

### 2.3.2 Consecuencias de las propiedades del hidrógeno en motores de combustión

#### interna.

Al usar hidrógeno como combustible en motores inicialmente diseñados para funcionar con gasolina, hay varios problemas que deben superarse y se requieren cambios en

el diseño del motor. A continuación se mencionan los problemas de mayor relevancia asociados con las propiedades del combustible [13].

La baja densidad del hidrógeno implica que ocupa un volumen mayor al del aire en la cámara de combustión. Al incrementar el volumen de hidrógeno ingresado a la mezcla, también se reduce el volumen disponible para ingresar aire.

Como consecuencia de la reducción de aire disponible en la mezcla, la potencia de salida disminuye y se dificulta la reducción de las emisiones NOx. Si se requiere reducir las emisiones NOx a cerca de cero, se necesita 2.5 veces la cantidad de aire presente en la mezcla estequiométrica de aire-combustible.

Como el hidrógeno puede ser quemado en una amplia gama de relaciones de mezcla aire-combustible (del 4 al 74%), se puede enriquecer la mezcla con un mínimo volumen de hidrógeno, a la cual se denomina mezcla “pobre”.

La mezcla “pobre” es una ventaja, permite una mayor relación aire-combustible con lo cual se reducen las emisiones NOx y mejora la eficiencia de la combustión. Este aumento en la eficiencia de combustión aumenta la potencia de salida.

Un motor que usa hidrógeno es susceptible de pre-ignición debido a que el hidrógeno tiene un requisito muy bajo de energía de ignición. Los motores que tienen depósitos de carbono acumulado tendrán problemas de pre-ignición. Por lo tanto se requiere de varios cambios en el diseño para usar el hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna a gasolina.

El primer cambio se refiere a las bujías, ya que se requieren que sean de tipo frío nominal (se enfría rápidamente) y no deben ser de platino en la punta, ya que platino es un catalizador que promociona la ignición. Las bujías de iridio con punta de alambre fino son el tipo preferido. Las bujías deben estar calibradas a 0.0381 cm, aunque hay motores con calibración de 0.0178 cm.

El segundo cambio se refiere al sistema de encendido, se requiere una bobina de ignición conectada a dos bujías diferentes. Uno de ellas es para un cilindro que está disparando, mientras que la otra es para un cilindro que está agotando. De esta manera las bujías no se dispararán durante el ciclo de escape.

El tercer cambio es sobre la naturaleza del aceite. Se debe utilizar un aceite sintético para evitar puntos calientes que causan pirólisis y, por lo tanto, pre-ignición.

El siguiente problema que se encara es la distancia de extinción. Esto significa que el hidrógeno se quema más cerca de una superficie dada que la gasolina. Por esta razón, los diseñadores modernos han tendido a bajar la posición del aro del pistón para fortalecerlo.

## **2.4 Fuentes de hidrógeno convencionales**

El hidrógeno puede producirse mediante procesos térmicos, electrolíticos, fotolíticos, utilizando combustibles fósiles, biomasa o agua como materia prima. Se abordarán los métodos y procesos convencionales más utilizados [14].

### **2.4.1 Metano reformado con vapor**

La reformación de metano con vapor es un método ampliamente usado para la producción de gas de síntesis, una combinación de hidrógeno y monóxido de carbono.

Típicamente la materia prima es gas natural, el cual tiene varias variantes incluyendo seco, húmedo, dulce y gas amargo. Las diferentes designaciones para el gas se refieren a su composición.

El gas seco es mayoritariamente metano, mientras que el gas húmedo contiene una mayor cantidad de hidrocarburos pesados. El gas dulce tiene pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno, mientras que el gas amargo tiene grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno.

La reformación de metano con vapor típicamente consiste en 4 pasos, Figura 2.6;

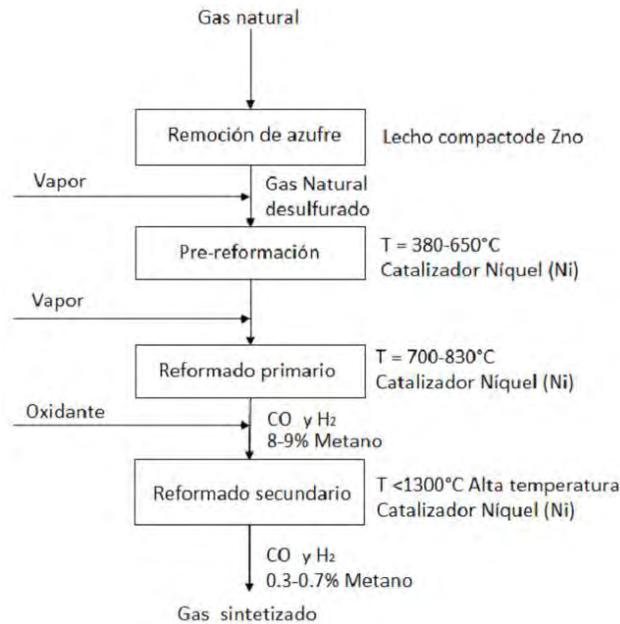


Figura. 2.6 Reformación de vapor de metano, 4 pasos típicos.

La reformación de metano con vapor típicamente consiste en 4 pasos [14]; (1) El sulfuro de hidrógeno y otros compuestos de azufre se eliminan para evitar el envenenamiento del catalizador; (2) La pre-reformación se utiliza para evitar la formación de carbono durante la etapa de reformado principal y también reducir la cantidad de vapor de agua requerido; (3) Reformado primario en el que el vapor y el calor se suministran para permitir que la reacción tenga lugar en un catalizador de níquel a 700-830 °C; (4) Un reformado secundario utiliza aire para producir calor a través de las reacciones de combustión y elevar la temperatura hasta aproximada 1300 ° C y convertir la mayor parte del metano restante a gas de síntesis.

El proceso de desulfuración es un proceso exotérmico que se lleva a cabo típicamente en un reactor de lecho compacto. Los compuestos de azufre son adsorbidos por el lecho de relleno, que es generalmente ZnO.

Como resultado de la reformación de vapor de metano se obtiene CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y de 0.3 a 0.7% de metano.

### 2.4.2 Reacción de desplazamiento agua-gas

Después de la reformación de vapor de metano, el gas sintetizado se enfría para producir una mayor cantidad de hidrógeno a través de la reacción de desplazamiento de gas-agua. La reacción implica hacer reaccionar monóxido de carbono con vapor de agua sobre un catalizador para producir dióxido de carbono e hidrógeno.

### 2.4.3 Oxidación parcial de metano

La oxidación parcial del metano, ecuación (2.7) [14], es un proceso exotérmico por el cual un combustible se hace reaccionar con el oxígeno para producir una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno.



Los problemas asociados con este proceso incluyen degradación del catalizador debido a la deposición de carbono y riesgos de explosión durante la mezcla de los gases reaccionantes.

### 2.4.4 Reforma autotérmica de metano

Reformación autotérmica, también conocido como oxi-reformado con vapor. Este proceso combina la reformación de metano con vapor y la oxidación parcial y tiene ventajas con respecto a los anteriores. Las ventajas se deben a que el vapor se puede utilizar para convertir parte del monóxido de carbono a dióxido. También puede reducir el riesgo de explosión y reducir la deposición de carbono sobre el catalizador.

Cuando se suministran la mezcla apropiada de combustible, aire y vapor, la reacción de oxidación parcial suministra todo el calor necesario para conducir la reformación de metano con vapor.

### **2.4.5 Producción de hidrógeno a partir de aceite pesado y carbón**

Los procesos utilizados para producir hidrógeno a partir de petróleo pesado y materia prima de carbón son similares. En el caso del petróleo, el proceso utilizado se llama oxidación parcial. Este proceso convierte la reserva de petróleo en gas de síntesis,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$  si hay azufre presente en la materia prima.

El aceite se expone a vapor y se controlan las cantidades de oxígeno a una temperatura 1200 a 1500°C y a una presión de 30-80 bares. Hay tres pasos en este proceso:

(1) Se usa vapor para reducir el tamaño de las cadenas de hidrocarburos (conocida como craqueo); (2) Cantidades sub-estequiométricas de oxígeno oxidan el aceite en gas sintetizado. (3) Las partículas de carbono reaccionan con el  $\text{CO}_2$  y el vapor para formar gas sintetizado. Si hay azufre presente, se retira antes de la reformación de metano con vapor, esto se hace debido a que el azufre puede envenenar el catalizador.

El carbón también se puede utilizar como materia prima para producir gas sintetizado. Los procesos involucrados incluyen el pretratamiento, la gasificación primaria, secundaria y la gasificación de conversión de desplazamiento.

Durante el tratamiento previo, el oxígeno se introduce para eliminar los compuestos que de otro modo causarían que el carbón se aglomere en el gasificador.

El gasificador primario produce gas de síntesis,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  (nitrógeno), carbón primario y otros compuestos, el proceso se lleva a cabo entre 900°C y 1.000°C. El carbón primario se hace reaccionar con vapor de agua en el segundo gasificador para producir gas sintetizado. Por último, la reacción de desplazamiento de gas de agua se utiliza para determinar la relación final de  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ .

### **2.5 Electrólisis del agua para la producción de hidrógeno**

La gran escala de consumo de hidrógeno requiere de una producción a gran escala para estar a la par [5]. Como tal, actualmente la producción de hidrógeno está dominada por la reformación del gas natural y la gasificación del carbón y el coque de petróleo, así como

gasificación y la reformación de petróleo pesado. Este hidrógeno por lo regular se utiliza como materia prima para la industria petrolera, del acero y del vidrio, no como combustible.

Aunque la electrólisis del agua para producir hidrógeno (y oxígeno) se conoce desde hace unos 200 años [6] y tiene la ventaja de producir hidrógeno extremadamente puro, sus aplicaciones se limitan a menudo a pequeña escala y situaciones únicas donde el acceso a las plantas de producción de hidrógeno a gran escala no es posible o económico. Como ejemplo, la marina, cohetes, naves espaciales, industria electrónica y la industria alimentaria, así como las aplicaciones médicas.

La electrólisis del agua representa sólo el 4% de la producción de hidrógeno en el mundo. Es la más simple de todas las técnicas de disociación del agua y tiene como único subproducto el oxígeno, un gas altamente útil. Esta técnica es la que se prevé proporcione a gran escala el hidrógeno utilizado como combustible.

## **2.6 Electrolizador alcalino**

Existen varias tecnologías disponibles para la generación de  $H_2$  [6] que utilizan fuentes de energía y materia prima renovables. Una de estas tecnologías utilizadas para la producción de hidrógeno son los electrolizadores alcalinos (EA).

Los electrolizadores alcalinos utilizan electrolitos con una tensión de hidrógeno (pH) elevado como hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, ambos en un medio acuoso. Este es el método de mayor antigüedad, mayor desarrollado y ampliamente utilizado de la electrólisis del agua.

Los principales componentes de un electrolizador son el ánodo, cátodo y un electrolito que transmite iones entre los electrodos. Cuando se suministra energía eléctrica, el agua se descompone y se produce oxígeno en el ánodo (electrodo con polaridad positiva) e hidrógeno en el cátodo (electrodo con polaridad negativa). En el ánodo se genera ion hidrógeno cargado positivamente que al estar en un medio alcalino producen agua, en el cátodo se producen iones (OH) cargado negativamente los cuales se mueve a la carga positiva del ánodo.

Electrolizadores alcalinos [5,14] se utilizan en todo el mundo para la producción de hidrógeno, son económicos en su manufactura, ya que no utiliza metales nobles en los electrodos, están diseñado y fabricados con el fin de generar hidrógeno y oxígeno con una pureza nominal de 99.8%.

Las celdas convencionales operan a tensiones 1.8 hasta 2.2 V con densidades de corriente por debajo de  $0.4 \text{ A/cm}^2$ ; los electrolizadores avanzados como el “brecha cero” (zero-gap) operan a tensiones menores (1.6 V) y densidades de corriente mayores (hasta  $2 \text{ A/cm}^2$ ).

Los electrolizadores de tipo tanque convencionales tienen eficiencias en el rango de 60-80%, mientras que modernos electrolizadores de “brecha cero” (zero-gap) puede tener hasta 90% de eficiencia. Las tasas de producción de hidrógeno en electrolizadores alcalinos comunes son entre  $0.01$  y  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , mientras que algunas unidades de gran escala pueden alcanzar de  $10$  a  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 2.6.1 Química de electrólisis del agua

Una unidad básica de la electrólisis de agua consiste en ánodo, cátodo, fuente de alimentación, y electrolito, siendo este último esencial para mejorar la reacción electroquímica [5, 14].

Con el fin de mejorar la conductividad de la solución, en el electrolizador se usa los electrolitos que generalmente se componen de iones con alta movilidad. Como electrolito se utilizan comúnmente bases fuertes tales como hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), aunque el KOH se utiliza con mayor frecuencia.

El KOH alcanza su máxima conductividad en un medio acuoso cuando la concentración está cerca de 28% y por esta razón la mayoría de los electrolizadores utilizan una concentración del 25% al 35% de KOH en agua. La conductividad de este electrolito disminuye al aumentar la temperatura alcanzando un máximo de aproximadamente  $150^\circ\text{C}$ .

Una corriente directa (CD) se aplica a los electrodos y para mantener la carga eléctrica y de valencia en equilibrio, los iones de hidróxido (aniones) se transfieren a través de la

solución de electrolito al ánodo, en la que los iones del hidróxido donan electrones y vuelven a la terminal positiva de la fuente de CD.

Durante el proceso de electrólisis del agua, cuando se usa un diafragma entre los electrodos, los receptores de gas pueden recoger el hidrógeno y el oxígeno que se forman en el cátodo y el ánodo respectivamente. Un electrolizador de dos celdas se muestra en la Figura 2.7.

Los electrolizadores de agua suelen estar constituidos por varias celdas o electrodos dispuestos en dos configuraciones básicas, el tipo tanque que opera en configuración unipolar, o el tipo prensa operado en configuración bipolar.

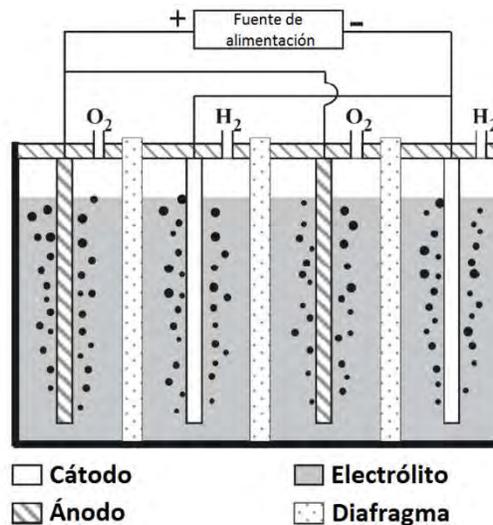


Figura. 2.7 Electrolizador alcalino de dos celdas.

La Figura 2.7 muestra un electrolizador con una configuración tipo tanque unipolar de dos celdas. Donde cada electrodo tiene una sola polaridad y todos los electrodos de la misma polaridad están conectados en paralelo. Los ánodos y cátodos están conectados alternativamente, con los electrodos y los diafragma se mantienen sumergidas dentro de un electrolito dentro del tanque.

Las celdas unipolares del tanque requieren de una construcción relativamente sencilla, pocas piezas, de bajo costo, y son fáciles de mantener. Sin embargo, también son voluminosos y no se pueden utilizar a altas temperaturas o presiones.

Las celdas de tipo tanque unipolares normalmente operan a presión atmosférica y a temperaturas entre 60°C y 90°C porque a temperaturas mayores el electrolito se evapora a mayor velocidad. Las pérdidas de energía por transmisión dependen de la longitud del trayecto, calibre del cableado, conexiones, derivaciones y la corriente suministrada.

Los electrodos están hechos de materiales electrocatalíticos para asegurar sobretensiones bajas, facilitando la transferencia rápida de carga electrodo-electrolito, y la generación de burbujas de gas en la superficie del electrodo, así como su desprendimiento de la superficie del electrodo de una celda en operación. Los electrodos pueden ser a base de acero inoxidable o níquel. El níquel es un material popular debido a su alta actividad catalítica, bajo costo y disponibilidad.

Para reducir las sobretensiones el electrodo debe proporcionar una interfaz entre el catalizador y el electrolito de gran superficie. Por lo tanto se han utilizado diversas geometrías de electrodos, incluidos los cuerpos con aletas, pantallas, placas perforadas y platos planos con superficies electroquímicamente rugosas.

Los elementos del grupo 8 [6] (Fe, Ru, Os), 9 (Co, Rh, Ir) y 10 (Ni, Pd, Pt) y sus aleaciones se utilizan convencionalmente como materiales de electrodo. Los metales nobles como el platino y el iridio tienen una alta actividad catalítica con alta resistencia a la corrosión, sin embargo estos materiales son costosos y su uso se limita a la electrólisis utilizando medios ácidos.

El Níquel, el cobalto y el acero inoxidable tienen bajas sobretensiones en soluciones de sosa o potasa cáustica en un medio acuoso y por esta razón, se utilizan ampliamente como cátodos para electrólisis alcalina.

Los diafragmas porosos son separadores y se utilizan para dividir las regiones de ánodo y cátodo para evitar la mezcla de los gases de hidrógeno y oxígeno desprendido, permitiendo al mismo tiempo el paso de la solución de electrolito.

Los poros de un diafragma deben permanecer llenos de líquido de manera que el gas no puede penetrar en ellos, así como permitir el paso de los iones hidróxido para reducir la resistencia. El uso de un diafragma permite la colocación adyacente de los electrodos, reduciendo así la sobretensión óhmica.

El diafragma debe tener un tamaño de poro de alrededor de  $5\ \mu\text{m}$  para mantener una baja resistencia y evitar que las burbujas de hidrógeno, de alrededor de  $10\ \mu\text{m}$ , lo traspasen.

Los materiales del diafragma deben ser resistentes a la corrosión y estructuralmente estable. Como por ejemplo el asbesto  $[\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ , tela tejida, materiales poliméricos como el politetrafluoroetileno (PTFE), materiales de óxido cerámico como el monóxido de níquel (NiO) y cermets (cerámico y metal) como Ni-BaTiO<sub>3</sub>.

### 2.6.2 Analogía del circuito eléctrico de las celdas de electrólisis del agua

Para realizar la electrólisis se deben superar un conjunto de barreras físicas que se pueden representar como un circuito eléctrico, de esta manera las barreras físicas se consideran resistencias eléctricas [5]. Es importante que estas barreras se analicen en los contextos de la termodinámica y cinética, así como los principios del proceso de transporte.

La Figura 2.8 muestra las resistencias eléctricas típicas en un sistema de electrólisis de agua en medio neutro, por ejemplo el sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). La resistencia  $R_1$  corresponde al circuito eléctrico externo incluyendo el cableado y las conexiones al ánodo.

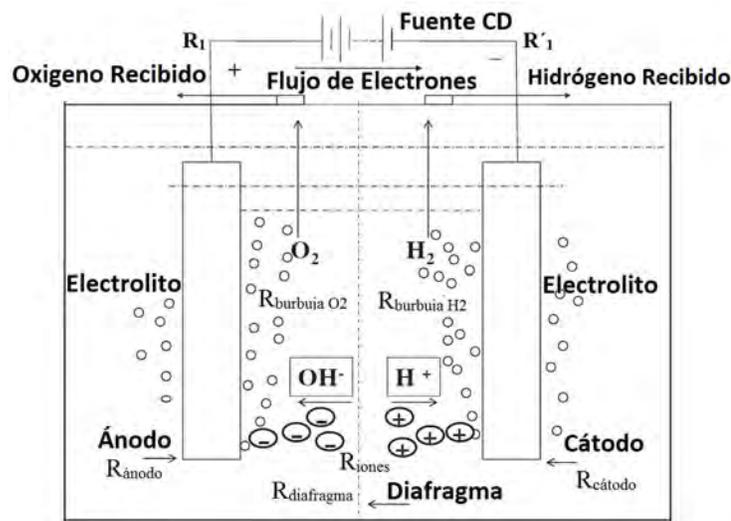


Figura. 2.8 Las resistencias eléctricas típicas en un sistema de electrólisis de agua

La  $R_{\text{ánodo}}$  se origina a partir de la sobretensión de la reacción de desprendimiento de oxígeno en la superficie del ánodo. La  $R_{\text{burbuja O}_2}$  se debe a la cobertura parcial del ánodo por

las burbujas de oxígeno, lo que dificulta el contacto entre el ánodo y el electrolito. Del mismo modo la  $R_{\text{burbuja H}_2}$  surge a partir de la obstrucción del cátodo por burbujas de hidrógeno.

Las  $R_{\text{diafragma}}$  y  $R_{\text{iones}}$  provienen de la resistencia del electrolito y el diafragma, respectivamente. La  $R_{\text{cátodo}}$  es causada por la sobretensión de la evolución de oxígeno y la  $R'_1$  es la resistencia eléctrica del cableado y las conexiones en el cátodo.

### 2.6.3 Resistencias en un sistema de electrólisis de agua

Las resistencias en el sistema del electrolizador se observan en la ecuación (2.8). Las resistencias del sistema se pueden clasificar en tres categorías, la primera categoría incluye todas las resistencias eléctricas ( $R_1$  y  $R'_1$ ); la segunda incluye la resistencia a la reacción ( $R_{\text{ánodo}}$  y  $R_{\text{cátodo}}$ ); y la tercera incluye la resistencia de transportación ( $R_{\text{burbuja O}_2}$ ,  $R_{\text{burbuja H}_2}$ ,  $R_{\text{diafragma}}$  y  $R_{\text{iones}}$ ).

La ecuación (2.8) [5] muestra las resistencias típicas en un sistema de electrólisis de agua.

$$R_{\text{Total}} = R_1 + R_{\text{ánodo}} + R_{\text{burbuja O}_2} + R_{\text{iones}} + R_{\text{membrana}} + R_{\text{burbuja H}_2} + R_{\text{cátodo}} + R'_1 \quad (2.8)$$

Las resistencias eléctricas  $R_1$  y  $R'_1$  presentes en la ecuación (2.8) se consideran como una parte integral de  $R_{\text{Total}}$  y se pueden calcular usando la ley de Ohm:  $R = V/I$ , en la que  $I$  es la corriente cuando la tensión  $V$  se aplica sólo en el circuito.

Las resistencias eléctricas también se puede calcular a partir de la ecuación física:  $R = L / (kA)$ , en la que  $L$ ,  $k$  y  $A$  son la longitud, la conductividad específica y el área de la sección transversal del conductor, respectivamente.

Conforme a la ley de Joule y los fenómenos de transporte, las resistencias eléctricas y de transporte, generan calor al proporcionar potencia al sistema de electrólisis. La energía eléctrica que se transforma en calor a causa de estas resistencias se conoce como pérdida óhmica.

Las resistencias de reacción ( $R_{\text{ánodo}}$  y  $R_{\text{cátodo}}$ ) se deben a las sobretensiones necesarias para superar las energías de activación de las reacciones de formación de hidrógeno y de oxígeno en las superficies de cátodo y ánodo, respectivamente.

Las resistencias de reacción determinan la cinética de las reacciones electroquímicas, debido a que están en función de las actividades en la superficie de los electrodos empleados.

A fin de mejorar la eficiencia energética de la electrólisis del agua y por lo tanto el rendimiento del sistema se deben reducir las resistencias mencionadas en la ecuación (2.8).

#### 2.6.4 Tensiones teóricas de celda

El agua es una de las sustancias termodinámicamente de mayor estabilidad de la naturaleza y por ello es difícil tratar de dissociar las moléculas de agua en  $H_2$  y  $O_2$ . Para obtener el hidrógeno y oxígeno del agua por electrólisis, se requiere superar el equilibrio de tensión de la celda ( $E^\circ$ ), que también es llamado “fuerza electromotriz” (tensión inducida).

El equilibrio de tensión de la celda ( $E^\circ$ ) se describe por la ecuación (2.9) [5] y se define como la diferencia de tensión entre el ánodo ( $E^\circ_{\text{ánodo}}$ ) y el cátodo ( $E^\circ_{\text{cátodo}}$ ).

$$E^\circ = E^\circ_{\text{ánodo}} - E^\circ_{\text{cátodo}} \quad (2.9)$$

La ecuación (2.10) [5] relaciona el cambio en la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) de la reacción electroquímica y el equilibrio de tensión de la celda. Donde  $n$  es el número de moles de electrones transferidos en la reacción, y  $F$  es la constante de Faraday.

$$\Delta G = nFE^\circ \quad (2.10)$$

Para la electrólisis del agua por celda, el  $E^\circ$  a  $25^\circ\text{C}$  es  $1.23 \text{ V}$  y la energía libre de Gibbs de la reacción es  $237.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ . A esta tensión no se producen los gases, es necesario vencer la entalpia de formación del agua que son  $237.2 \text{ kJ mol}^{-1}$  dando una tensión de  $1.48 \text{ V}$  (tensión termo neutral), que es la tensión mínima necesaria para producir hidrógeno.

La electrólisis del agua es termodinámicamente desfavorable a temperatura ambiente y sólo puede ocurrir cuando se suministra suficiente energía eléctrica. Incluso cuando se cumple el equilibrio de tensión ( $1.48 \text{ V}$ ), las reacciones en los electrodos son inherentemente lentas y es necesaria una sobretensión para poner en marcha la reacción.

Los electrolizadores industriales tienen un rango de tensión de 1.8 a 2.0 V con una densidad de corriente de 1.000 a 300 Am<sup>-2</sup>. La tensión de la celda ( $E_{cel}$ ) para la electrólisis se describe en la ecuación (2.14) [5].

$$E_{cel} = E_{anodo} - E_{catodo} + \sum \text{sobretensión} + iR_{cel} \quad (2.11)$$

La energía adicional requerida provoca una caída de tensión,  $iR_{cel}$ , (donde  $i$  es la corriente a través de la celda y  $R_{cel}$  es la suma de las resistencias eléctricas de la celda ( $R_1$  y  $R'_1$ ). La sobretensión total es la suma de sobretensiones o resistencias de transportación ( $R_{burbuja\ O_2}$ ,  $R_{burbuja\ H_2}$ ,  $R_{diafragma}$  y  $R_{iones}$ ).

La Figura 2.9 muestra la relación entre el tensión de celdas electrolizador y la temperatura de funcionamiento. El plano tensión-temperatura de la celda se divide en tres zonas por la llamada línea de equilibrio de tensión y de la línea de tensión termo-neutral.

El equilibrio de tensión es la tensión mínima teórica requerida para disociar el agua por electrólisis, por debajo del cual la electrólisis del agua no puede continuar. El equilibrio de tensión cesa al aumentar la temperatura.

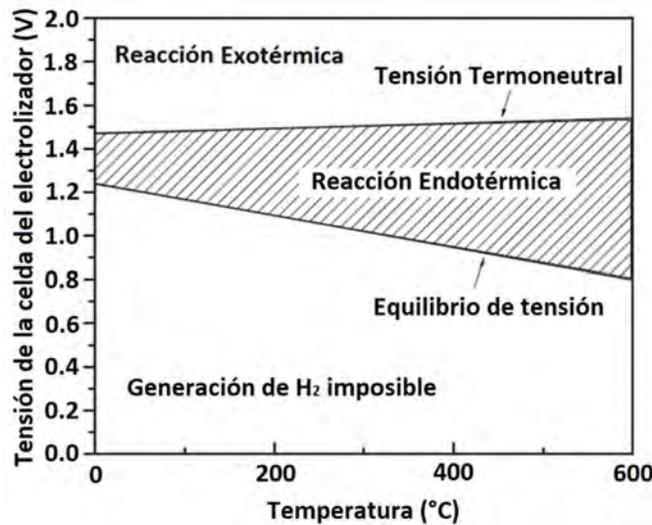


Figura. 2.9 Tensión de celda del electrolizador Vs la temperatura de funcionamiento.

La tensión termo-neutral es la tensión mínima real que tiene que ser aplicada a la celda de electrólisis, por debajo del cual la electrólisis es endotérmica y por encima del cual, exotérmica como se observa en la Figura 2.9. La tensión termo-neutral incluye, las sobretensiones de los electrodos, que son sólo débilmente dependiente de la temperatura.

### 2.6.5 Eficiencias de las celdas.

La eficiencia energética se define comúnmente como el porcentaje de la energía de salida dividido entre la energía total de entrada. Sin embargo, hay diferentes maneras de comparar, evaluar y expresar la eficiencia de la electrólisis.

En la electroquímica, la eficiencia de la tensión de la celda ( $\eta_{E_{cel}}$ ) de electrólisis se puede calcular utilizando la ecuación (2.12) [5].

$$\% \eta_{E_{cel}} = \frac{(E_{anodo} - E_{catodo})100}{E_{cel}} \quad (2.12)$$

Con base en los cambios de energía de la reacción generada por la electrólisis del agua, se puede calcular la eficiencia farádica ( $\eta_{Faradica}$ ) y la eficiencia térmica ( $\eta_{Termica}$ ). Para calcular la  $\eta_{Faradica}$  y la  $\eta_{Termica}$  se divide la energía de salida entre la energía de entrada.

Como se muestra en las ecuaciones (2.13) y (2.14) [5]. La energía de salida está determinada por el cambio de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) y el cambio de la entalpía ( $\Delta H$ ). La energía de entrada es el cambio de la energía libre de Gibbs más las pérdidas ( $\Delta G + \text{pérdidas}$ ).

$$\eta_{Faradica} = \frac{\Delta G}{\Delta G + \text{pérdidas}} = \frac{E_{\Delta G}}{E_{cel}} \quad (2.13)$$

$$\eta_{Termica} = \frac{\Delta H}{\Delta G + \text{pérdidas}} = \frac{E_{\Delta H}}{E_{cel}} \quad (2.14)$$

La  $\eta_{Faradica}$  y la  $\eta_{Termica}$  también se pueden calcular desde el punto de vista de la tensión de la celda. Las tensiones de salida son: equilibrio de tensión de la celda ( $E_{\Delta G}$ ) para la  $\eta_{Faradica}$  y la tensión termo-neutral ( $E_{\Delta H}$ ) para la  $\eta_{Termica}$ . La tensión de entrada es la tensión de la celda ( $E_{cel}$ ).

La ecuación (2.14) define la  $\eta_{Termica}$  con una tensión de salida termo-neutral. Si la  $E_{\Delta H}$  cambia a una tensión donde la reacción es endotérmica (Figura 2.9), absorbiendo el calor del ambiente, entonces es posible que la  $\eta_{Termica}$  exceda el 100%.

Las ecuaciones (2.13) y (2.14) se simplifican en las ecuaciones (2.15) y (2.16) [5], respectivamente, considerando que la electrólisis ocurre a una temperatura de 25°C. Con una temperatura de operación de 25°C el  $E_{\Delta G}$  es de 1.23 V y la  $E_{\Delta H}$  es de 1.48 V

$$\eta_{Faradica}(25^{\circ}C) = \frac{1.23(V)}{E_{cel}} \quad (2.15)$$

$$\eta_{Termica}(25^{\circ}C) = \frac{1.48(V)}{E_{cel}} \quad (2.16)$$

Cuando la electrólisis ocurre a una temperatura de 25°C, los valores de la  $\eta_{Faradica}$  son siempre menor a 1, debido a las pérdidas. Mientras que la  $\eta_{Termica}$  puede ser mayor a 1, cuando  $E_{\Delta H}$  es menor a 1.48 V, esto se debe a que la reacción se vuelve endotérmica.

Cuando  $E_{\Delta H}$  es 1.48 V la electrólisis funciona con una eficiencia del 100%. No se absorbe o libera calor al medio ambiente. Cuando la tensión de la celda del electrolizador es mayor a 1.48 V, la reacción es exotérmica.

Otro medio para evaluar la eficiencia de la celda de electrólisis del agua es midiendo el hidrógeno producido. De esta forma la eficiencia queda en términos de tasa de producción de hidrógeno

Para el cálculo de la eficiencia de tasa de producción de hidrógeno ( $\eta_{H_2 \text{ tasa de producción}}$ ) se considera como la energía de salida al hidrógeno producido y se divide entre la energía total de entrada.

La  $\eta_{H_2 \text{ tasa de producción}}$  se calcula con la ecuación (2.17) [5]. Donde el U es la tensión de la celda, i es la corriente, t representa el tiempo. V es la tasa de producción de hidrógeno ( $m^3h^{-1}$ ) por unidad de volumen del electrolizador ( $m^{-3}$ ).

$$\eta_{H_2 \text{ tasa de producción}} = \frac{r_{H_2 \text{ tasa de producción}}}{\Delta E} = \frac{V(m^3m^{-3}h^{-1})}{Uit(kj)} \quad (2.17)$$

La ecuación (2.17) es una manera de comparar de forma directa la capacidad de producción de hidrógeno de diferentes celdas de electrólisis.

La ecuación (2.18) [5] es una forma de calcular la eficiencia de producción de hidrógeno ( $\eta_{H_2 \text{ producción}}$ ) por mol de hidrógeno.

$$\eta_{H_2 \text{ producción}} = \frac{E_{\text{utilizable}}}{\Delta E} = \frac{283.8(KJ)}{Uit} \quad (2.18)$$

La energía total de entrada se determina con la tensión de la celda  $U$ ,  $i$  es la corriente,  $t$  es el tiempo necesario para la producción de un gramo de hidrógeno. La energía de salida es la energía utilizable ( $E_{\text{utilizable}}$ ) de un mol de hidrógeno que tiene 15,283.8 kJ de poder calorífico superior HHV (por sus siglas en inglés de Higher heating value).

Una expresión alternativa es la eficiencia neta ( $\eta_{\text{eficiencia neta}}$ ), consiste en restar las pérdidas de energía ( $E_{\text{pérdida}}$ ) de la entrada total de energía ( $E_{\text{entrada}}$ ) como se muestra en la ecuación (2.19) [5].

$$\eta_{\text{eficiencia neta}} = 1 - \frac{E_{\text{pérdida}}}{E_{\text{entrada}}} \quad (2.19)$$

Donde  $E_{\text{pérdida}}$  se puede expresar en términos de las resistencias mencionadas en la ecuación (2.8). Al considerar estas resistencias un análogo de la unidad eléctrica, cada una de ellas se puede calcular usando la ley de Joule. Esto se expresa en la ecuación (2.20) [5] que identifica todas las pérdidas de energía en los componentes.

$$\begin{aligned} E_{\text{pérdida}} &= \sum E_{\text{pérdida},i} \\ &= E_{\text{pérdida,circuito}} + E_{\text{pérdida,ánodo}} + E_{\text{pérdida,burbuja } O_2} \\ &\quad + E_{\text{pérdida,iones}} + E_{\text{pérdida,membrana}} + E_{\text{pérdida,cátodo}} \\ &\quad + E_{\text{pérdida,burbuja } H_2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

## Conclusiones

En resumen, en México el autotransporte es un factor clave en el desarrollo de la economía y representa un gran consumo energético, de hasta un 46% de los combustibles fósiles en el año 2015. Debido a esto, disminuir el consumo de combustibles fósiles en los motores de combustión interna es de gran relevancia y es posible mediante el enriquecimiento de gasolina con hidrógeno.

Los procesos de las fuentes convencionales de hidrógeno tienen subproductos no deseados, mientras que la electrólisis es un proceso que produce hidrógeno de alta pureza y que tiene como único subproducto el oxígeno.

El electrolizador alcalino es una tecnología viable por la alta pureza de hidrógeno que produce, bajo costo de materiales, está compuesto por piezas simples y típicamente tiene eficiencias del 60% al 80%.

La tensión y la corriente aplicada a la celda del electrolizador son cruciales para realizar adecuadamente la electrólisis. Con una tensión teórica inferior a 1.48 V la generación de  $H_2$  es imposible y con una tensión excesiva se genera una reacción exotérmica. La corriente aplicada a la celda es la que determina la cantidad de  $H_2$  generado.

Existen dos formas de mejora de la eficiencia energética de la electrólisis: una es reducir termodinámicamente la energía necesaria para disociar el agua para producir hidrógeno, esto se logra aumentando la temperatura de funcionamiento o la presión; la otra es reducir las pérdidas de energía en el electrolizador minimizando los componentes que contribuyen a una mayor resistencia. En el siguiente capítulo se exponen con mayor detalle los fenómenos que ocurren durante la electrólisis.

# CAPÍTULO III

## EL ELECTROLIZADOR ALCALINO

### 3.1 Electrolizador alcalino

Este capítulo explicará el comportamiento y características del electrolizador alcalino utilizado en esta tesis [15]. El electrolizador fue desarrollado en el laboratorio de Electroquímica y Corrosión de la Escuela Superior de Ingeniería Química del Instituto Politécnico Nacional (ESIQIE-IPN).

El electrolizador alcalino que se estudia en esta tesis contiene NaOH al 5% en peso en solución acuosa como electrolito. En el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción o ganancia de electrones y se genera H<sub>2</sub>, mientras que en el ánodo se lleva a cabo la reacción de oxidación o pérdida de electrones y se produce O<sub>2</sub>.

La Figura 3.1 muestra un electrolizador alcalino de una celda sin diafragma. Al no tener un diafragma que mantenga separados los gases se obtiene una mezcla de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> que se denomina oxihidrógeno.

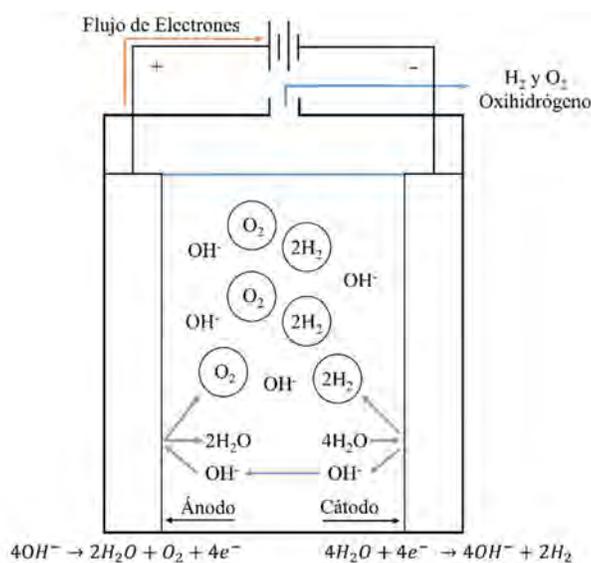


Figura. 3.1 Electrolizador alcalino mono-celda.

Las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) [15] describen las reacciones en el ánodo, cátodo y la reacción química global de la electrólisis, respectivamente, que se presentan en un electrolizador alcalino con NaOH como electrolito.  $O_2$  y  $H_2$  Oxihidrógeno Flujo de Electrones



En esta tesis, el electrolizador alcalino tiene como electrolito al NaOH en solución acuosa y consta de siete celdas conectadas en serie. El espaciamiento entre los electrodos es de 5mm y usa aproximadamente 288 ml de electrolito.

Las siete celdas están formadas por ocho placas de acero inoxidable tipo 304, con dimensiones de 7.5 x 10.97 cm por placa, por lo que el área reactiva total es de 1,151.85 cm<sup>2</sup>.

La curva característica del electrolizador alcalino en la Figura 3.2 [15].

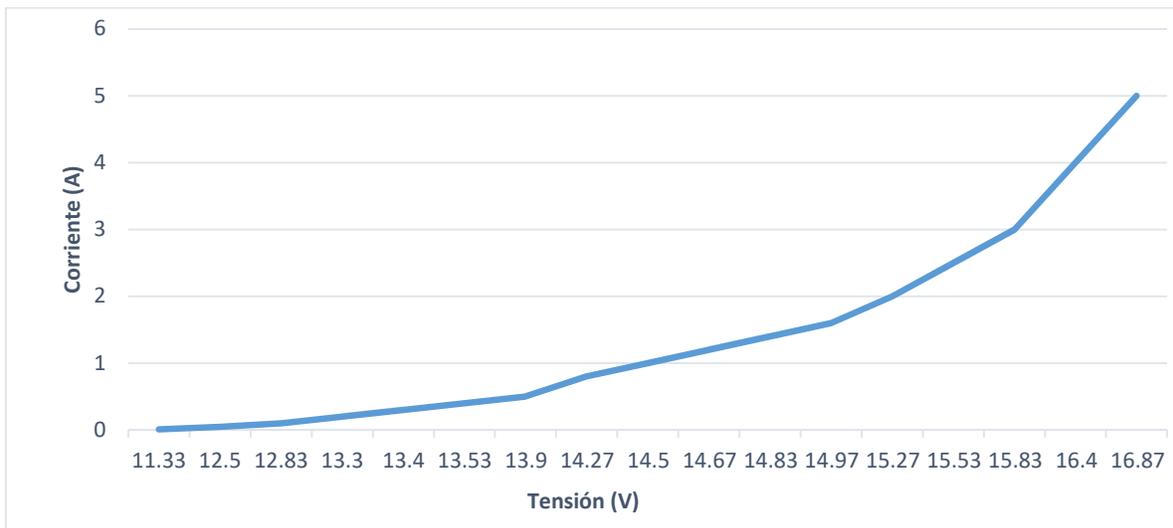


Figura. 3.2 Curva característica tensión Vs corriente del electrolizador alcalino de 7 celdas.



La señal de prueba consiste en escalones de tensión usados para la caracterización, se basa en el rango de tensión de una celda de electrólisis alcalina, como se puede ver en la Figura 3.4 [5].

En la industria el rango típico de la tensión aplicada a cada celda es de 1.8 a 2.2 V. Para las pruebas de tensión aplicadas se utilizó una tensión entre 1 y 2.3 V por celda, el rango está dentro de los parámetros de una celda típica (1.6 a 2.75 V).

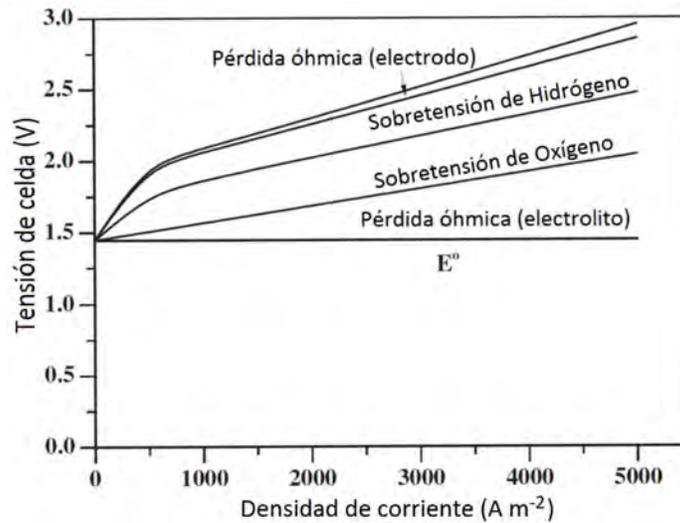


Figura. 3.4 Composiciones típicas de la tensión de una celda de electrólisis de agua alcalina.

El rango de tensión por celda que se observa en la Figura 3.4 es de suma importancia. Al sobrepasar la tensión por celda disminuye la producción de hidrógeno y oxígeno, también se generan compuestos no deseados que disminuyen la eficiencia de producción y pueden ser nocivos para la salud.

Considerando los datos anteriores se realizó la caracterización con una celda y se fue escalando hasta llegar a las siete celdas en serie.

Los cambios repentinos entre los valores de tensión (escalones), permiten ver el comportamiento del electrolizador bajo una demanda creciente de hidrógeno. Las tensiones están dentro del rango de operación de los diferentes arreglos de las celdas.

Para cada uno de los arreglos de celdas (Figura 3.5), se generaron rutinas de escalones de tensión con un rango de 1 a 2.3 V por celda. Las pruebas de caracterización comienzan

con una tensión inferior a la generación de hidrógeno hasta la tensión máxima correspondiente al número de celdas.

En cada escalamiento de las celdas se utilizan dos pruebas. El número de escalones y la tensión de los mismos se mantienen para ambas pruebas. La diferencia entre las pruebas radica en los intervalos de tiempo entre escalones; una de las pruebas mantiene los escalones por 5 segundos y la otra por 5 minutos.



*Figura. 3.5 Electroizador alcalino en etapas de escalamiento, 1, 4 y 7 celdas.*

En todas las pruebas se usó el electrolito NaOH al 5% peso. Entre cada escalamiento se reemplazó el electrolito y se realizó limpieza al electroizador.

Todas las pruebas fueron medidas y registradas con la fuente de alimentación XLN10014. Las mediciones de tensión y corriente se realizaron con intervalos de aproximadamente 300 milisegundos. Las pruebas de mayor duración no sobrepasaron 1 hora de operación continua.

En la Figura 3.6 muestra el arreglo para realizar las pruebas de caracterización. La fuente alimenta al electrolizador y el gas oxihidrógeno generado pasa por un burbujeador que retiene las trazas de compuestos no deseado y evita accidentes como la ignición.



*Figura. 3.6 Arreglo para pruebas con fuente de alimentación y electrolizador alcalino.*

Las pruebas se realizaron escalando al electrolizador desde una celda hasta siete celdas. En esta tesis se muestran las curvas características del electrolizador de una celda (Figura 3.7 y 3.8), cuatro celdas (Figura 3.9 y 3.10) y siete celdas (Figura 3.11 y 3.12), siendo representativas del comportamiento al hacer el escalamiento.

La Figura 3.7 muestra la curva característica del electrolizador alcalino de una celda al aplicarle un escalón de tensión, de 5 segundos. En la gráfica se observa que a 1.8 V comienza una demanda de corriente con 40 mA. La generación de hidrógeno es visible en el burbujeador hasta que el electrolizador es llevado al punto de operación de 2 V y 0.4 A.

Conforme se incrementa la tensión también aumenta el consumo de corriente, como por ejemplo en el punto de operación del electrolizador de 2.3 V que se tiene un consumo de 2.4 A.

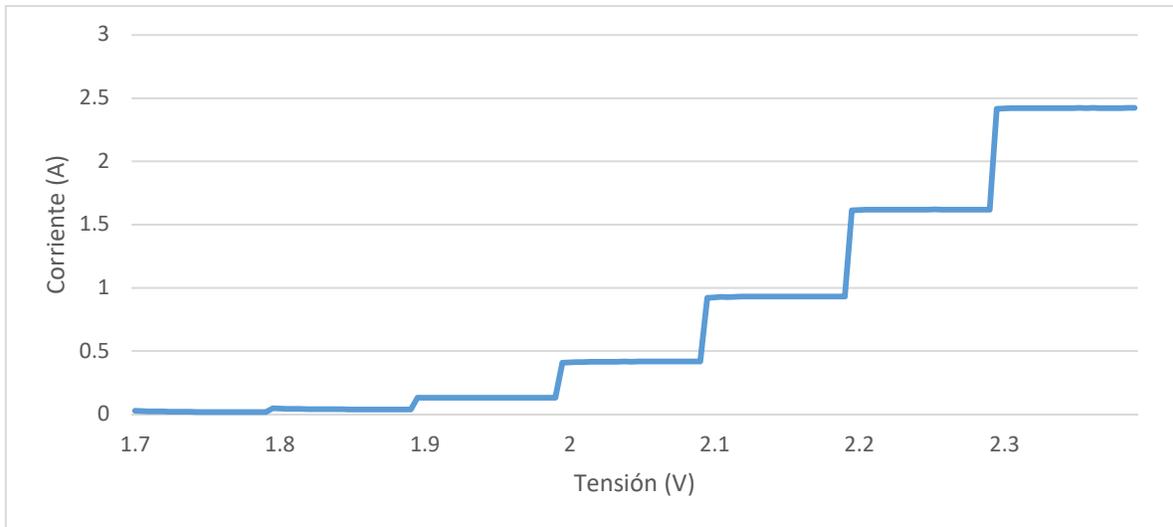


Figura. 3.7 Curva característica de electrolizador alcalino de 1 celda con escalones de corriente de 5 segundos de duración.

De igual forma se realizó una segunda prueba al electrolizador de una celda (Figura 3.8), con el mismo incremento tensión por escalón y el mismo número de escalones, cambiando solo la duración a 5 minutos por escalón.

El consumo de corriente inicia en los mismos valores de tensión para ambas pruebas. En cada escalón de tensión se observa que el consumo de corriente no se mantiene constante, la corriente tiene un incremento gradual conforme pasa el tiempo.

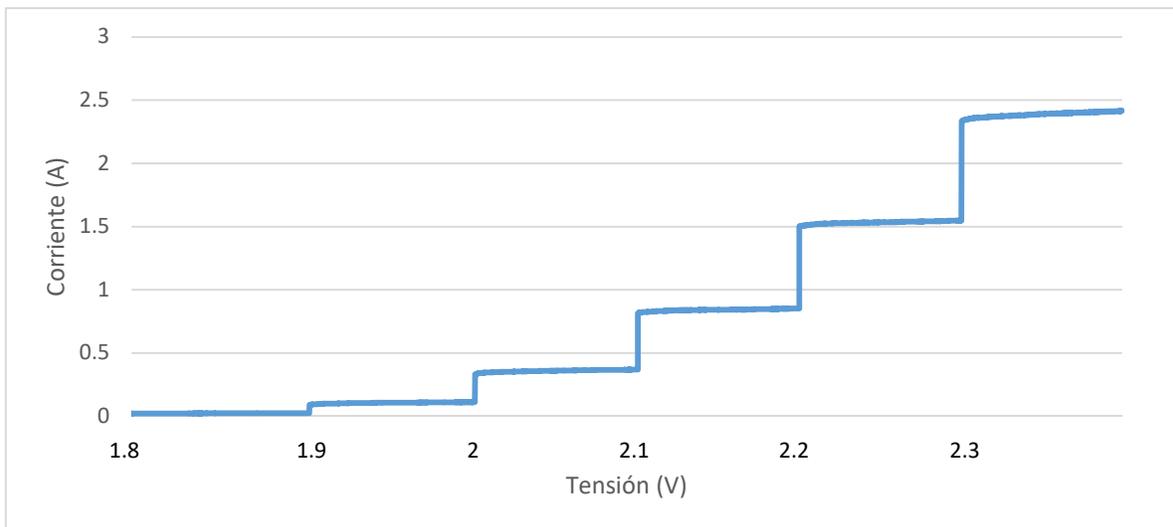
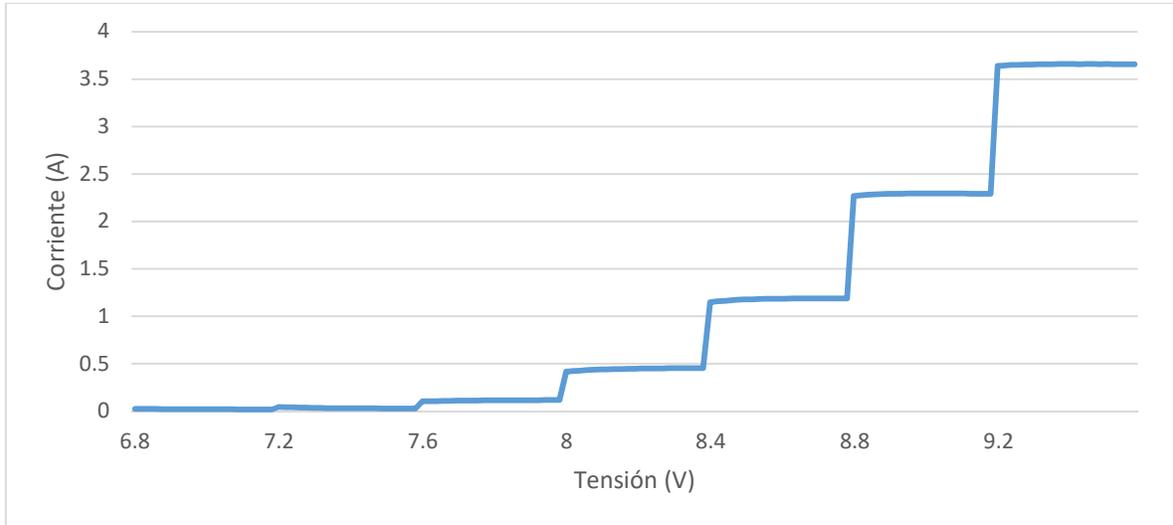


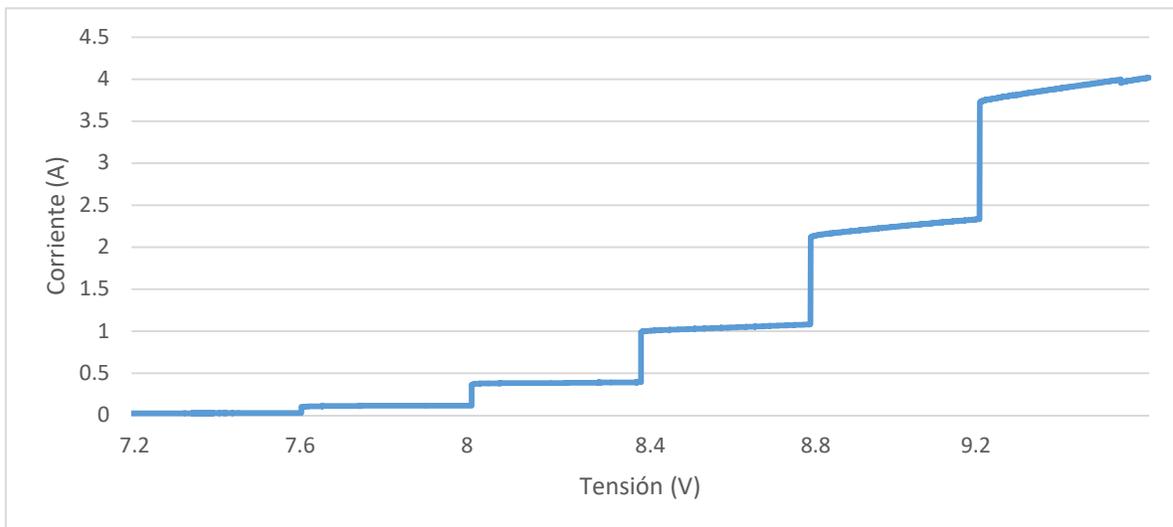
Figura. 3.8 Curva característica de electrolizador alcalino de 1 celda con escalones de corriente de 5 minutos por escalón.

La Figura 3.9 y 3.10 muestra la curva característica del electrolizador de 4 celdas sometido a las pruebas escalón de 5 segundos y 5 minutos, respectivamente. Para ambas pruebas el consumo de corriente inicia a los 7.2 V, tensión que corresponde a 1.8 V por celda.



*Figura. 3.9 Curva característica de electrolizador alcalino de 4 celdas con escalones de corriente de 5 segundos de duración.*

Para ambas pruebas escalón (Figuras 3.9 y 3.10), a partir del escalón con tensión de 7.6 V se observa un incremento gradual en el consumo de corriente. En la figura 3.10 se observa un incremento hasta llegar a 4 A.



*Figura. 3.10 Curva característica de electrolizador alcalino de 4 celdas con escalones de corriente de 5 minutos de duración.*

La Figura 3.11 y 3.12 muestra la curva característica del electrolizador de 7 celdas sometido a las pruebas escalón de 5 segundos y 5 minutos, respectivamente. Para ambas pruebas el consumo de corriente inicia a los 12.5 V, tensión que corresponde a 1.78 V por celda.

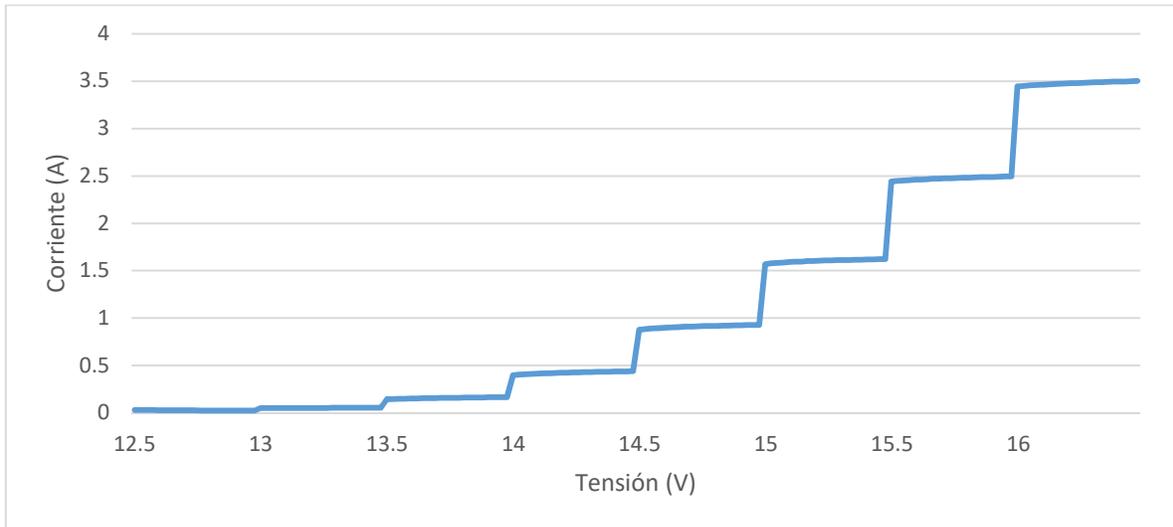


Figura. 3.11 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas con escalones de corriente de 5 segundos de duración.

Para ambas pruebas del electrolizador con 7 celdas, a partir del escalón con tensión de 13.5 V se observa un incremento gradual en el consumo de corriente. En la prueba escalón de 5 minutos (Figura 3.12), el incremento de corriente llega hasta 3.8 A.

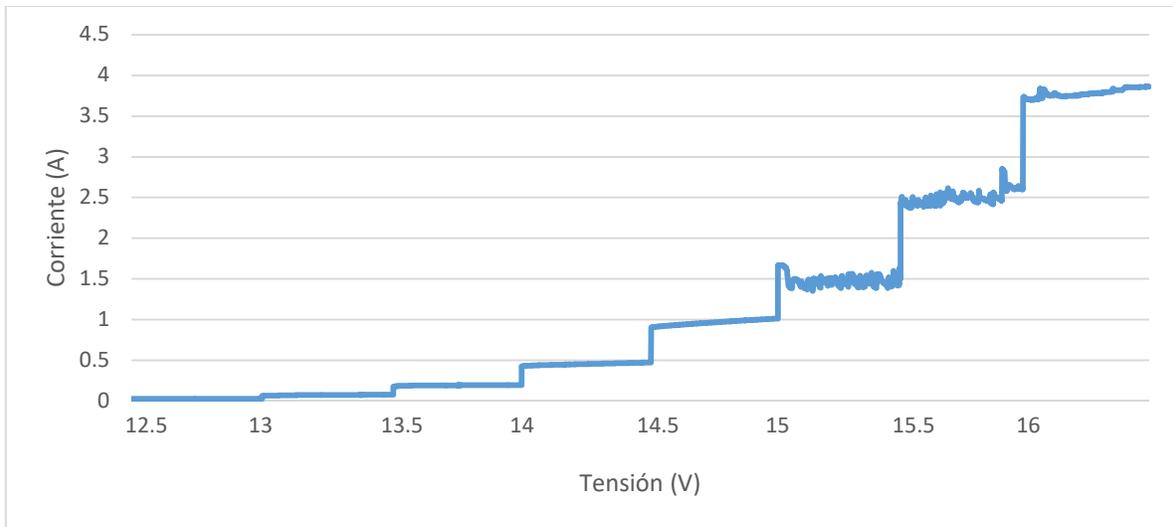


Figura. 3.12 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas con escalones de corriente de 5 minutos de duración.

Los datos obtenidos durante las mediciones de las pruebas escalón de 5 segundos y de 5 minutos, se observa que el sistema responde sin retraso a los escalones de tensión, es decir, el consumo de corriente cambia cuando la tensión aplicada al electrolizador cambia.

Los datos obtenidos de las pruebas a los escalamientos de 1, 4 y 7, muestran que el consumo de corriente por celda aumenta conforme se escala el electrolizador. La Tabla 3.1 contiene los datos de tensión y corriente, representativos de las pruebas escalón de 5 segundos (Figuras 3.7, 3.9 y 3.11).

*Tabla 3.1 Tensión aplicada y consumo de corriente a los escalamientos de 1, 4 y 7 celdas.*

Tensión (V) 1 Celda	Corriente (A) 1 Celda	Tensión (V) 4 Celdas	Corriente (A) 4 Celdas	Tensión (V) 7 Celdas	Corriente (A) 7 Celdas
2.004	0.407	8.002	0.415	14	0.403
2.103	0.921	8.401	1.148	15.001	1.614
2.202	1.612	8.801	2.269	15.501	2.455
2.302	2.417	9.202	3.64	16.001	3.445

El conjunto de pruebas realizado fue con el objetivo de identificar el comportamiento dinámico del electrolizador ante cambios de consumo de potencia y producción de hidrógeno. Los datos de las pruebas realizadas muestran que el cambio de la tensión aplicada a la celda es necesario para regular la producción de hidrógeno.

Los datos obtenidos no permiten identificar si el sistema está en estado estable o en estado transitorio. El sistema se considera estable cuando se aplica una tensión de forma constante y no hay cambios de corriente superiores a  $\pm 10\%$  [17].

Un factor adicional a considerar es la temperatura, como se expresó en el capítulo II, al aplicarse una tensión teórica mayor a 1.48 V por celda, se genera una reacción exotérmica.

La reacción exotérmica transforma en calor parte de la energía eléctrica que ingresa al sistema, esta reacción aumenta la temperatura del sistema. Se realizan dos pruebas escalón de dos horas por escalón, para determinar el aumento de temperatura y como afecta la curva de desempeño del electrolizador.

Con las pruebas escalón también se busca determinar si el sistema se mantiene estable aplicando una tensión constante.

Para monitorear la temperatura del electrolizador se colocan tres termopares, dos en las tapas y uno fue colocado en la celda del centro como se observa en la Figura 3.13. Debido a la ubicación del termopar en la celda del centro, la temperatura medida por este termopar se considera como la temperatura promedio del electrolizador.

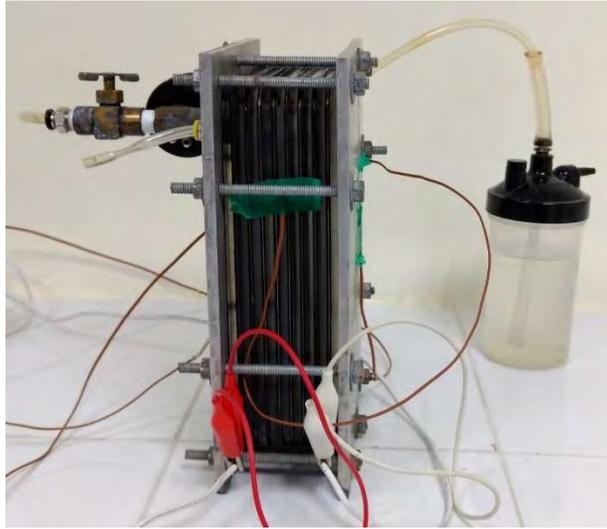


Figura. 3.13 Electrolizador de 7 celdas instrumentado con termopares.

La primera prueba escalón de 2 horas consistió en llevar al sistema a la tensión máxima de 16 V y después de 2 horas el siguiente escalón fue a 14 V. La Figura 3.14 muestra la curva característica de tensión contra corriente, es decir, el comportamiento del consumo de corriente ante los cambios de tensión (de 16 a 14 V).

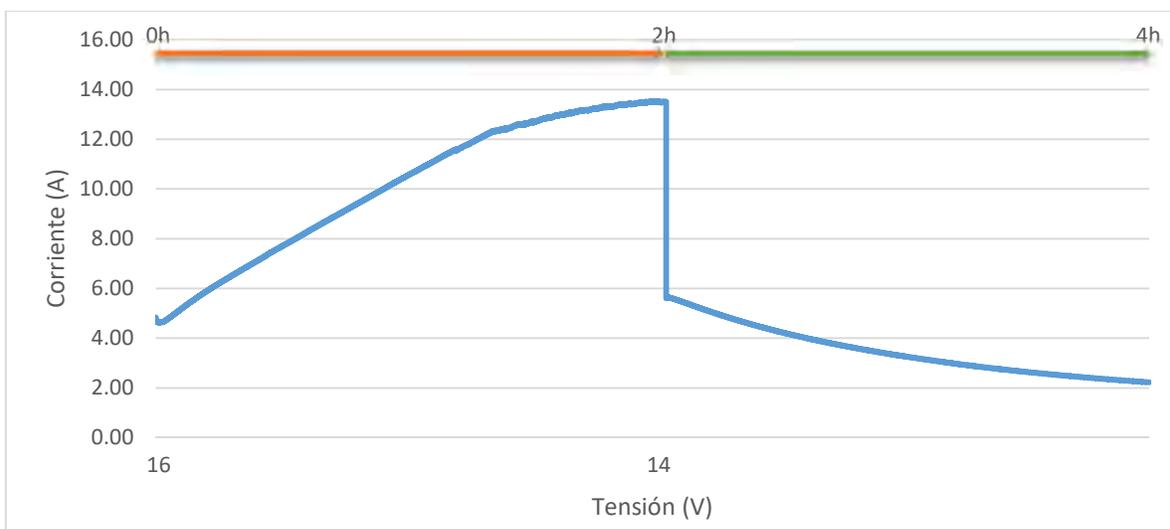


Figura. 3.14 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, tensión Vs corriente, de 16 a 14 V, 2 horas por escalón.

La figura 3.15 también corresponde a la primera prueba escalón de 2 horas y muestra la curva característica de corriente contra temperatura.

En la Figura 3.15 la tensión se mantiene constante por dos horas a 16 V, siendo el consumo de corriente inicial de 4.8 A con una temperatura de 28.22°C. En la gráfica de la Figura 3.15 se observa que al aplicar al electrolizado 16 V constantes por dos horas, la corriente alcanzada es de 13.5 A con una temperatura de 66.4°C.

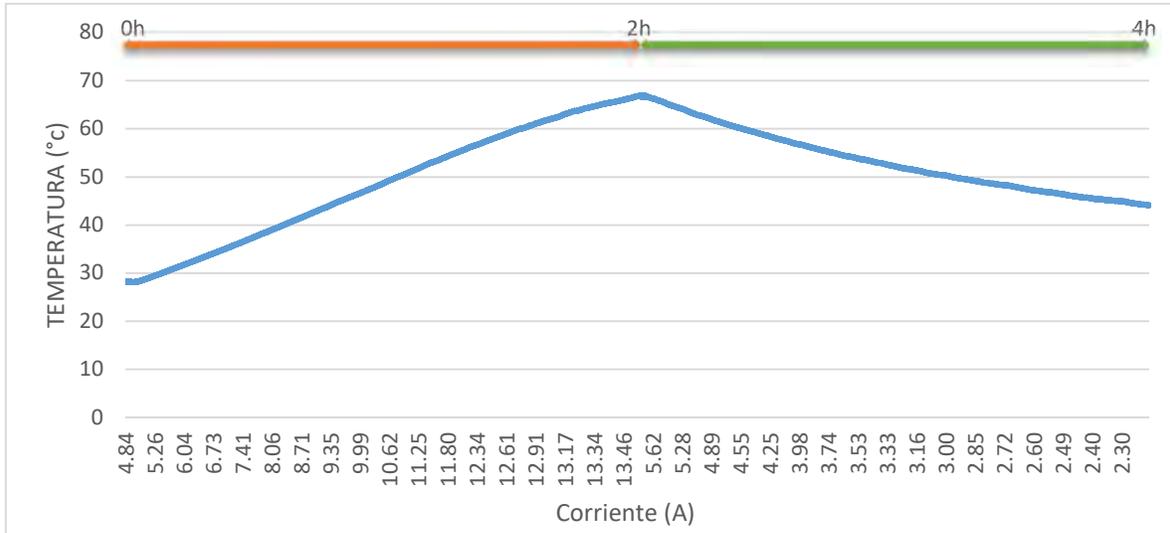


Figura. 3.15 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, corriente vs temperatura, de 16 a 14 V, 2 horas por escalón.

Cuando inicia el escalón a 14 V la temperatura es de 66.4°C (Figura 3.15), la caída de tensión se ve reflejada con la caída en el consumo de corriente, que cambia de 13.5 a 5.7 A (Figura 3.14). Cabe destacar que la corriente de 5.7A es 14.25 veces mayor a la observada en la Figura 3.11 donde a 14 V la corriente es de 0.4 A.

Conforme disminuye la temperatura también lo hace el consumo de corriente hasta llegar a 2.2A (Figuras 3.14 y 3.15), la prueba termina con una temperatura de 44°C. Los datos obtenidos indican que el cambio en el consumo de corriente no tiene retraso con respecto a los cambios en la tensión.

La segunda prueba escalón de 2 horas comienza con un escalón de 14 V por 2 horas, seguido de un escalón de 16 V por otras 2 horas.

En las Figuras 3.16 y 3.17 se observa que la tensión se mantiene estable a los 14 V y el consumo de corriente inicial es de 0.6 A y una temperatura de 28.2°C. Tras transcurrir aproximadamente 1 hora con 56 minutos, la corriente y temperatura se estabilizan a 1.29 A y 33°C.

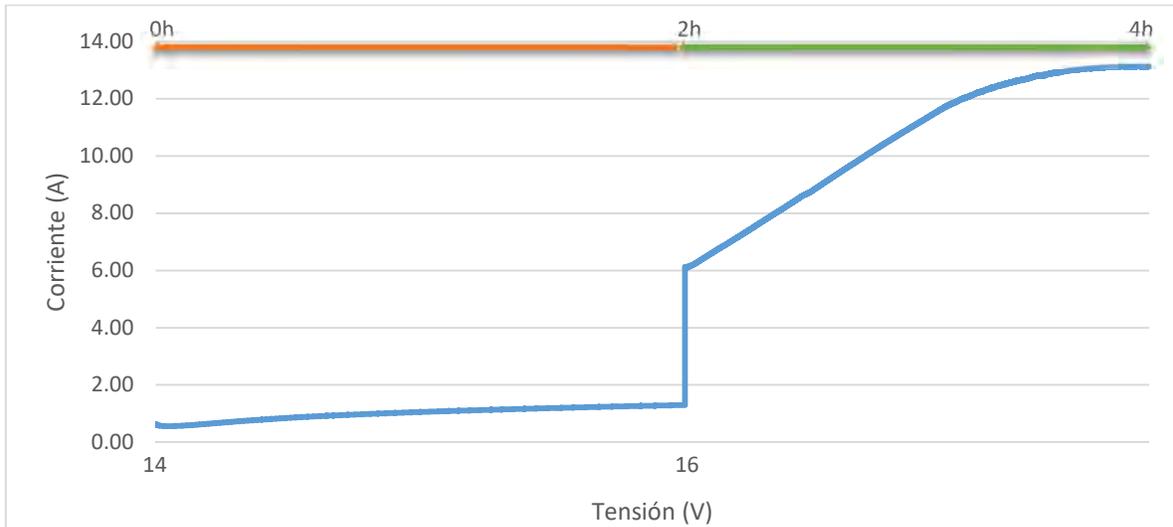


Figura. 3.16 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, tensión Vs corriente, de 14 a 16 V, 2 horas por escalón.

Los datos recopilados indican que al momento de inicio del escalón de 16 V la corriente es de 6.1 A (33°C). Al término de 2 horas el sistema se estabiliza a 13.1 A y una temperatura de 68°C.

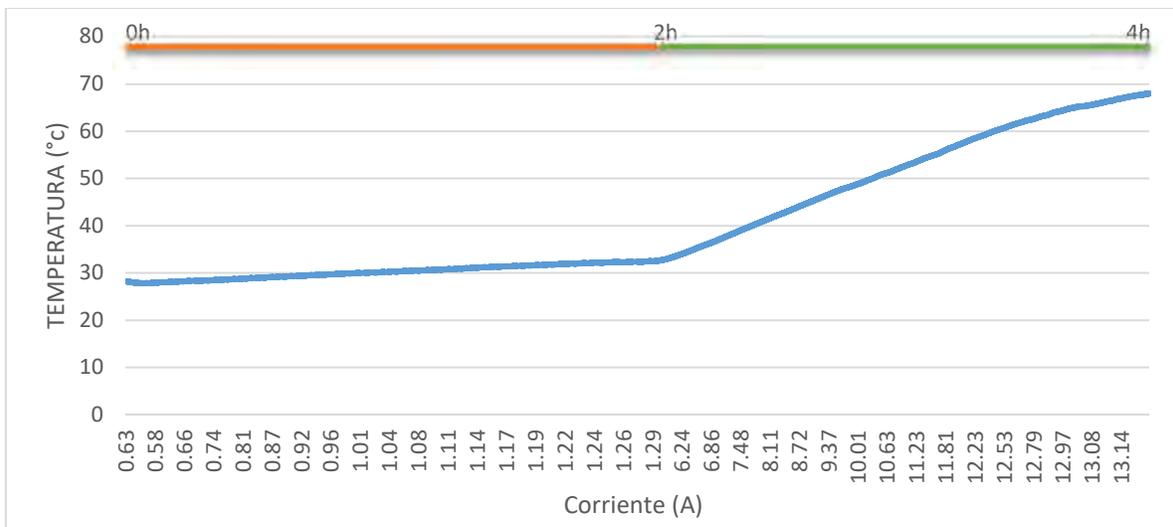


Figura. 3.17 Curva característica de electrolizador alcalino de 7 celdas, corriente vs temperatura, de 14 a 16 V, 2 horas por escalón.

### 3.3 Cálculo teórico de hidrógeno generado

Partiendo de las reacciones electroquímicas presentes en las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) y considerando al H<sub>2</sub> un gas ideal en condiciones estándar (1 atm, 25° C), es posible calcular el volumen teórico de hidrógeno generado (VH<sub>2</sub>) con la ecuación (3.4).

$$V_{H_2} = \frac{I t R T}{e F P} \quad (3.4)$$

Donde I es la corriente aplicada a cada celda, t es el tiempo de operación en segundos, para el cálculo se considera 60 s (1 min), R es 0.082 (atm L / mol °K), T es la temperatura en grados Kelvin (25° C = 298° K), e es la cantidad de electrones involucrados en la reacción electroquímica ideal por unidad mol de H<sub>2</sub> (ecuación 3.3), F es la constante de Faraday (96,494 A s / mol) y P es la presión atmosférica (1 atm).

Como referencia de la energía transformada en calor, se calcula la eficiencia térmica ( $\eta_{\text{Térmica}}$ ) teórica de las celdas mediante la ecuación (2.16). Considerando los datos de la tensión y la corriente presentes en la Tabla 3.1, se calculó el VH<sub>2</sub> y la  $\eta_{\text{Térmica}}$  mediante las ecuaciones (3.4) y (2.16), respectivamente. Los resultados están contenidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2 Cálculo teórico de volumen de H<sub>2</sub> generado y  $\eta_{\text{Térmica}}$  de escalamiento de 1, 4 y 7 celdas.

Tensión (V) 1 Celda	Corriente (A) 1 Celda	H <sub>2</sub> (L) por celda	$\eta_{\text{Térmica}}$ por celda
2.004	0.407	0.00309	0.7385
2.103	0.921	0.00699	0.7037
2.202	1.612	0.01224	0.6721
2.302	2.417	0.01836	0.6429
Tensión (V) 4 Celdas	Corriente (A) 4 Celdas	H <sub>2</sub> (L) por celda	$\eta_{\text{Térmica}}$ por celda
8.002	0.415	0.00315	0.7398
8.401	1.148	0.00872	0.7046
8.801	2.269	0.01723	0.6726
9.202	3.64	0.02765	0.6433
Tensión (V) 7 Celdas	Corriente (A) 7 Celdas	H <sub>2</sub> (L) por celda	$\eta_{\text{Térmica}}$ por celda
14	0.403	0.00306	0.74
15.001	1.614	0.01226	0.6906
15.501	2.455	0.01865	0.6683
16.001	3.445	0.02617	0.6474

### Conclusiones

Al hacer el escalamiento del electrolizado durante las pruebas escalón de 5 segundos, la corriente total consumida por el electrolizador no aumenta proporcionalmente con respecto a la tensión aplicada. La conexión en serie del electrolizador implica que la tensión aplicada a cada celda es la misma conforme se realizó la conexión de más celdas en serie.

Los datos obtenidos en las pruebas experimentales demuestran que la conexión en serie de las celdas del electrolizador implica que el consumo de corriente por celda aumenta y por lo tanto a una misma tensión se produce más hidrogeno. La producción de hidrógeno es proporcional a la corriente aplicada.

La temperatura del sistema influye en la cantidad de corriente consumida y por lo tanto la eficiencia del sistema para generar hidrógeno. Con un consumo de corriente entre 13.1 a 13.5 A, el electrolizador mantiene una producción de hidrógeno teórica entre 5.7 y 5.88 veces por celda comparado con la producción previa al aumento de temperatura.

El electrolizador presenta un comportamiento dinámico lento debido al tiempo que demora en alcanzar la temperatura necesaria para obtener la máxima producción de hidrógeno.

La lentitud del electrolizador limita los métodos de control que se pueden aplicar. El control modo corriente permitiría llevar rápidamente el electrolizador a una alta producción de hidrógeno, pero sobrepasando los límites de seguridad de tensión aplicada a cada celda. Debido a esto, se opta por el control modo tensión que permite generar hidrogeno de forma controlada y mantener la tensión dentro de los parámetros de seguridad.



---

# CAPÍTULO IV

## DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA Y CONTROL

### 4.1 Requerimiento de la etapa de potencia

Esta tesis está enfocada en el diseño del convertidor electrónico, también denominada etapa de potencia, y el control. Para alimentar y controlar al electrolizador alcalino configurado con siete celdas conectadas en serie.

Con fines experimentales se considera una fuente de alimentación de 24 V CD.

El electrolizador de esta tesis trabaja típicamente en el rango de 14 V a 16 V. En este rango de 2 V de diferencia, se presenta de la producción mínima a la máxima de hidrógeno. Es también en este rango que se espera un consumo de corriente de 0.4 A hasta 13.5 A, dependiendo de la temperatura de operación del electrolizador.

La etapa de potencia debe proporcionar una tensión fija de una fuente de CD (24 V) en un suministro de tensión variable de CD (14 V a 16 V) para el electrolizador. La etapa de potencia debe suministrar la corriente en el rango deseado (0.4 a 13.5 A), también debe tener una respuesta dinámica rápida y mantener una alta eficiencia.

## 4.2 Convertidor reductor

Un convertidor CD-CD [8] convierte los niveles de tensión de una fuente de CD a un nuevo valor de tensión de CD deseado, el cual cambia constante mente su relación de conversión. Un convertidor CD-CD se puede considerar como un transformador usado en corriente alterna (CA) que opera de forma dinámica. Al igual que un transformador, se puede usar para elevar o reducir la tensión de una fuente.

El convertidor CD-CD consiste en un número de elementos de almacenamiento de energía y dispositivos semiconductores que actúan como interruptores. Los elementos están conectados en una topología de tal manera que la acción de conmutación periódica de los interruptores controla la transferencia dinámica de potencia desde la entrada a la salida, para producir una conversión de CD deseada en la salida.

Los elementos de almacenamiento de energía son inductores y capacitores, estos elementos son usados en las dos topologías fundamentales en los convertidores conmutados, las cuales son el convertidor reductor y el convertidor elevador.

En la Figura 4.1 se muestra el circuito esquemático de un convertidor reductor, los elementos que lo componen constan de un interruptor (S), un diodo (D), un inductor (L), un capacitor (C) así como una carga resistiva.

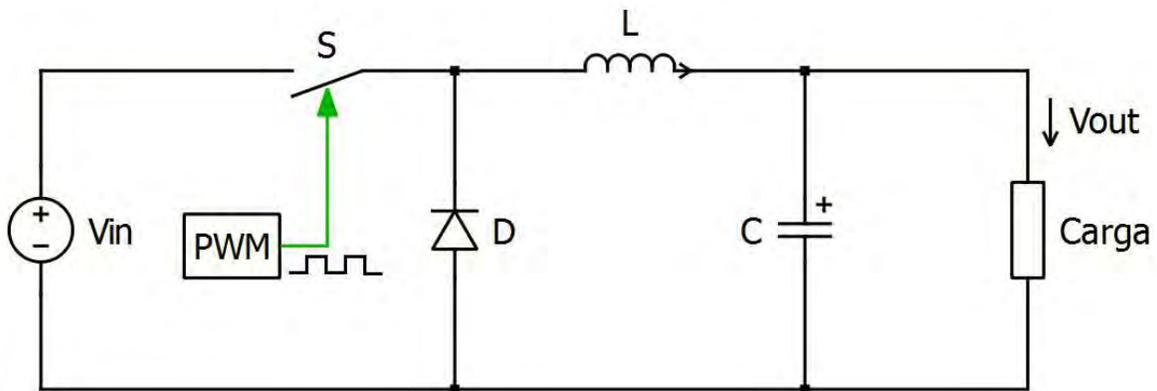


Figura. 4.1 Convertidor reductor.

La tensión promedio a la salida del convertidor ( $V_{out}$ ) que se suministra a la carga es menor a la tensión que ingresa ( $V_{in}$ ) por la fuente.

La relación entre la tensión de entrada y salida está determinada por el ciclo de trabajo que es el tiempo encendido y apagado del interruptor. El interruptor enciende o apaga por la señal de modulación por ancho de pulso PWM (por sus siglas en inglés de pulse-width modulation).

El diodo del convertidor reductor impacta fuertemente en la eficiencia del sistema [7]. El diodo puede ser de unión p-n o diodo Schottky, pero en ambos casos producen una caída de tensión durante su operación y mientras menor sea la tensión requerida en la salida, mayor será la proporción de pérdida de tensión.

Dependiendo de la aplicación del convertidor, las pérdidas en la etapa de rectificación pueden llegar a ser mayores al 50%. Por esta razón surge la necesidad de utilizar un esquema de rectificación síncrona.

### **4.3 Convertidor reductor síncrono**

En un convertidor reductor síncrono [7, 8] se sustituye el diodo por alguno de los dispositivos controlados de menor caída de tensión, a los cuales se les conoce como Rectificadores Síncronos (RS's).

Entre los dispositivos RS's se encuentran los transistores bipolares (BJT) o los transistores de efecto de campo de metal óxido semiconductor (MOSFET).

En esta tesis se optó por el MOSFET porque es ampliamente usado en sistemas de potencia, es un dispositivo controlado por tensión, requieren poca energía de compuerta y tienen una impedancia de entrada muy alta, por lo que solo requiere una pequeña corriente de entrada para hacerlo conmutar a un estado de conducción.

La velocidad de conmutación de un MOSFET está en el orden de nanosegundos, y tiene bajas pérdidas por conmutación.

En la Figura 4.2 se muestra a un convertidor reductor síncrono con dos interruptores, se denomina síncrono porque el encendido y apagado de los interruptores debe estar sincronizados para un correcto funcionamiento.

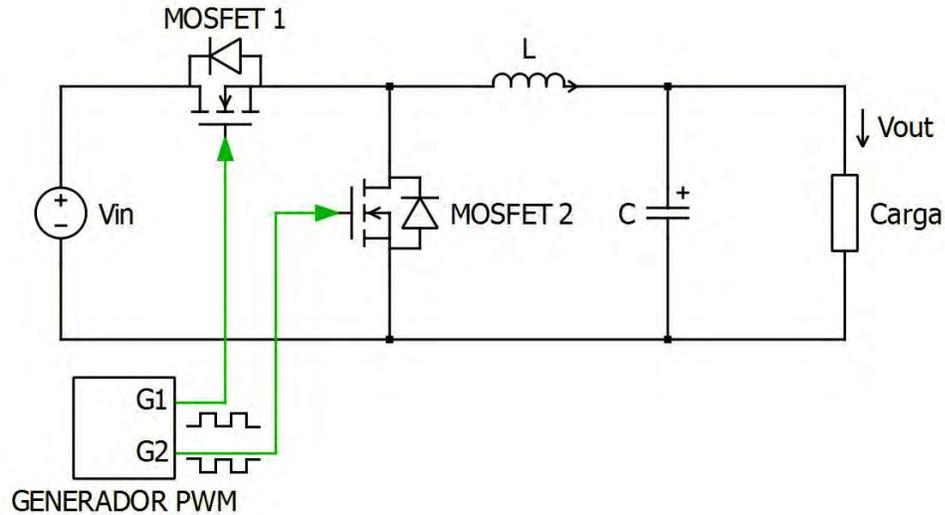


Figura. 4.2 Convertidor reductor síncrono.

En esta relación de sincronía, el ciclo de trabajo del MOSFET 1 es el que determina la relación de tensión en la salida ( $V_{out}$ ), mientras que el ciclo de trabajo del MOSFET 2 es complementario.

En un convertidor reductor al MOSFET 1 (Figura 4.2), se le conoce como interruptor superior o flotado y se caracteriza por no tener referencia con respecto a la fuente de entrada. Al MOSFET 2 se le conoce como interruptor inferior y se caracteriza por estar aterrizado, es decir, tiene como referencia a la terminal negativa de la fuente de entrada.

El generador de PWM se encarga de la sincronía enviando dos señales PWM a las terminales de compuerta de los interruptores (Gate en inglés). En esta tesis se denominan como G1 y G2 a las señales de compuerta que reciben los interruptores (Figura 4.2).

La sincronía permite que mientras uno de los interruptores está encendido (estado de conducción) el otro permanece apagado (estado de no conducción).

De forma ideal el apagado y encendido entre los interruptores es instantáneo, en la realidad se tiene que dejar un tiempo entre el pagado y el encendido para evitar un cortocircuito. Al periodo de no operación se le conoce como tiempo muerto.

#### 4.4 Cálculo de un convertidor reductor síncrono

Para diseñar un convertidor que se adapte a las necesidades de la tesis, se realiza los cálculos de los valores teóricos de los componentes del convertidor reductor.

El conjunto de ecuaciones de (4.1) a la (4.4) [7, 8, 9] son una metodología para calcular los componentes de un convertidor reductor y que dependen de los parámetros de operación (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Parámetros de operación del convertidor.

$V_{in}$	24 V	Rizo de corriente	5%
$V_{out}$	16 V	Rizo de tensión	1%
$I_{out}$	14 A	Frecuencia de operación (f)	100 kHz

Con los parámetros de operación  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  y  $I_{out}$  se calcula directamente el ciclo de trabajo ( $K$ ) y el componente resistivo que representa al electrolizador en las condiciones antes mencionadas.

$$\text{Ciclo de trabajo} \quad K = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.1)$$

$$\text{Resistencia equivalente de carga} \quad R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (4.2)$$

El siguiente componente a calcular es el inductor, que depende de la frecuencia de operación ( $f$ ), del rizo de corriente  $\Delta I = I_{out} * (\text{Rizo de corriente}/100)$  y de otros valores disponibles ( $K$ ,  $V_{out}$ ).

$$\text{Cálculo del Inductor} \quad L = \frac{V_{out} * K * (1 - K)}{f * \Delta I} \quad (4.3)$$

Por último se calcula el capacitor, que es dependiente del valor del inductor ( $L$ ) y del rizo de tensión  $\Delta V = V_{out} * (\text{Rizo de tensión}/100)$ .

$$\text{Cálculo del capacitor} \quad C = \frac{V_{out} * K * (1 - K)}{8 * L * f^2 * \Delta V} \quad (4.4)$$

Los resultados de los cálculos teóricos se muestran en la Tabla 4.2

*Tabla 4.2 Resultados de los cálculos teóricos de los componentes.*

Ciclo de trabajo	66.66%	Cálculo del Inductor	5.0794E-05 H
Resistencia equivalente de carga	1.1428 $\Omega$	Cálculo del capacitor	5.4688E-06 F

Los elementos del convertidor reductor se han dimensionado para una máxima potencia de 224 W, que corresponde al punto máximo de operación del electrolizador.

Con base en los cálculos de la Tabla 4.2, se seleccionaron los componentes que conforman al convertidor reductor. En la Tabla 4.3 se muestran los componentes seleccionados y sus características principales.

*Tabla 4.3 Componentes seleccionados y características principales.*

Componente	Modelo	Fabricante	Características
Inductor	60B683C	MURATA	68 $\mu$ H, 9 A y 17 m $\Omega$
MOSFET	IRFIZ44NPBF	INTERNATIONAL RECTIFIER	55 V, 31 A y 24 m $\Omega$
Capacitor	50ZLH1000	RUBYCON	50 V, 1000 $\mu$ F y 20 m $\Omega$

El capacitor seleccionado cumple las características calculadas pero a fin de reducir el rizado en la tensión de salida,  $V_{out}$ , se decide colocar 4 capacitores en paralelo del mismo modelo, con una capacitancia total de 4000  $\mu$ F. La conexión en paralelo de los capacitores permite reducir su resistencia interna parasita equivalente a 5 m $\Omega$ .

La corriente máxima que puede proporcionar el convertidor (9 A) está limitado por la corriente máxima que permite el inductor. Debido a la frecuencia de operación de 100 kHz, se reduce la gama de inductores disponibles a seleccionar. Para tener una operación estable se dio prioridad a la inductancia (68  $\mu$ H), con un valor similar al calculado, y a una baja resistencia interna (17 m $\Omega$ ).

#### 4.5 Diseño de la etapa de control del convertidor reductor

El convertidor reductor debe convertir una tensión fija de una fuente de CD (24 V) en un suministro de tensión variable de CD (14 V a 16 V) para el electrolizador y debe tener una respuesta dinámica acorde al comportamiento dinámico del electrolizador.

Debido a los rangos de operación así como los parámetros de seguridad requeridos, se desarrolló un control modo tensión para el convertidor, también conocido como modo voltaje. El controlador determina el valor del ciclo de trabajo para mantener regulada la tensión de salida deseada.

Para determinar las características del controlador apropiado para el convertidor, se requiere calcular los polos y ceros que rigen la función de transferencia del convertidor (ecuaciones 4.5 y 4.6).

En el diseño del convertidor se considera la influencia de la resistencia parásita del capacitor de salida por lo que la función de transferencia del convertidor presenta un doble polo. La frecuencia del doble polo (polo de segundo orden) queda determinada por la ecuación (4.5) [9].

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

La frecuencia del cero (del semiplano izquierdo) queda determinada por la ecuación (4.6) [9] donde  $R_C$  es la resistencia parásita interna equivalente de los capacitores (5 mΩ).

$$f_z = \frac{1}{2\pi CR_C} \quad (4.6)$$

La ganancia del modulador PWM se determina por la ecuación (4.7) [7] donde  $V_{rampa}$  es la tensión (3 V) de la señal triangular (rampa) que ingresa al modulador de PWM.

$$G_{modulador} = 20 \log \left( \frac{1}{V_{rampa}} \right) \quad (4.7)$$

Para determinar la ganancia (dB) así como el cambio de fase, se realiza una simulación en el programa PLECS.

Usando las herramientas de análisis se obtiene los datos de la respuesta en frecuencia del convertidor reductor a lazo abierto, como se muestra en la Figura 4.3.

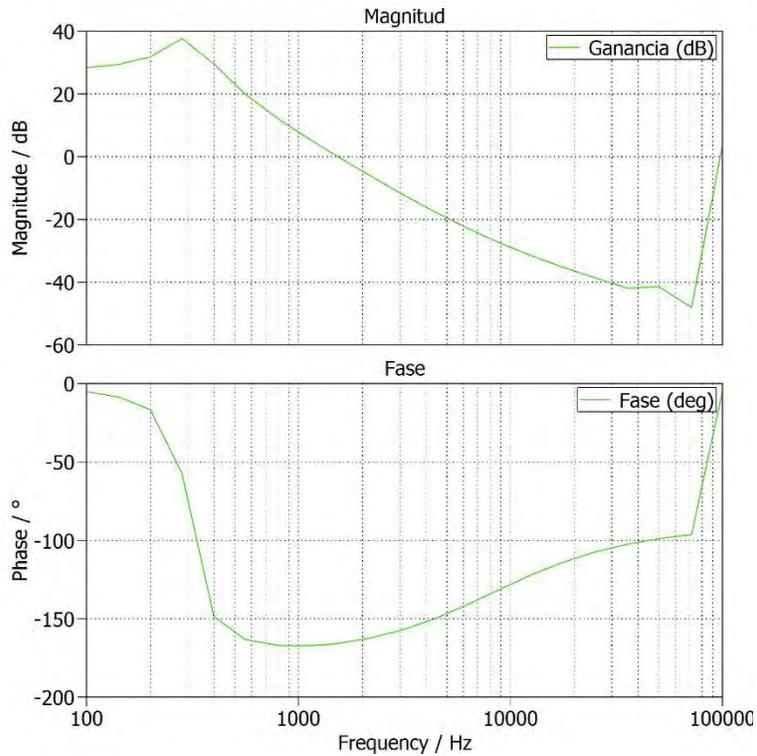


Figura. 4.3 Respuesta en frecuencia del convertidor reductor a lazo abierto.

Analizando los datos de la Figura 4.3, se confirma que los resultados obtenidos de las ecuaciones (4.5) y (4.6) ( $f_p = 307$  Hz y  $f_z = 7957.74$  Hz) están respaldados por los datos obtenidos por simulación.

Como se requiere una respuesta dinámica rápida del sistema y se desea evitar la amplificación del ruido de alta frecuencia, el ancho de banda del controlador deberá ser de aproximadamente un quinto de la frecuencia de operación del convertidor reductor ( $100$  kHz/5), es decir que el ancho de banda es de  $20$  kHz.

El análisis de fase del convertidor reductor en el programa PLECS indica que el margen de fase es menor de  $-162.2^\circ$ . Con este valor existe riesgo de que la fase llegue a los  $-180^\circ$ , de ocurrir esto la señal negativa de compensación cambiara a una señal positiva y esto provocará que el sistema se vuelva inestable.

Para asegurarse de evitar la condición de inestabilidad, el controlador del sistema debe tener un margen de fase de 40 a 60°, por lo que se desea que la fase este alrededor de -120°.

El control analógico consiste en una red de compensación PI (Proporcional Integrador). La Figura 4.4 muestra el circuito analógico de la etapa de control [9].

La función de transferencia del control PI contiene dos polos y un cero. El circuito analógico del control PI consiste en un arreglo de dos capacitores y dos resistencias conectados a un amplificador de error en configuración inversora.

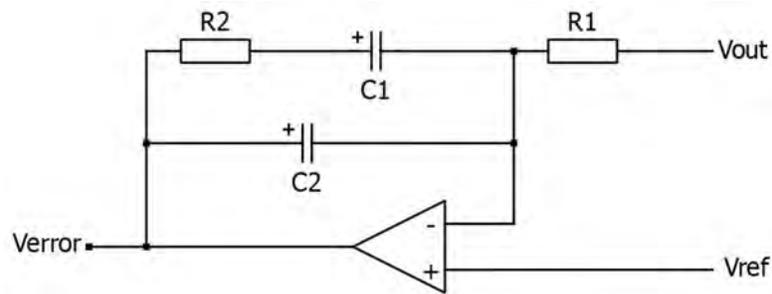


Figura. 4.4 Red de compensación PI con dos polos y un cero.

Al controlador ingresan la tensión de salida del convertidor ( $V_{out}$ ) y se compara con una tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) que es una muestra de la tensión deseada a la salida del convertidor. Como resultado de la operación del control PI se tiene una tensión, denominada tensión de error ( $V_{error}$ ) que posteriormente se usa para compensar la diferencia entre la tensión de salida ( $V_{out}$ ) y la tensión de referencia deseada ( $V_{ref}$ ).

La ubicación de los polos del controlador, uno está en el origen y el otro se determina mediante la ecuación (4.8) [9]. El cero del controlador PI se calcula con la ecuación (4.9) [9].

$$f_{pcomp} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (4.8)$$

$$f_{zcomp} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (4.9)$$

Tras despejar las ecuaciones (4.11) y (4.12) se calculan los valores de todos los componentes. Los valores obtenidos de los componentes se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4. 4 Valores de los componentes del controlador PI.

R1	1,874.47 $\Omega$	C1	1.06E-8 F
R2	100 k $\Omega$	C2	3.18E-12 F

#### 4.6 Simulación de convertidor reductor y control PI

Para validar el dimensionamiento del convertidor reductor se realizó la simulación del convertidor reductor con control modo tensión en el programa PLECS. La simulación incluye al convertidor reductor con los valores de los componentes previamente calculados en la Tabla 4.3, el control con los valores calculados del PI (Tabla 4.4), la tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) y una carga resistiva.

En la Figura 4.5 muestra el circuito del convertidor reductor con los componentes involucrados en la simulación.

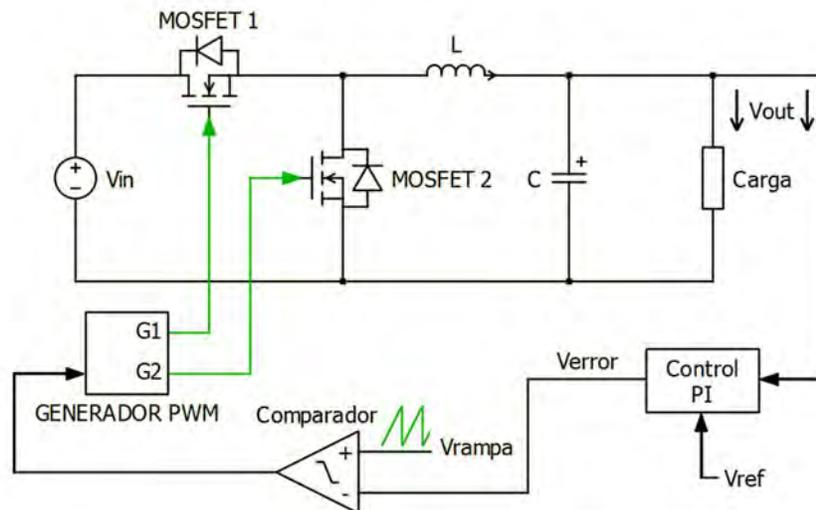


Figura. 4.5 Circuito del convertidor reductor, control PI modo tensión y generador de PWM.

En la simulación se incluye el comportamiento resistivo del electrolizador (Figuras 3.14) con una tensión constante de 16 V en tres puntos de operación con un consumo de 4.81 A, 6.9 A y 13.11 A.

El valor inicial de la resistencia equivalente del electrolizador es de 3.31  $\Omega$ , trascurrido el primer segundo de simulación, la resistencia cambia a 2.30  $\Omega$ . Después de

trascurrido otro segundo la resistencia cambia de  $2.30 \Omega$  a  $1.18 \Omega$ . Son tres segundos en total de simulación.

En la Figura 4.6 se observa el cambio de la corriente en 4.6 a) y el cambio en la tensión en 4.6 b).

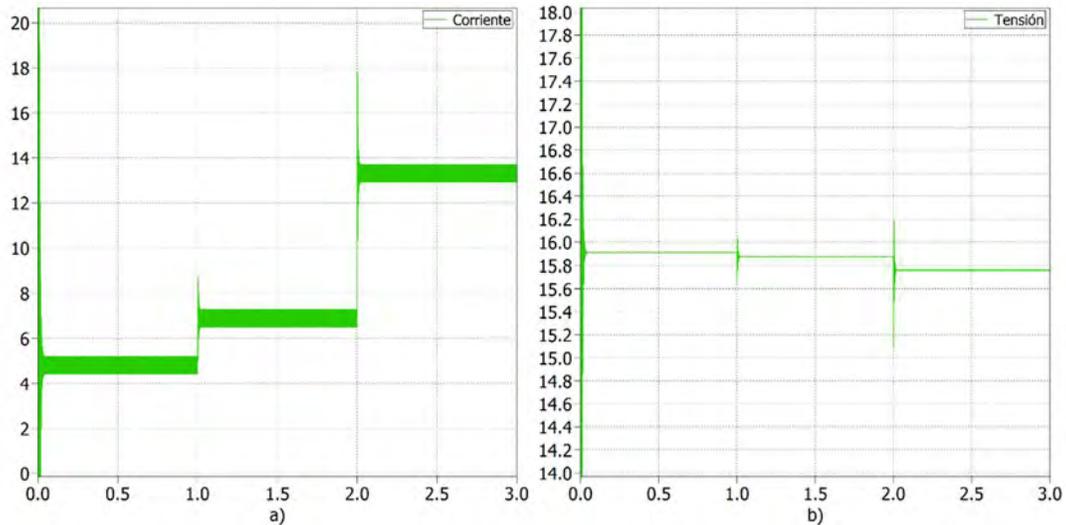


Figura. 4.6 Cambio de corriente a) y tensión b) en tres puntos de operación.

Como se observa en la figura 4.6, el cambio en los tres puntos de operación no es gradual, lo que provoca escalones de corriente.

El primer punto corresponde a la corriente promedio (4.81 A). El segundo punto (6.9 A), corresponde a aproximación el 50% del consumo total del sistema. El tercer punto (13.11 A) corresponde al máximo consumo de corriente observado en uno de los experimentos de caracterización. Los datos recopilados durante la simulación, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Datos de simulación de escalones de corriente.

Escalón de corriente	1	2	3
Resistencia equivalente $\Omega$	3.31	2.30	1.18
Tensión promedio (V)	15.91	15.87	15.76
Corriente promedio (A)	4.81	6.90	13.11
Potencia promedio (W)	76.52	109.5	206.60

El cambio drástico en el consumo de corriente se ve reflejado en la tensión. Al momento de ocurrir el escalón de corriente el control reacciona para recuperarse del cambio y mantener estable la tensión.

En la Figura 4.7 se observa el tiempo de recuperación del segundo escalón de corriente 4.7 a) y la recuperación de la tensión 4.7 b). Al sistema de control le toma 30 ms en estabilizar la tensión. La tensión promedio (15.87 V) tiene un error de 0.81% con respecto al  $V_{ref}$  (16 V).

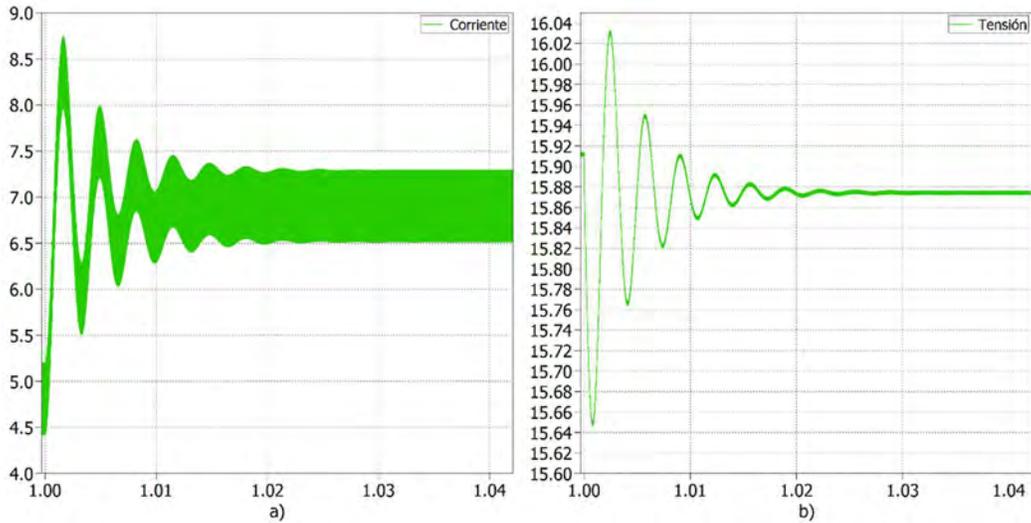


Figura. 4.7 Tiempo de recuperación del segundo escalón de corriente a) y tensión b).

En la Figura 4.8 b) se observa que al control le toma 20 ms en estabilizar la tensión del tercer escalón de corriente. La tensión promedio (15.76 V) tiene un error de 1.5% con respecto a  $V_{ref}$  (16 V).

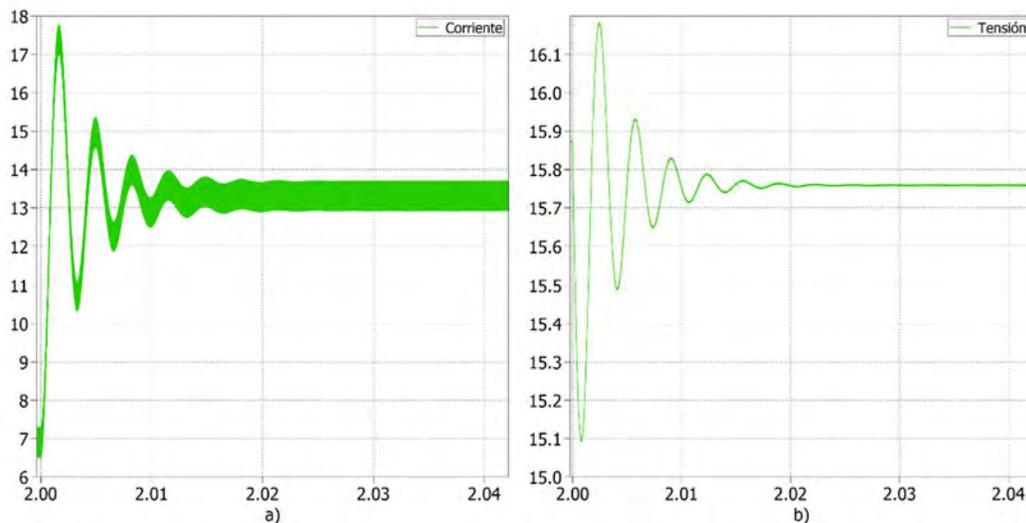


Figura. 4.8 Tiempo de recuperación del tercer escalón de corriente a) y tensión b).

#### 4.7 Construcción de convertidor reductor y control PI

Los cálculos, las simulaciones y las experimentaciones realizadas en esta tesis, proporcionan la base para la construcción del control y el convertidor reductor.

Para la construcción del convertidor reductor y del circuito de control PI, se utilizó el circuito de la figura 4.9.

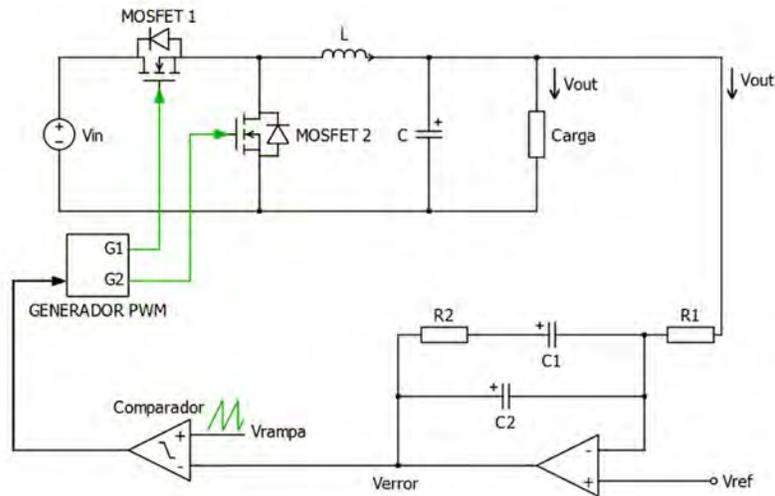


Figura. 4.9 Esquema de convertidor reductor, control PI y generador de PWM.

El controlador PI consiste en un arreglo de dos capacitores y dos resistencias conectados a un Op-Amp modelo TL081CP [18]. El esquema del controlador PI se presenta en la Figura 4.10

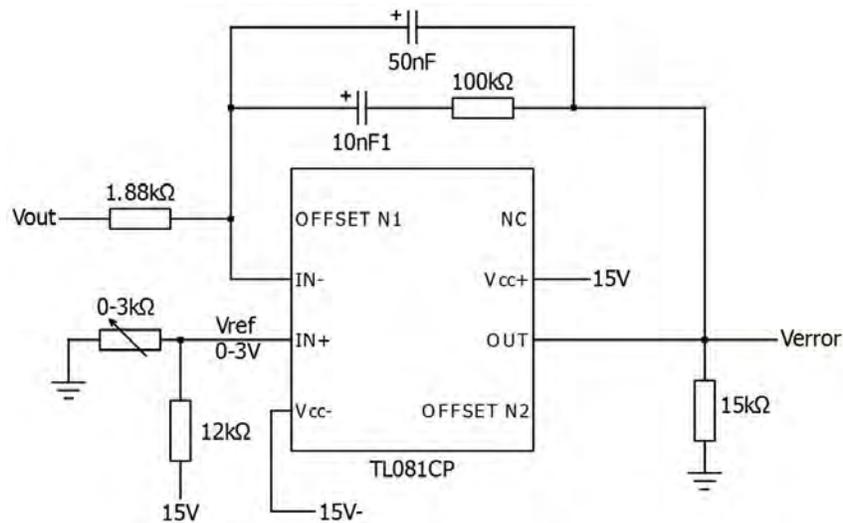


Figura. 4.10 Control PI con Op-Amp TL081CP.

La construcción del generador PWM inicia con el circuito integrado TL494 [19]. El TL494 se utilizó únicamente para tener una señal triangular de 3 V ( $V_{rampa}$ ), como se observa en la Figura 4.11 a). La frecuencia de la señal  $V_{rampa}$  se configuró para una frecuencia de 100 kHz.

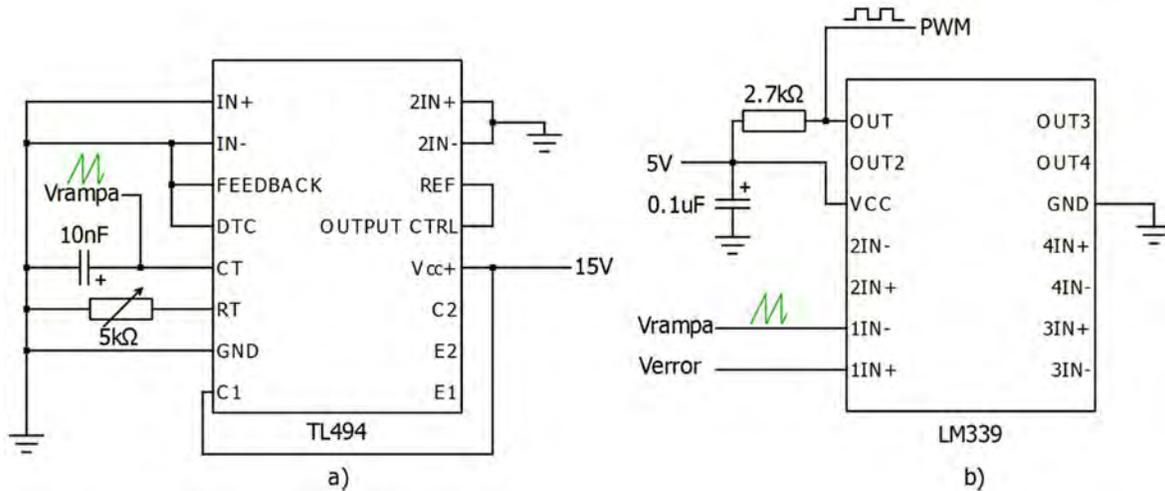


Figura. 4.11 Conexiones de componentes TL494 a) y LM339 b).

Como siguiente paso se tiene a un comparador modelo LM339 [20], Figura 4.11 b). La función de este circuito integrado es la de comparar la señal  $V_{rampa}$ , generada por el TL494 con la señal de  $V_{error}$  que proviene del Op-Amp TL081CP.

El resultado de la comparación es una señal PWM para controlar el ciclo de trabajo del MOSFET 1.

Para generar señales de disparo para los dos MOSFETs se utilizó el driver IR21844 [21] (Figura 4.12). El IR21844 se encarga de generar dos señales PWM síncronas partiendo de una sola señal PWM. El driver IR21844 se configuró para tener el menor tiempo muerto posible ( $4\mu\text{s}$ ).

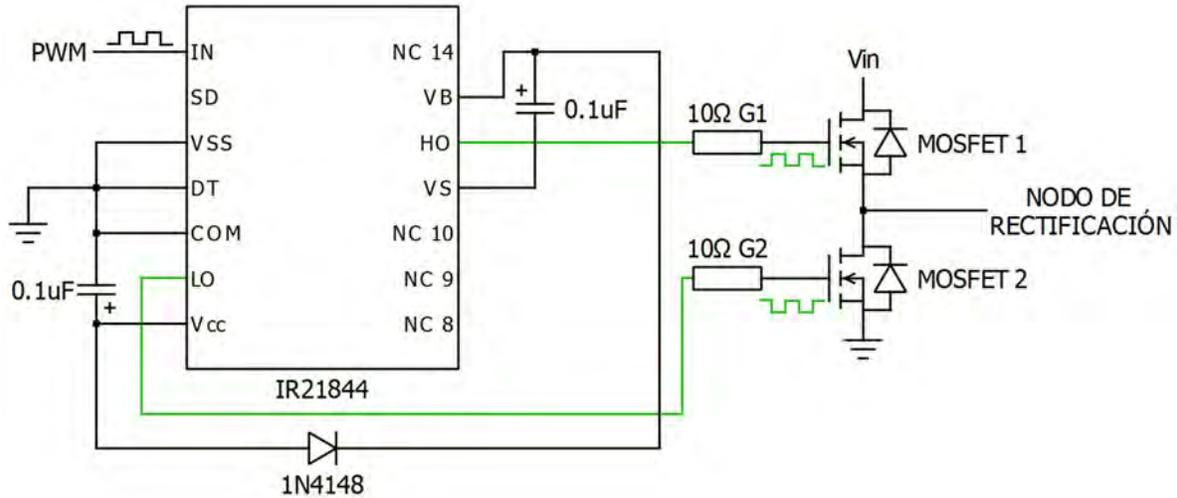


Figura. 4.12 Conexiones de driver IR21844.

La retroalimentación al controlador se realizó midiendo la tensión de salida del convertidor reductor mediante la señal acondicionada con un divisor resistivo.

La señal de tensión de retroalimentación aplicada al Op-Amp TL081CP es de  $V_{\text{out}}/8$ , con este valor el cambio en la señal provoca que la señal  $V_{\text{error}}$  se encuentre en un rango de 0 V a 3 V. El acondicionamiento se hace para mantener la proporción entre las señales a comparar con el LM339 (Figura 4.11 b)).

La proporción entre las señales está determinada por la magnitud de la señal triangular generada por el TL494. Con  $V_{\text{rampa}}$  de 3 V y la tensión de salida del convertidor reductor con una tensión máxima teórica de 24 V, la relación entre ambas tensiones es de 8 a 1. Esta misma proporción se usa en la tensión de referencia por lo que  $V_{\text{ref}}$  es de 0 V a 3 V.

Los componentes seleccionados para el control y el convertidor, así como sus circuitos de conexión son usados para la construcción de la tarjeta de potencia se muestran en la Figura 4.13.

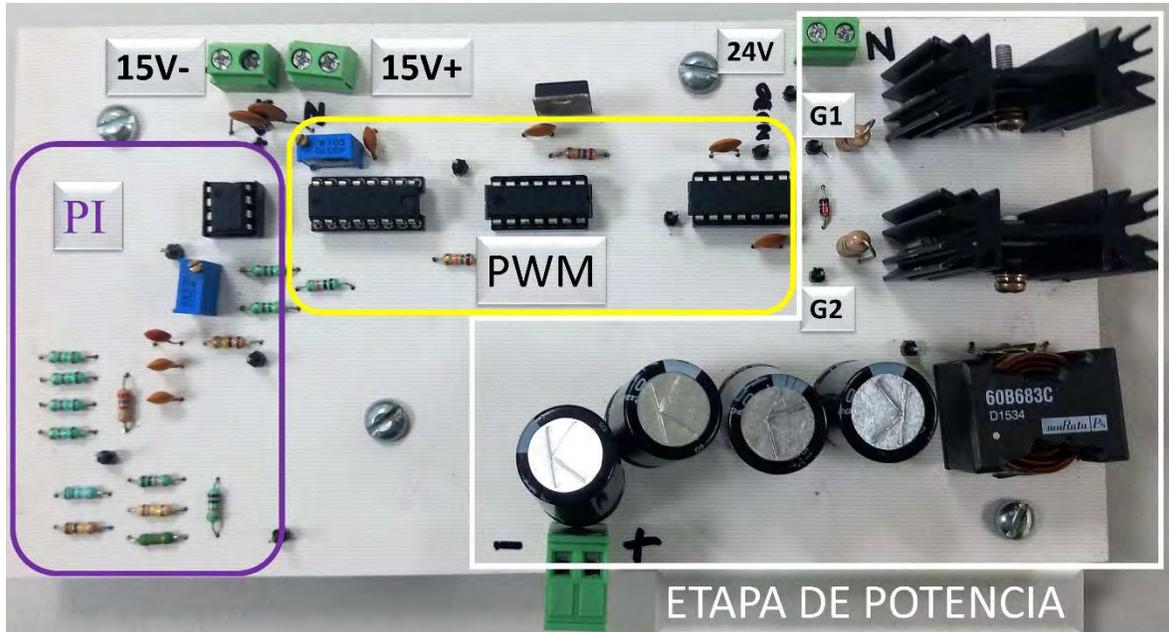


Figura. 4.13 Control (PI), el PWM y al convertidor reductor.

La tarjeta de potencia comprende el control PI, el generador de PWM y el convertidor reductor.

### **Conclusiones**

En este capítulo se diseñó y construyó un convertidor reductor síncrono y el control, para alimentar y controlar el electrolizador caracterizado en esta tesis.

Para respaldar los cálculos del convertidor reductor y de control, se realizó la simulación en el programa PLECS. La simulación respaldó los cálculos teóricos.

Con base en los cálculos y simulaciones se hacen los esquemas de conexiones de los componentes analógicos del sistema de control, el generador de PWM y la etapa de potencia.

La señal portadora generada por el TL494 es la que regula la frecuencia de operación del control, generador PWM y del convertidor reductor.

El acondicionamiento de la tensión de salida es esencial para mantener la proporción entre las señales y el control del sistema.



---

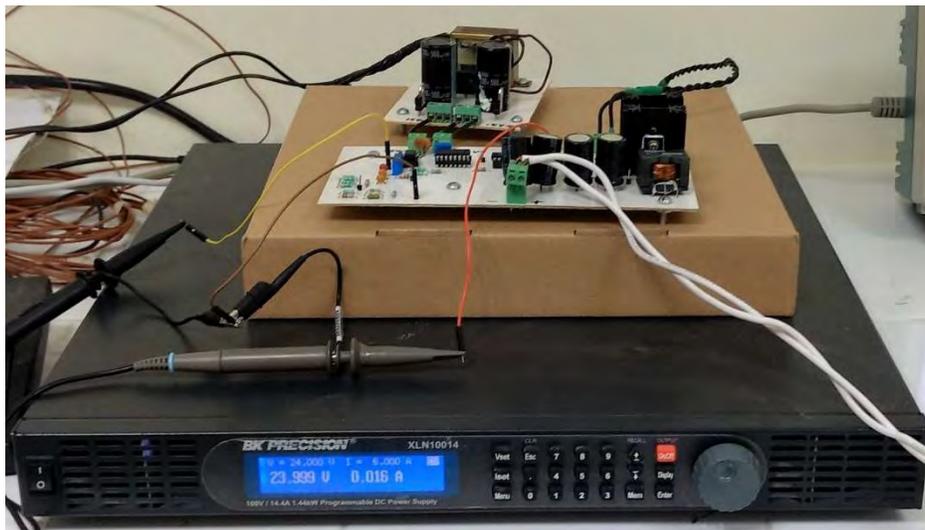
# CAPÍTULO V

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1 Introducción

Para las pruebas en esta tesis, el convertidor reductor y el electrolizador, se determinaron tres puntos de operación para la generación de oxihidrógeno (mezcla de dos volúmenes de hidrógeno por un volumen de oxígeno generados en un electrolizador alcalino), que van desde una tensión de 14 hasta 16 V. Los puntos de operación fueron determinados con los datos de la caracterización del electrolizador alcalino de siete celdas.

Se utilizaron dos fuentes para la alimentación del sistema, una fuente simétrica y una fuente conmutada. La fuente simétrica proporciona una tensión de CD de 15 V+ y 15 V- que alimenta a los componentes analógicos del control. La fuente conmutada (BK PRECISION XLN10014) [16] proporciona una tensión CD de 24 V que alimenta al convertidor reductor.



*Figura. 5.1 Sistema de control, etapa de potencia y fuente de alimentación.*

Las mediciones de los experimentos, se realizaron mediante dos osciloscopios Tektronix modelo TDS1001B [22], una punta de corriente Tektronix modelo TCPA300 de alta frecuencia (10MHz) (Figura 5.2) y un multímetro FLUKE modelo 179[23].

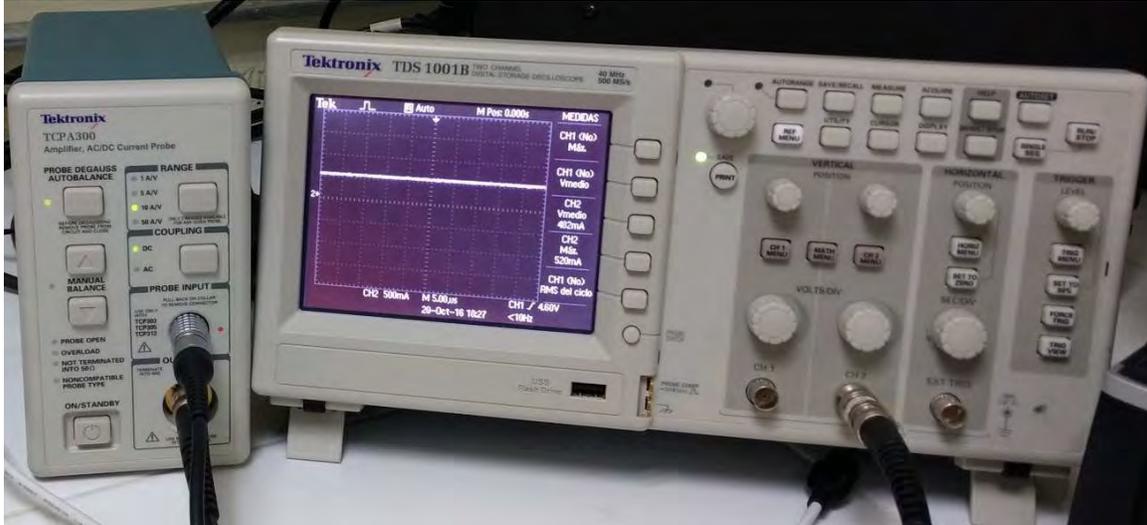


Figura. 5.2 Osciloscopio y sensor de corriente.

El osciloscopio (TDS1001B) que se muestra en la Figura 5.3 realiza la medición de la tensión se referencia y el PWM generado por el comparador LM339.

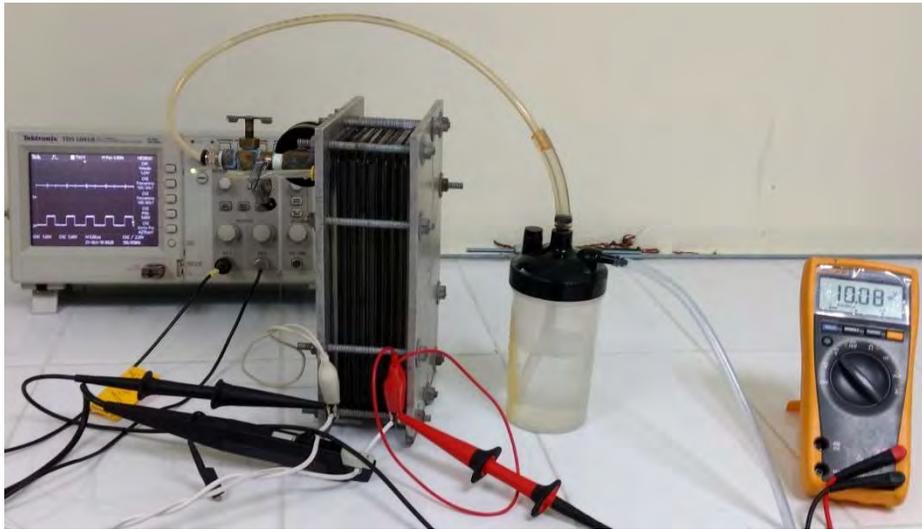


Figura. 5.3 Electrolizador, osciloscopio y multímetro.

## 5.2 Pruebas en puntos de operación

Los tres puntos de operación del electrolizador seleccionados corresponden aproximadamente al 12%, 47% y 100% de la corriente total consumida. Las pruebas en los puntos de operación fueron de aproximadamente 5 minutos.

La señal  $V_{ref}$  puede variarse en el rango de 0 hasta 3 V, este rango es proporcional a 1/8 del rango de operación teórico del convertidor reductor (0 hasta 24 V). Por esta razón, la proporción de los tres puntos de operación es  $V_{ref} = (14V/8) = 1.75$  V,  $V_{ref} = (15V/8) = 1.87$  V y  $V_{ref} = (16V/8) = 2$  V.

La señal  $V_{ref}$  es enviada por un divisor resistivo, durante las pruebas para obtener los tres puntos de operación deseados, la señal  $V_{ref}$  fue de 1.74, 1.88 y 2.03 V, el error en  $V_{ref}$  es del 1% o menor.

La Figura 5.4 en el canal 2 (CH2) muestra la corriente en la carga (electrolizador) de 3.62 A promedio durante la prueba del punto de operación a 16 V. No se observa ruido o perturbaciones significativas en la señal medida de la corriente.

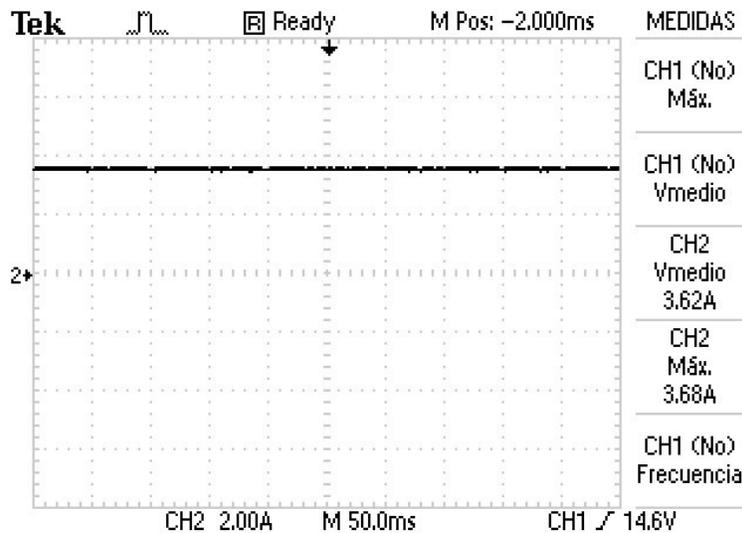


Figura. 5.4 Señal de corriente en el electrolizador alcalino de 7 celdas.

La Figura 5.5 muestra en el canal 1 la señal  $V_{ref}$  de 2.03 V y en el canal 2 (CH2) la señal PWM generada por el comparador LM339.

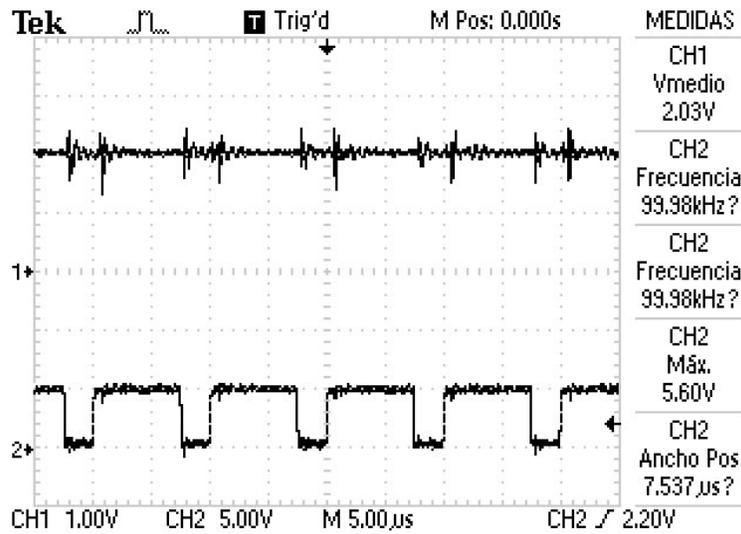


Figura. 5.5 Punto de operación a 16 V, CH1  $V_{ref}$ , CH2 PWM a MOSFET 1.

En la Figura 5.5 se observa que la señal  $V_{ref}$  presenta ruido en los puntos de conmutación de la señal PWM.

La Tabla 5.1 muestra los datos de tensión, corriente, potencia y eficiencia del convertidor reductor de las pruebas a 14, 15 y 16 V.

Tabla 5.1 Tensión, corriente y potencia promedio en prueba a 14, 15 y 16 V.

Equipo	Tensión promedio (V)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)	Eficiencia $\eta$ (%)
Fuente (XLN10014)	24	0.221	5.304	
Convertidor reductor	14.01	0.34	4.763	89.80
Fuente (XLN10014)	24	0.958	22.992	
Convertidor reductor	15.01	1.43	21.464	93.35
Fuente (XLN10014)	24	2.626	63.024	
Convertidor reductor	16.03	3.62	58.028	92.07

Estos datos de tensión y corriente, son muy similares a los datos obtenidos durante la prueba escalón de 5 minutos (Figura 3.12), en la caracterización del electrolizador en el capítulo III.

### 5.3 Eficiencia del convertidor reductor

La corriente de 3.62 A (Tabla 5.1), consumida por el electrolizador durante la prueba a 16 V, es menor a los 13.5 A que el electrolizador es capaz de consumir en el momento de mayor producción de hidrógeno (Figura 3.15).

Para determinar la eficiencia de conversión de la etapa de potencia. Se realizan mediciones de la potencia entregada por la fuente XLN10014 y la potencia entregada por el convertidor reductor.

La fuente mantendrá una tensión constante de 24 V, mientras que el convertidor reductor mantendrá una operación continua a 16 V. Esta prueba de operación continua, mantendrá operando el electrolizador hasta llegar al límite de corriente de 9 A que permite el inductor antes de entrar en saturación.

Como se observa en la Figura 5.6, la corriente demandada por el electrolizador fue aumentando gradualmente hasta llegar al valor máximo de corriente especificado.

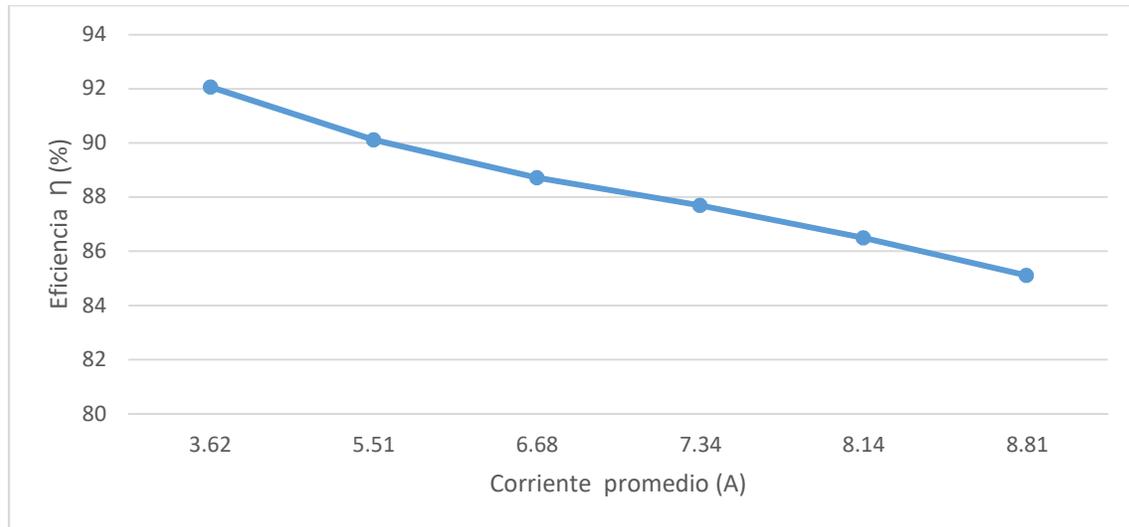


Figura. 5.6 Corriente promedio Vs Eficiencia  $\eta$  (%), operación continua a 16 V.

La prueba inicio con un consumo de corriente de 3.62 A y una eficiencia de conversión del 92%. La prueba termina con un consumo de corriente de 8.81 A y una eficiencia de 85%.

## 5.4 Respuesta dinámica

La respuesta dinámica del sistema depende de la interacción del electrolizador, al etapa de control y el convertidor reductor. El análisis de un solo componente de forma aislada no indica la dinámica de todos los componentes trabajando juntos a lazo cerrado.

Las pruebas de los puntos de operación y operación continua, proporcionan información del comportamiento del sistema, en un rango de operación establecido. Estas pruebas no son dinámicas y no llevan al límite de operación a todos los componentes a lazo cerrado.

Para identificar el comportamiento del sistema a lazo cerrado así como sus límites de operación es necesario someterlo a pruebas que lo estresen hasta el punto de fallo.

La primera prueba es para identificar la máxima frecuencia de respuesta del sistema, ante cambios en el punto de operación a lazo cerrado. En esta prueba la señal  $V_{ref}$  tiene forma cuadrada para tener un escalón repetitivo entre puntos de operación, la prueba se denomina “ $V_{ref}$  cuadrada”.

El control sigue la señal  $V_{ref}$ , cambiando el punto de operación de 13 a 16 V y de 16 a 13 V. El cambio en el punto de operación provoca que el consumo de corriente y la producción de hidrógeno del electrolizador cambien de 0% al 100% y del 100% al 0%.

Para realizar esta prueba se incrementa gradualmente la frecuencia de  $V_{ref}$ , aumentando el estrés de los componentes del convertidor y el control hasta el punto de fallo. Cabe destacar que la frecuencia de operación del sistema de 100 kHz no se altera.

Para la prueba  $V_{ref}$  cuadrada, la tensión de referencia es el resultado de la suma de una tensión constante y una señal cuadrada del generador de funciones BK PRECISION modelo 4011A.

La suma de las señales se realiza mediante un sumador no inversor con un Op-Amp TL081. Las limitaciones de los equipos permitieron manejar los puntos de operación de 12.6 a 15.7 V y de 15.7 a 12.6 V en la prueba  $V_{ref}$  cuadrada.

Las mediciones de tensión y corriente que se suministran al electrolizador se realizan con un osciloscopio (TDS1001B) y una punta de corriente (TCPA300). Los componentes para generar  $V_{ref}$  (cuadrada) y los instrumentos de medición se muestran en la Figura 5.7.

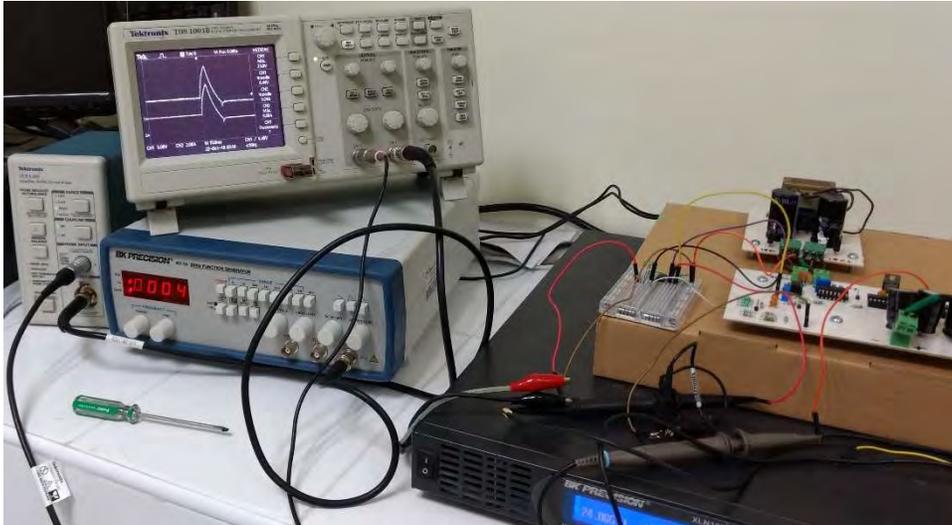


Figura. 5.7 Osciloscopio (TDS1001B), punta de corriente (TCPA300), generador de funciones (4011A) y sumador no inversor (TL081).

La Figura 5.8 muestra la tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2) de la prueba  $V_{ref}$  cuadrada.

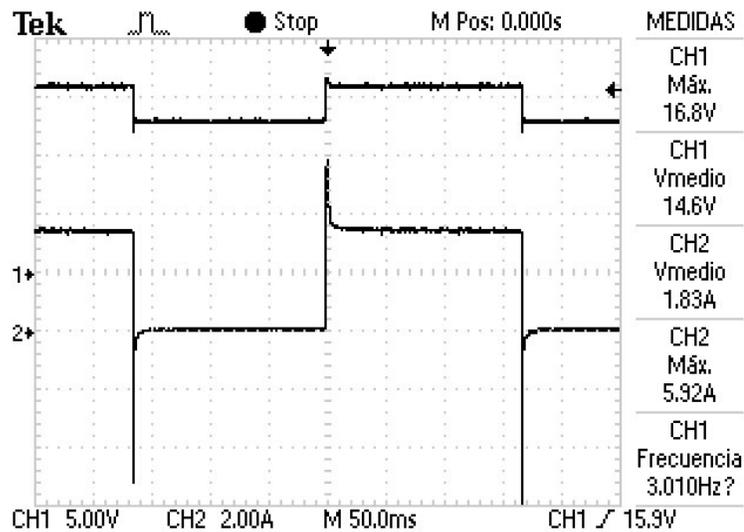


Figura. 5.8 Prueba  $V_{ref}$  cuadrada, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).

Como se observa en CH1 de la Figura 5.8, la máxima frecuencia de respuesta del sistema, ante cambios en el punto de operación a lazo cerrado, es de 3 Hz. Con  $V_{ref}$  a

frecuencias mayores de 3 Hz, se provocan la pérdida del seguimiento del punto de operación del control del sistema.

La corriente en la carga (CH2) es de 3.44 A, cuando la tensión de salida permanece estable a los 15.7 V. Al momento del cambio en el punto de operación, se observan picos positivos y negativos que oscilan entre 5.6 y 5.92 A.

En la Figura 5.9 se muestra la medición del tiempo en que la tensión de salida alcanza su valor de estado estable, en la prueba  $V_{ref}$  cuadrada.

La Figura 5.9 permite ver que el tiempo de establecimiento del sistema es de 3.84 ms. En la tensión de salida, se observa un rizado de tensión de 0.4 V. Otras mediciones realizadas durante la prueba, indican que no hay retraso en la corriente ante los cambios de tensión.

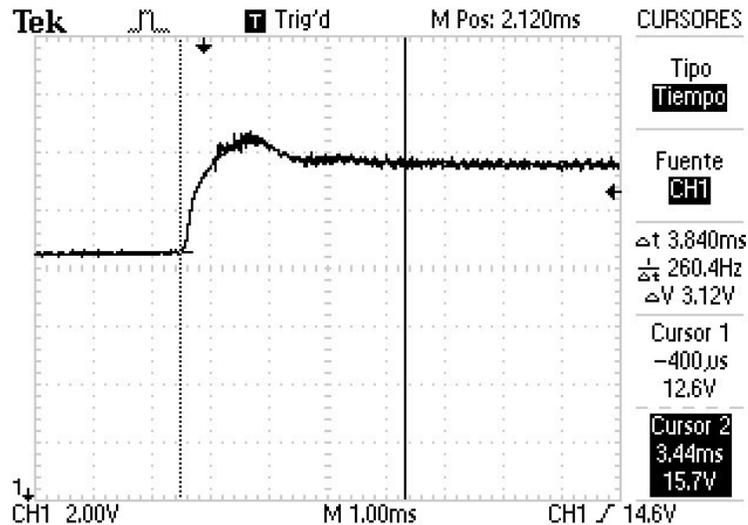


Figura. 5.9 Tiempo de establecimiento en la tensión de salida de la prueba  $V_{ref}$  cuadrada, de 12.6 a 15.7 V.

Una segunda prueba se realizó para identificar la máxima frecuencia de respuesta del sistema ante cambios en el punto de operación a lazo cerrado.

En esta segunda prueba se usa una  $V_{ref}$  triangular para incrementar y decrementar de forma gradual la tensión de salida, la prueba se denomina " $V_{ref}$  triangular". El punto de operación cambiara de forma gradual de 13.1 a 16.1 V y de 16.1 a 13.1 V.

Se incrementa gradualmente la frecuencia de  $V_{ref}$ , para incrementar el estrés de los componentes del convertidor y el controlador PI hasta el punto de fallo.

La Figura 5.10 muestra la tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2) de la prueba  $V_{ref}$  triangular.

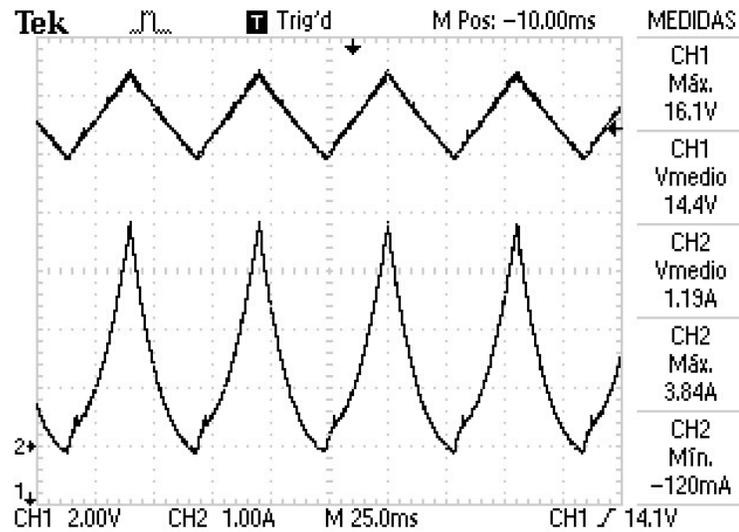


Figura. 5.10 Prueba  $V_{ref}$  triangular, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).

En la Figura 5.10 se observa la tensión de salida triangular de 13.1 a 16.1 V y de 16.1 a 13.1 (CH1), que se suministra al electrolizador. No se observa retraso en la corriente en la carga (CH2), pero se mide una corriente pico negativa de -120 mA. Con  $V_{ref}$  a 18 Hz el control responde de forma dinámica, manteniendo estable la operación del sistema.

En la Figura 5.10 se presenta el comportamiento de la tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2) al incrementar a 50Hz la frecuencia de  $V_{ref}$ .

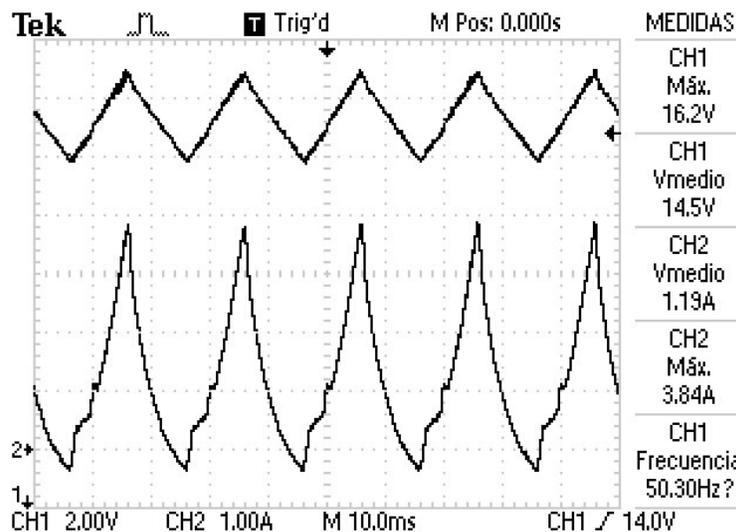


Figura. 5.11 Prueba  $V_{ref}$  triangular a 50 Hz, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).

A 50Hz el sistema sigue funcionando sin perder el control. La forma de crecimiento de corriente es muy similar a la observada a 18 Hz, pero presenta deformaciones. El pico de la corriente negativa es de -400 mA. Una diferencia de -280 mA con respecto al comportamiento de la corriente a 18 Hz.

En la Figura 5.12 se presenta el comportamiento de la tensión en la salida (CH1) y corriente (CH2) al incrementar a 101Hz la frecuencia de  $V_{ref}$ .

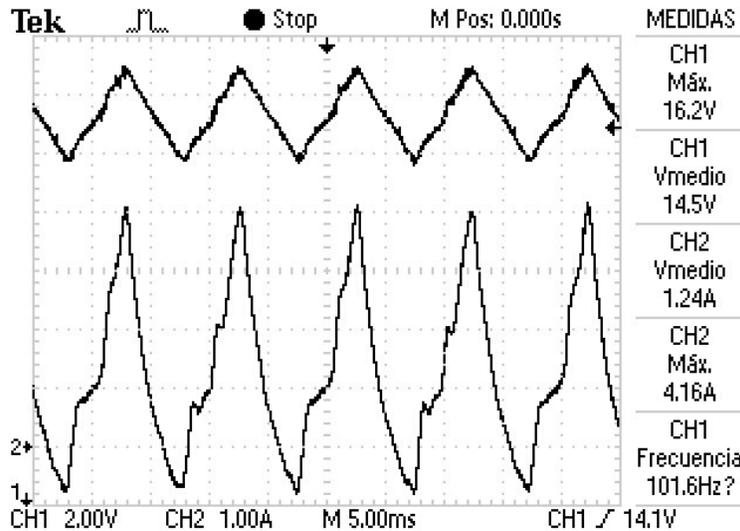


Figura. 5.12 Prueba  $V_{ref}$  triangular a 101 Hz, tensión de salida (CH1) y corriente en la carga (CH2).

En la Figura 5.12 se observa que tensión de salida se incrementa a una frecuencia de 101 Hz, el sistema mantiene el control. La tensión presenta ruido y la corriente tiene una pendiente de crecimiento no uniforme.

La corriente presenta picos de crecimiento desiguales. La corriente máxima alcanzar 4.16 A y se observa un pico de corriente de -0.8 A en la pendiente de caída.

Se continúa incrementado la frecuencia de  $V_{ref}$  de forma gradual, el sistema pierde el control a 235 Hz. La máxima frecuencia de respuesta del sistema es de 235 Hz.

## Conclusiones

En este capítulo, con base en la caracterización del electrolizador, se realizaron pruebas para determinar el comportamiento del sistema a lazo cerrado. Se realizaron pruebas a tensión constante en tres puntos de operación 14, 15 y 16 V. El control mantiene la tensión deseada y el convertidor tiene una alta eficiencia que oscila entre 90 y el 93%.

En las pruebas a tensión constante la señal  $V_{ref}$  presenta ruido. El ruido es ocasionado por la conmutación de los interruptores. El ruido ingresa al sistema al realiza un monitoreo directamente de  $V_{out}$ .

El ruido ingresa al sistema debido a que los componentes analógicos de control no están aislados de la etapa de potencia y todos los componentes tienen la misma referencia.

En la prueba de operación continua a 16 V, la eficiencia disminuyó del 92% al 85% por el incremento de corriente hasta un máximo de 8.81 A. La alta eficiencia del convertidor se mantiene hasta los 5.51 A.

En la prueba  $V_{ref}$  cuadrada, tanto la máxima frecuencia de respuesta del sistema (3 Hz) como el tiempo de estabilización del sistema (3.84 ms).

La prueba  $V_{ref}$  triangular muestra que el control responde favorablemente ante cambios graduales en el punto de referencia.

El sistema se desempeña correctamente hasta los 18 Hz debido a que no hay afectaciones en la tensión o en la corriente. No obstante la máxima frecuencia de respuesta del sistema es de 235 Hz.



---

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES

En esta tesis se considera viable el generar hidrógeno mediante un electrolizador alcalino para enriquecer motores a gasolina, considerando que el electrolizador puede operar de manera eficiente y segura con una fuente de alimentación equivalente a una batería de 24 VCD.

Los resultados de los experimentos que se realizaron en esta tesis demuestran que la eficiencia de producción de hidrógeno por celda del electrolizador alcalino caracterizado en esta tesis depende de la temperatura de operación.

El electrolizador muestra un comportamiento dinámico lento, debido al tiempo que demora en alcanzar la temperatura necesaria para obtener la máxima producción de hidrógeno.

En esta tesis se diseñó e implementó un control PI y un convertidor reductor síncrono como fuente de alimentación controlada para el electrolizador.

Las pruebas experimentales probaron que el convertidor tiene una eficiencia del 92% al 85% y el control PI diseñado permite que el sistema alcance un valor de estado estable en 3.84 ms.

El sistema de control y el convertidor cumplieron satisfactoriamente la necesidad de controlar y suministrar potencia al electrolizador dentro de los parámetros físicos del electrolizador.

### 6.1 Trabajos futuros

Como trabajo futuro se propone:

- Diseñar un electrolizador con arreglos de celdas en serie y paralelo que permita llegar al punto máximo de producción en un tiempo menor.
- Medir el flujo de gases generados para obtener la eficiencia de los electrolizadores y obtener el punto óptimo de operación.
- Diseñar un convertidor reductor multifase para dividir la corriente entre las fases y proveer una corriente mayor a 9 A al electrolizador.
- Implementar un sistema de control digital para mejorar la velocidad de respuesta y precisión.
- Probar el sistema de electrólisis en conjunto con el sistema de control en un motor de combustión interna.

---

**REFERENCIAS**

- [1] SENER, S. d. (09 de 12 de 2016). SECRETARÍA DE ENERGÍA, MÉXICO. Obtenido de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C01>
- [2] SENER, S. d. (9 de 12 de 2016). SECRETARÍA DE ENERGÍA, MÉXICO. Obtenido de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C02>
- [3] Y. Karagöz, N. Yuca, T. Sandalçı, A.S. Dalkılıç. (2015). Effect of hydrogen and oxygen addition as a mixture on emissions and performance characteristics of a gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 8750-8760.
- [4] Shuofeng Wang, Changwei Ji, Jian Zhang, Bo Zhang. (2011). Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogenoxygen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 11164-11173.
- [5] Kai Zeng, D. Z. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*(36), 307–326.
- [6] Craig A. Grimes, O. K. (2008). *Light, Water, Hydrogen - The Solar Generation of Hydrogen by Water Photoelectrolysis*. Pennsylvania: Springer Science+Business Media, LLC.
- [7] Sánchez Hernández, A. (2004). Estudio y desarrollo de un módulo de regulación de voltaje multifase. Cuernavaca, Morelos.
- [8] Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. PRENTICE HALL MEXICO.
- [9] Ang, S., & Oliva, A. (2005). *Power-Switching Converters*. CRC.
- [10] Rojas Mena, M. A. (2006). Estudio de factibilidad del uso de hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna para generación de electricidad. Temixco, Morelos, Mexico.
- [11] McAllister, S., Chen, J.-Y., & Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. New York: Springer Science+Business Media.
- [12] Shuofeng Wang, C. J. (2014). Lean burn performance of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition. *Applied Energy* (136), 43-50.
- [13] Léon, D. A. (2008). *Hydrogen Technology, Mobile and Portable Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [14] Dr. Said Al-Hallaj, K. K. (2011). *Hybrid Hydrogen Systems - Stationary and Transportation Applications*. Chicago: Springer-Verlag London Limited.

- 
- [15] Gutiérrez Rodríguez, J. A., & Romo Ríos, S. A. (2015). Producción de Hidrógeno Sustentable, con sistema Híbrido Solar-Electrólisis alcalina para ahorro de Hidrocarburos. México, D.F.
- [16] B&K Precision Corp, H. P. (09 de Julio de 2016). <http://www.bkprecision.com/>. Obtenido de <http://www.bkprecision.com/products/power-supplies/XLN3640-36v-40a-144kw-programmable-dc-power-supply.htm>
- [17] Ogata, K. (1998). Ingeniería de control moderna (3a. Ed. ed.). (M. Á. Martínez Sarmiento, Trad.) Edo. de México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A.
- [18] Instruments, T. (9 de 12 de 2016). TL081. Obtenido de <http://www.ti.com/product/TL081/datasheet>
- [19] Instruments, T. (9 de 12 de 2016). TL494. Obtenido de <http://www.ti.com/product/TL494/datasheet>
- [20] Instruments, T. (9 de 12 de 2016). LM339. Obtenido de <http://www.ti.com/product/LM339/datasheet>
- [21] Infineon. (9 de 12 de 2016). IR2184. Obtenido de <http://www.infineon.com/dgdl/ir2184.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c955e616d4>
- [22] Tektronix. (9 de 12 de 2016). TDS1000B Series Digital Storage Oscilloscopes. Obtenido de <http://www.tek.com/datasheet/tds1000b-series-digital-storage-oscilloscopes-datasheet>
- [23] Tektronix. (9 de 12 de 2016). TCPA300/400. Obtenido de <http://www.tek.com/current-probe-manual-0>