

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



**“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN
SISTEMA FOTOCATALÍTICO DE
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE”**

ROCÍO BELÉN VIAL GALLEGUILLOS

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL MECÁNICA
MENCIÓN ENERGÍA**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: DR. GERMÁN AMADOR DÍAZ**

MARZO - 2023

AGRADECIMIENTOS

*A mi familia, especialmente a mi madre quién
a través de su apoyo y amor incondicional
ha forjado los cimientos que me han permitido alcanzar
mis propósitos en la vida. Gracias por siempre creer en mí.*

*A Carlos, mi compañero de vida, con tu infinito amor y
compañía has sido mi refugio todos estos años,
gracias por recorrer este camino a mi lado.*

*A mis compañeros de 4 patitas, Brownie y Tommy,
por iluminar mis días con su inagotable amor y compañía.*

*A mi profesor, Mario Toledo, por brindar las herramientas
necesarias y guiarme en el desarrollo de este proceso.*

*A Alfredo Núñez y Cristobal Evensen, por su contribución,
apoyo y total entrega, a lo largo de este exhaustivo proyecto.*

*A todo el equipo LER, sobre todo a Miguel Cubillos y
Francisco Vargas por su constante ayuda y buena disposición.*

RESUMEN

El panorama energético del último siglo se ha sustentado en una histórica dependencia de los combustibles fósiles como principal fuente de energía, lo que ha provocado graves repercusiones medioambientales a una escala global. Es así como la búsqueda de nuevos vectores energéticos renovables y abundantes, es fundamental para brindar un desarrollo energético compatible con los requerimientos mundiales y que, a su vez, logre impulsar una pronta transición en vías de mitigar la crisis climática. Una alternativa que ha captado la atención de los investigadores es la producción de hidrógeno mediante fotocátalisis del agua, la que, si bien resulta ser una opción prometedora dado a su naturaleza renovable, aún presenta una gran cantidad de desafíos que dificultan su implementación a una escala industrial.

En marco del proyecto FONDAP "Solar Energy Research Center (SERC-Chile)" N°15110019, se desarrolló la evaluación experimental de un sistema fotocatalítico para la producción de hidrógeno verde. Por medio de una exhaustiva revisión bibliográfica, se definieron las principales variables y factores determinantes para el diseño de configuraciones experimentales basadas en la disociación fotocatalítica del agua para producción de hidrógeno. A partir de ello, se implementó un sistema de iluminación apto para el set-up propuesto, el que se conformó por una fuente de luz de espectro de luz visible y una irradiancia total promedio de 267,4 [Wm⁻²].

Asimismo, se diseñó un sistema de agitación mecánica que logró otorgar un funcionamiento estable e ininterrumpido, favoreciendo la reducción del efecto de sedimentación y acumulación de partículas para un líquido con material en suspensión. Adicionalmente, por medio de pruebas experimentales con un electrolizador PEM, se desarrolló un sistema de recuperación de hidrógeno verde a través de una metodología de arrastre con nitrógeno, donde se evaluó el comportamiento de salida de hidrógeno para dos configuraciones experimentales diferentes.

Por consiguiente, a partir de una propuesta de producción de hidrógeno fotocatalítico con bases en la disociación parcial de la molécula de agua, se efectuó la puesta en marcha de la integración de los sistemas propuestos, donde para un tiempo de experimentación dado, se logró detectar la presencia de hidrógeno en un volumen determinado de acumulación de gas. Finalmente, se exponen recomendaciones y oportunidades de mejora, con el objetivo de favorecer las condiciones operativas del sistema propuesto en un futuro.

Palabras clave: hidrógeno verde, fotocátalisis, energía renovable

ABSTRACT

The energy landscape of the last century has been sustained on a historical dependence on fossil fuels as the main source of energy, which has caused serious environmental repercussions on a global scale. This is why the search for new abundant and renewable energy vectors is essential to provide energy development that is compatible with global requirements and that, in turn, manages to promote a prompt transition helping mitigate the climate crisis. An alternative that has captured the attention of researchers is the production of hydrogen through photocatalysis of water, which, although it seems to be a promising option given its renewable nature, still presents many challenges that make it difficult to implement on an industrial scale.

Within the framework of the FONDAPE project "Solar Energy Research Center (SERC-Chile)" N°15110019, the experimental evaluation of a photocatalytic system to produce green hydrogen was performed. Through an exhaustive review of available literature, the main variables and determining factors for the design of experimental configurations based on the photocatalytic dissociation of water for hydrogen production were defined. From this, a lighting system suitable for the proposed set-up was implemented, which was made up of a visible light spectrum light source with an average total irradiance of 267,4 [Wm⁻²].

Likewise, a mechanical agitation system was designed that managed to provide a stable and uninterrupted operation, reducing the effect of sedimentation and accumulation of particles for a liquid with material in suspension. Additionally, through experimental tests with a PEM electrolyser, a green hydrogen recovery system was developed using a nitrogen stripping methodology, where the hydrogen output behavior was evaluated for two different experimental configurations.

Consequently, from a proposal to produce photocatalytic hydrogen based on the partial dissociation of the water molecule, the integration of the proposed systems was performed, where for a given experimentation time, it was possible to detect the presence of hydrogen in a given volume of gas accumulation. Finally, recommendations and opportunities for improvement are presented, with the aim of favoring the operating conditions of the proposed system in the future.

Keywords: green hydrogen, photocatalysis, renewable energy

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO DE TÉRMINOS	11
ESPECIES QUÍMICAS	11
CONSTANTES FÍSICAS	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. ESCENARIO ENERGÉTICO A NIVEL MUNDIAL	15
1.2. PANORAMA ENERGÉTICO EN CHILE Y AVANCES EN MATERIA DE HIDRÓGENO	17
1.3. HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	19
1.4. CLASIFICACIÓN DE HIDRÓGENO SEGÚN SU FUENTE DE OBTENCIÓN	21
1.5. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE	22
1.5.1. <i>Electrólisis</i>	24
1.5.2. <i>Termólisis</i>	24
1.5.3. <i>Fermentación oscura</i>	25
1.5.4. <i>Fotocatálisis</i>	25
2. OBJETIVOS	27
2.1. OBJETIVO GENERAL	27
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3. MARCO TEÓRICO ASOCIADO A LA DIVISIÓN FOTOCATALÍTICA DEL AGUA	28
3.1. DISOCIACIÓN DE AGUA MEDIANTE FOTOCATÁLISIS	28
3.1.1. <i>Semiconductores</i>	29
3.1.2. <i>Teoría de bandas</i>	30

3.1.3.	<i>Co-catalizadores</i>	32
3.1.4.	<i>Agentes de sacrificio</i>	33
3.1.5.	<i>Eficiencia STH (Solar to Hydrogen)</i>	34
3.2.	CONFIGURACIONES EXPERIMENTALES PARA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE FOTOCATALÍTICO	35
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	40
4.1.	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL PROPUESTA	40
4.2.	SISTEMA DE ILUMINACIÓN	43
4.2.1.	<i>Diseño original</i>	43
4.2.2.	<i>Propuesta e implementación</i>	44
4.3.	SISTEMA DE AGITACIÓN	49
4.3.1.	<i>Diseño original</i>	49
4.3.2.	<i>Propuesta e implementación</i>	51
4.4.	SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE HIDRÓGENO	57
4.4.1.	<i>Propuesta e implementación</i>	57
4.5.	INTEGRACIÓN DE SISTEMAS PROPUESTOS	62
4.5.1.	<i>Puesta en marcha</i>	62
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
	REFERENCIAS	69
	ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Demanda mundial de energía primaria por tipo de combustible (2019). Adaptado de IEA ^[8]	15
Figura 1-2. Consumo de hidrógeno a nivel mundial según sectores industriales. Adaptado de [16].....	17
Figura 1-3. Proyección de generación eléctrica por tipo de fuente [GWh] ^[18]	18
Figura 1-4. Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero por sector [miles de toneladas de CO ₂ equivalentes] ^[18]	18
Figura 1-5. Fuentes de producción de hidrógeno (2020) *CCUS: Carbon Capture, Use and Storage Adaptado de IEA ^[14]	22
Figura 1-6. Rutas de generación de formas básicas de energía a partir de fuentes primarias de energía verde ^[32]	23
Figura 3-1. Ilustración esquemática de la división fotocatalítica del agua en un fotocatalizador semiconductor. Adaptado de [48]	30
Figura 3-2. Esquema de la estructura de bandas y niveles de energía para la división fotocatalítica del agua. ^[51]	31
Figura 3-3. Posiciones y anchos de banda de semiconductores de uso común a pH cero con referencia al potencial óxido-reducción del agua. ^[53]	31
Figura 3-4. Mecanismo de acción de un co-catalizador adicionado a un fotocatalizador para facilitar la evolución de hidrógeno (A) y evolución de oxígeno (B) en el proceso de disociación del agua. ^[55]	32
Figura 3-5. Esquema de la evolución fotocatalítica de hidrógeno (a) y oxígeno (b) en presencia de agentes de sacrificio. ^[60]	33
Figura 3-6. Esquema de reactores de prueba típicos para reacciones fotocatalíticas (izquierda: irradiación interna, centro: irradiación superior, derecha: irradiación lateral). ^[71]	36
Figura 3-7. Esquema de la configuración utilizada para experimentos fotocatalíticos, modo 1 (izquierda) y modo 2 (derecha). Se define: (1) depósito, (2) bomba de suministro, (3) fotorreactor,	

(4) lámpara, (5) termostato, (6) tanque de gas, (7) manómetro, (8) sensor de presión, (9) termocupla, (10) agitador magnético y (11) válvula dosificadora. ^[71]	36
Figura 3-8. Configuración de reactor discontinuo tipo I. ^[72]	38
Figura 3-9. Diagrama de flujo del fotorreactor tipo II con mezcla pasiva ^[72]	39
Figura 4-1. Esquema configuración experimental para producción de hidrógeno verde fotocatalítico.	40
Figura 4-2. Configuración experimental compuesta por: (1) agitador magnético, (2) matraz Erlenmeyer modificado, (3) bomba peristáltica, (4) fotorreactor, (5) agitador magnético con placa calefactora, (6) electrodo de pH, (7) sonda de temperatura, (8) medidor de temperatura, (9) medidor de pH, (10) sistema de convección forzada, (11) fuente de iluminación (12) tanque de nitrógeno, (13) acumulador, (14) frasco desecador de gases con sílica gel y (15) bolsa de muestra de gases.	41
Figura 4-3. Sistema acumulador, compuesto por: (1) válvula de acceso al reactor, (2) soporte, (3) embudo modificado, (4) vía de conexión con detector de gases, (5) vía de salida de hidrógeno desde el reactor, (6) pinza de fijación, (7) vaso precipitado de 1000 [mL] y (8) llave de paso de vidrio.	42
Figura 4-4. Arreglo eléctrico inicial: (1) Regleta para conectar lámparas, (2) interruptor, (3) enchufes, (4) toma de corriente, (5) regleta conexión batería-toma de corriente, (6) batería y (7) cargador de batería. Adaptado de [75]	43
Figura 4-5. Sistema de iluminación y su respectivo arreglo eléctrico: (1) Pantalla concentradora, (2) lámparas, (3) soporte ajustable, (4) fuente de poder (5) interruptor, (6) toma de corriente en LER.	45
Figura 4-6. Primer escenario de medición: espectro de luz de lámpara de Xenón HID de 35 [W] y 6000 [K]. Registro realizado en Laboratorio de Física Moderna UTFSM	46
Figura 4-7. Segundo escenario de medición: espectro de luz de lámpara de Xenón HID de 35 [W] y 6000 [K]. Registro realizado en Laboratorio de Física Moderna UTFSM	47
Figura 4-8. Sistema de iluminación en operación	48

Figura 4-9. Fotorreactor (izquierda), cuerpo del reactor modelado en software Autodesk Inventor (centro) y ventana (derecha). Para el cuerpo del fotorreactor: (1) deflectores, (2) vías de acceso para sonda de temperatura y pH, (3) espacio de medición, (4) puerto entrada de gas, (5) puerto salida de gas y (6) puerto para la entrada y salida de solución acuosa. Adaptado de [75].	49
Figura 4-10. Diseños de soporte de barra magnética utilizados en pruebas de agitación magnética. ^[75]	50
Figura 4-11. Sistema de agitación mecánica diseñado en software Ansys SpaceClaim: (1) álabe, (2) eje, (3) sello de caucho, (4) porta retén y (5) contenedor cilíndrico para sujeción al motor.	52
Figura 4-12. Conjunto de agitación mecánica diseñado para un fotorreactor tipo batch.	52
Figura 4-13. Fotorreactor modificado para agitación mecánica (izquierda) y diseño modelado en software Ansys SpaceClaim (derecha)	53
Figura 4-14. Sistema de agitación mecánico sometido a medición de velocidad angular mediante un tacómetro láser digital.	54
Figura 4-15. Concentraciones experimentales para dos alturas de medición	56
Figura 4-16. Curva de operación para un electrolizador PEM determinada experimentalmente para variaciones de voltaje [V] y su respectiva medición de flujo volumétrico de hidrógeno producido [mL/min].	57
Figura 4-17. Configuración experimental acondicionada para ensayos de recuperación de hidrógeno	58
Figura 4-18. Vista en detalle de configuración experimental acondicionada para ensayos de recuperación de hidrógeno. Se señala: (1) válvula de 3 vías, (2) flujo de nitrógeno, (3) flujo de hidrógeno producido por proceso de electrólisis, (4) electrolizador PEM, (5) válvula de salida de gas desde el fotorreactor (6) instrumento detector de gases (7) vía de conexión entre acumulador y detector de gases, (8) frasco desecador de gases y (9) probeta.	59
Figura 4-19. Evolución en el tiempo de la recuperación de hidrógeno experimental para tres ensayos con punto de medición en set-up propuesto.	60

Figura 4-20. Evolución en el tiempo de la recuperación de hidrógeno experimental para tres ensayos con punto de medición en vía de salida de gas desde el fotorreactor.	61
Figura 4-21. Solución acuosa dispuesta bajo agitación en cámara de reacción del fotorreactor.	63
Figura 4-22. Detección de hidrógeno verde fotocatalítico para puesta en marcha del sistema propuesto, en base a mediciones efectuadas en sistema de acumulación.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores HHV y LHV en kJ/g para combustibles comunes (25 °C, 1 atm) ^[23]	20
Tabla 2. Eficiencia STH de estudios recientes en la división de agua fotocatalítica. ^[65]	34
Tabla 3. Valores de irradiancia incidente [Wm^{-2}] obtenidos en el proceso de verificación del sistema de iluminación propuesto.	48
Tabla 4. Nomenclatura utilizada para toma de muestras en pruebas efectuadas al sistema de agitación propuesto.....	55
Tabla 5. Resultados de concentración experimental obtenidos con una agitación de 250 [rpm].	56

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Símbolo	Definición	Unidad
HHV	Poder calorífico superior	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
LHV	Poder calorífico inferior	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
E	Energía	J, eV
E_g	Ancho de banda prohibida	J, eV
T	Temperatura	K
V	Volumen, Voltaje	m^3 , V
λ	Longitud de onda	m
ν	Frecuencia de onda	Hz

ESPECIES QUÍMICAS

Símbolo	Definición
H ₂ O	Agua
H ₂	Hidrógeno
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ⁺	Catión hidrógeno (hidrón)
TiO ₂	Dióxido de titanio
Pt	Platino
Rh	Rodio
Ir	Iridio
Ar	Argón
N ₂	Nitrógeno
Ag	Plata
Ru	Rutenio
Pd	Paladio
Au	Plata
CdS	Sulfuro de cadmio
N ₂ SO ₃	Sulfito de sodio
Na ₂ S	Sulfuro de sodio

Co	Cobalto
Ni	Níquel
Cu	Cobre

CONSTANTES FÍSICAS

Símbolo	Definición	Valor
c	Velocidad de la luz	$3 \cdot 10^8 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$
h	Constante de Planck	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$

1. INTRODUCCIÓN

La reciente crisis desencadenada por la pandemia de COVID-19 ha afectado considerablemente el desarrollo mundial. Asimismo, el escenario energético ha enfrentado diversos cambios y a su vez, nuevos desafíos. El gran impacto generado por la pandemia ocasionó una caída de un 4,5% en la demanda de energía primaria, además de un decrecimiento del 6,3% en las emisiones globales de carbono derivadas del uso de la energía en el año 2020. Si bien aún existe una gran incertidumbre con respecto a las proyecciones, tanto las políticas de mitigación como la distribución efectiva de programas de vacunación, han permitido una reactivación de la actividad mundial y con ello, el consumo de energía total en el mundo está experimentando uno de sus mayores crecimientos en la historia, debido principalmente a los mercados emergentes y a las economías en desarrollo.^[1]

A su vez, la histórica dependencia de los combustibles fósiles como principal fuente de energía ha provocado graves repercusiones energéticas y medioambientales a una escala global. El uso excesivo de carbón, petróleo y gas natural son una de las principales causas del calentamiento global, la lluvia ácida y la pérdida de biodiversidad, las que junto con las crecientes concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera, están ocasionando consecuencias irreversibles en el planeta Tierra.^[2]

A pesar de que la energía primaria renovable ha experimentado una tasa de crecimiento anual de un 15% durante el año 2021, la dependencia a los combustibles fósiles sigue liderando, representado así un 82% de la energía primaria consumida.^[1] Por este motivo, impulsar una transición hacia el desarrollo de energías alternativas es crucial para una estabilidad mundial. Actualmente, el enfoque se ha desplazado hacia tecnologías de energía verde y limpia, posibilitando la protección del medio ambiente y un desarrollo sostenible.^[3] Mediante la exploración de nuevas fuentes de energía, es que el hidrógeno ha captado la atención de los investigadores, pues surge como un vector energético prometedor, convirtiéndolo en una alternativa viable a los combustibles de origen fósil. El hidrógeno, es un combustible versátil, libre de gases contaminantes en su proceso de combustión y con un alto rendimiento energético. Sin embargo, al no encontrarse de forma aislada en la naturaleza, su principal desafío se sitúa en el desarrollo de tecnologías de producción rentables, eficientes y libres de emisiones.^[4] El hidrógeno que se produce en la actualidad proviene en su mayoría de métodos basados en combustibles fósiles, solamente un porcentaje cercano al 5% procede de una producción basada en agua.^[5] A pesar de ser un combustible limpio, su nivel de emisiones contaminantes están también asociadas a su línea de producción, por ende, es fundamental potenciar técnicas de obtención que abarquen todos los factores necesarios. Es así, que la producción de hidrógeno a

partir de agua y mediante la utilización de una fuente de energía renovable se convierte en una posibilidad esperanzadora, que podría dar respuesta a la contingencia mundial.

Para que un recurso de energía renovable sea sostenible, este debe ser inagotable e inocuo para el planeta, además de ser económicamente asequible a largo plazo y satisfacer las necesidades de la sociedad. En efecto, a medida que se acelera el uso de las tecnologías de energías renovables, es necesario lograr un equilibrio entre las diversas dimensiones del desarrollo sostenible. Es importante evaluar el ciclo de vida completo de cada fuente de energía para garantizar que se cumplan todos los alcances de la sostenibilidad.^[6]

De esta manera, con el propósito de indagar en el desarrollo de tecnologías que faciliten la obtención de hidrógeno mediante vías sostenibles que permitan avanzar en un camino hacia la descarbonización mundial, es que el objetivo del presente trabajo consiste en la evaluación de un sistema experimental para la producción de hidrógeno verde fotocatalítico.

1.1. Escenario energético a nivel mundial

La humanidad a través de los tiempos ha logrado desarrollarse significativamente en aspectos sociales y económicos, lo que le ha permitido alcanzar prometedores avances tanto en el ámbito científico como tecnológico. Por tanto, este escenario ha estado acompañado por una constante necesidad de producir recursos suficientes que logren respaldar tal crecimiento. Sin embargo, el ritmo acelerado de estas actividades antropogénicas ha generado un impacto considerable en el medio ambiente, lo que conlleva que en la actualidad el mundo enfrente el gran desafío de abordar esta problemática. De esta forma, se debe brindar un desarrollo energético compatible con los requerimientos mundiales y a su vez impulsar una pronta transición que permita mitigar la crisis climática.

El actual modelo energético mundial está ligado en su mayor parte al consumo de combustibles de origen fósil, según los datos ilustrados en la Figura 1-1 un 81% está asociado a la demanda de petróleo, carbón y gas natural, siendo un porcentaje menor proveniente de fuentes renovables. De esta manera, la mayor alza de emisiones de CO₂ durante el año 2021 se situó en la producción de electricidad y calor, donde hubo un aumento en más de 900 [Mt]. Esto representó el 46% del incremento global de emisiones, pues para satisfacer el crecimiento de la demanda de electricidad se debió recurrir a un mayor uso de combustibles fósiles. En consecuencia, las emisiones de CO₂ del sector se acercaron a las 14,6 [Gt], alcanzando su nivel histórico más alto y alrededor de 500 [Mt] más que en 2019.^[7]

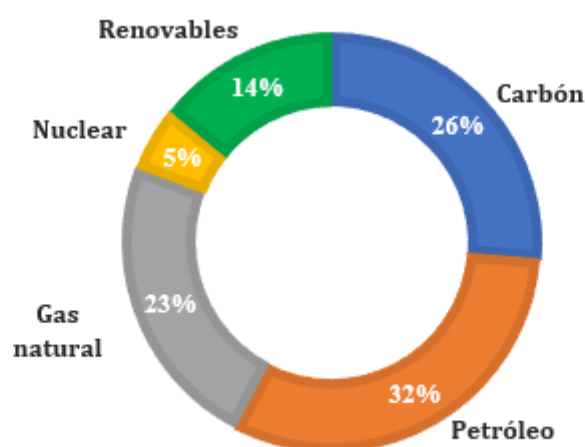


Figura 1-1. Demanda mundial de energía primaria por tipo de combustible (2019).

Adaptado de IEA^[8]

Durante el año 2015, se llevó a cabo un histórico pacto global denominado Acuerdo de París, donde las partes que lo conforman asumieron el compromiso a largo plazo de reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero, lo que podría posibilitar combatir el cambio climático, y a su vez controlar el aumento de la temperatura del planeta.^[9] Asimismo, en virtud de generar y canalizar un plan de acción es que surge la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En ella, se hace un llamado a los países a adoptar medidas de carácter urgente en materias ambientales, sociales y económicas, es así, que sus ejes principales se basan en erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad. A su vez, garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna forma parte de los ODS, lo que constituye un pilar fundamental para hacer frente al cambio climático y sus efectos.^[10]

En vista de que el sistema de producción y consumo de energía vigente resulta insostenible, el desarrollo de tecnologías de energía limpia cumple un rol fundamental. Se espera que para el 2025 las energías renovables suministren un tercio de la electricidad mundial, dónde la energía hidroeléctrica conformará casi la mitad de la electricidad renovable mundial, seguida por la eólica y la solar fotovoltaica.^[11] Si bien resultan ser alternativas bastante prometedoras, no se encuentran exentas de desventajas. Por un lado, la hidroelectricidad y su implicancia en la construcción de grandes represas son responsables de diversas ramificaciones perjudiciales tanto social como medioambientalmente, lo que está asociado principalmente al impacto en los hábitats silvestres y en la población circundante. A su vez, las energías eólica y solar poseen una alta intermitencia en comparación con otras tecnologías. Su funcionamiento está directamente relacionado con las condiciones meteorológicas y la estacionalidad, lo que implica una alta variabilidad que no puede ser controlada y al mismo tiempo, una significativa dificultad para predecir su nivel de producción.^[12] No obstante, una forma de superar la barrera de la intermitencia es a través del desarrollo de nuevos mecanismos de almacenamiento de energía o el uso de hidrógeno como vector energético. Dada a su gran versatilidad, el hidrógeno puede ser utilizado tanto en celdas de combustible para producción de electricidad o quemado como combustible para la producción de calor, ya sea solo o mezclado con combustible convencional. Además, puede ser usado como reactante para la creación de otros combustibles sintéticos.^[13]

En la actualidad, el hidrógeno es ampliamente requerido como insumo químico en la industria. Durante el año 2020 su demanda global se situó en 90 [Mt], además de ser producido casi exclusivamente en base a combustibles fósiles, lo que se traduce en cerca de 900 [Mt] de emisiones de CO₂.^[14] En la Figura 1-2 se pueden apreciar los sectores que participan en la demanda de hidrógeno. Entre los sectores que lideran el consumo, se encuentra la industria química y de refinería, donde el hidrógeno es empleado en procesos como el hidrocrackeo, hidrotratamiento y desulfuración. Por otro lado, principalmente en la industria de fertilizantes, destaca la producción de amoníaco. Igualmente, existen otros rubros con una demanda menor, en los que se pueden mencionar la industria electrónica, alimentaria y de metal y vidrio.^[15]

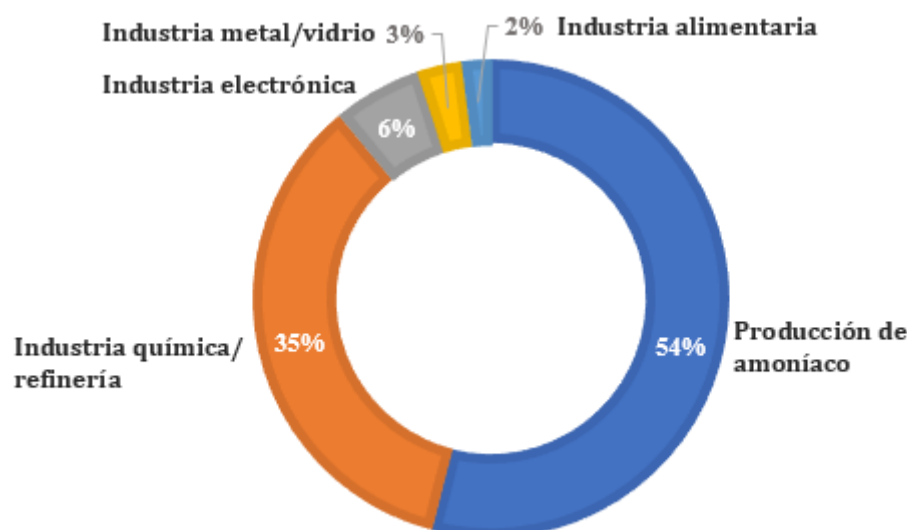


Figura 1-2. Consumo de hidrógeno a nivel mundial según sectores industriales.

Adaptado de [16]

La implementación del uso de hidrógeno simultáneamente acoplado a una producción basada en energías renovables podría suponer un cambio radical en el panorama energético mundial, lo que contribuiría a reducir la dependencia a combustibles fósiles, que como ya se ha mencionado son altamente contaminantes. Además, de tener una naturaleza no renovable, provocando un agotamiento gradual inevitable en caso de no conseguir regular su demanda.^[17]

1.2. Panorama energético en Chile y avances en materia de hidrógeno

Mediante la Política Energética Nacional 2050, es que Chile ha definido metas que le permitan alcanzar una matriz energética sustentable, resiliente y baja en emisiones de gases de efecto invernadero. En los últimos cinco años, se han evidenciado notables avances en la participación de las energías renovables en el sistema eléctrico, que pasó de un 42% a 55% en 2020. Del mismo modo, se aspira avanzar hacia una mayor diversificación de energías cero emisiones, teniendo en consideración la competitividad de cada tecnología y promoviendo el desarrollo de estas. Es así como se proyecta un incremento de la participación renovable, predominando las energías solar fotovoltaica y eólica (Figura 1-3). Adicionalmente, se busca impulsar la integración de aquellas tecnologías que aún no se han incorporado de forma masiva, tales como la energía solar concentrada (CSP) y la geotermia. En esta misma línea, durante el año 2019 se llevó a cabo un acuerdo de carácter público-privado, donde se realizó el compromiso de retirar el carbón de la generación eléctrica a más tardar el año 2040. Es así, que también se proyecta ir reduciendo paulatinamente las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes locales

provenientes del uso de combustibles fósiles (Figura 1-4), donde en la actualidad tanto el sector de transporte como el de generación eléctrica son los principales causantes de ello.^[18]

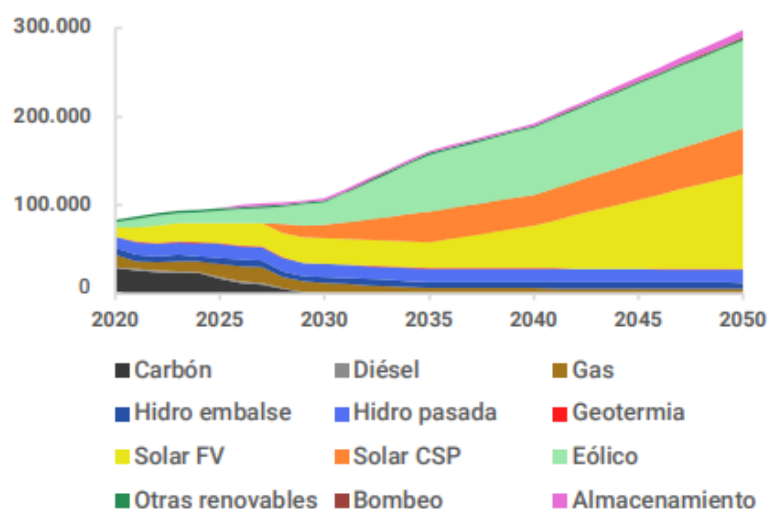


Figura 1-3. Proyección de generación eléctrica por tipo de fuente [GWh] ^[18]

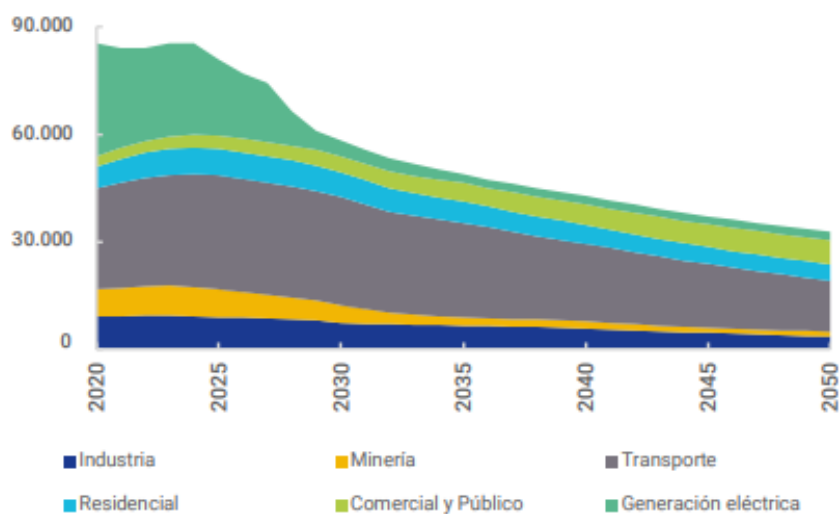


Figura 1-4. Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero por sector [miles de toneladas de CO₂ equivalentes] ^[18]

De esta forma, con el objetivo de avanzar a una transición energética según las metas propuestas y en vías de contribuir a mitigar el cambio climático mediante la descarbonización, Chile ha impulsado la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, la que mediante el aprovechamiento de su potencial geográfico pretende generar una diversificación en la matriz energética del país favoreciendo así la producción de hidrógeno verde. En una primera etapa se busca activar la industria a un nivel local, permitiendo desarrollar el conocimiento, la infraestructura y las cadenas

de suministro, para así de forma posterior lograr impulsar el acceso a los mercados de exportación en una economía global.^[19]

De forma similar al consumo que existe a nivel mundial, en Chile la mayor parte del hidrógeno es destinado a procesos y tratamientos en el sector de refinerías. Asimismo, la producción de hidrógeno comercial nacional se basa principalmente en la tecnología de reformado de metano por vapor. Dentro de las empresas que poseen plantas de producción de hidrógeno basadas en dicha tecnología, se puede mencionar a Linde Gas Chile S.A. y la Compañía de Hidrógeno del Bío Bío S.A.^[13]

Por otra parte, Enel Chile está presente en el rubro de las energías renovables a lo largo del país por intermedio de Enel Green Power, la que mediante su colaboración con HIF y otras empresas, se encuentran desarrollando el primer proyecto en su tipo a escala industrial en Chile. La planta obtendrá hidrógeno proveniente de la electrólisis del agua, proceso que será alimentado por energía eólica resultante de un aerogenerador de 3,4 [MW]. El hidrógeno producido será posteriormente combinado con CO₂ capturado desde la atmósfera para la elaboración de combustibles sintéticos. Este proyecto lleva el nombre Haru Oni, está ubicado en Cabo Negro, al norte de Punta Arenas en la región de Magallanes y su construcción comenzó en julio de 2022, se espera que su puesta en marcha se lleve a cabo durante el segundo semestre del mismo año.^[20]

De igual forma, Enel Green Power en conjunto con ENAP, cuentan con una primera experiencia en la producción de hidrógeno con estas características, pero mediante el uso de energía solar como fuente de alimentación. El proceso tiene lugar en la central geotérmica de Cerro Pabellón, donde el hidrógeno generado, como alternativa al petróleo diésel, es almacenado y utilizado para cubrir parte de las necesidades energéticas del campamento y a su vez, energizar la planta de tratamiento de agua.^[21]

Existen diversos factores que resultan ser claves para que Chile logre desarrollarse en lo que respecta al hidrógeno proveniente de energías renovables. Por un lado, es propicio profundizar en el conocimiento de las tecnologías involucradas, y a su vez, avanzar en la elaboración de estándares y regulaciones pertinentes, las que puedan ser aplicables en toda la cadena de producción. Adicionalmente, es fundamental atraer inversiones que permitan desplegar el potencial renovable que posee el país.

1.3. Hidrógeno como combustible

Si bien el hidrógeno es uno de los elementos más abundantes en el universo, este no existe en estado libre en la Tierra. No obstante, se puede encontrar combinado con otros compuestos como es el caso de los hidrocarburos y el agua (H₂O). Por esta razón, es preciso obtenerlo mediante la

utilización de otras fuentes de energía, lo que conlleva a que el hidrógeno no sea considerado una fuente de energía primaria, si no un vector energético.^[22]

En condiciones estándar de presión y temperatura, el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, no tóxico e inflamable. Uno de sus aspectos más atractivos corresponde a su proceso de combustión libre de gases contaminantes, pues solo libera vapor de agua.^[23] Asimismo, el hidrógeno tiene aproximadamente tres veces la energía por masa en comparación con la mayoría de los combustibles de hidrocarburos comunes, pero dada su baja densidad, posee poca energía por volumen.^[24] De esta manera, tanto el poder calorífico superior (HHV) como el inferior (LHV) indican la cantidad de energía para una masa determinada de combustible, en la Tabla 1, se puede apreciar la comparativa.

Tabla 1. Valores HHV y LHV en $[kJ\ g^{-1}]$ para combustibles comunes (25 °C, 1 atm) ^[23]

Combustible	HHV	LHV
Hidrógeno	141,9	119,9
Metano	55,5	50,0
Gasolina	47,5	44,5
Diésel	44,8	42,5
Metanol	20,0	18,1

El hidrógeno posee una baja densidad, siendo el más ligero de todos los gases y a la vez, su punto de ebullición es uno de los más bajos, ocupando el segundo lugar entre todas las sustancias conocidas. Lo anterior, causa grandes dificultades para su almacenamiento, ya sea como gas o líquido. Por un lado, como gas requiere altas presiones y grandes volúmenes de almacenamiento, y por otro, como líquido requiere un sistema de almacenamiento criogénico. Otra forma de verlo es que el hidrógeno posee una densidad de energía muy baja, es decir, un volumen dado de hidrógeno contiene menos energía que el mismo volumen de otros combustibles. La mayoría de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno son considerablemente más voluminosos y/o más pesados que los que se suelen utilizar para combustibles como la gasolina y el diésel.^[25]

Uno de los sistemas de almacenamiento que es utilizado de forma más habitual, corresponde a los cilindros de gas a alta presión con una presión máxima de 20 [MPa]. No obstante, se han desarrollado nuevos cilindros en base a compuestos más ligeros que son capaces de soportar hasta 80 [MPa], donde el hidrógeno puede alcanzar una densidad volumétrica de hasta 36 $[kg/m^3]$. Cabe mencionar, que un motivo de preocupación es la seguridad de los cilindros presurizados, pues cualquier gas almacenado a altas presiones es extremadamente peligroso. Por esta razón, los

diseños de los cilindros utilizados deben cumplir con estándares rigurosos y pruebas de certificación pertinentes.^[26]

Por otra parte, el almacenamiento de hidrógeno en estado líquido requiere de temperaturas que se encuentren por debajo de su punto de ebullición normal (-253 °C), lo que corresponde a una temperatura extremadamente baja. Las temperaturas inferiores a -73 °C se conocen como temperaturas criogénicas. A su vez, la licuefacción del hidrógeno es un proceso que requiere de grandes cantidades de energía para llevarse a cabo. No obstante, el hidrógeno no puede ser almacenado en forma líquida indefinidamente, pues sin importar la calidad del aislamiento del tanque en el cual esté contenido, siempre existirá transferencia de calor desde el entorno. Este calor ocasiona que parte del hidrógeno sufra vaporización y aumente la presión dentro del tanque.^[27]

Otra tecnología que se ha desarrollado corresponde al almacenamiento de hidrógeno por medio de hidruros metálicos, compuestos químicos y nanoestructuras de carbono. El almacenamiento mediante absorción por compuestos químicos o por adsorción en materiales de carbono, presenta ventajas desde la perspectiva de la seguridad, ya que para liberar hidrógeno para su uso se requiere alguna forma de conversión o de entrada de energía. El hidrógeno forma hidruros metálicos con algunos metales y aleaciones que conducen su almacenamiento en estado sólido, a temperatura y presión moderadas, además de poseer una mayor densidad de almacenamiento en comparación con los estados de gas y líquido.^[28]

1.4. Clasificación de hidrógeno según su fuente de obtención

Como ya se ha mencionado anteriormente, si bien el hidrógeno puede ser clasificado como un combustible libre de emisiones contaminantes, esto no implica que su proceso de producción sea inocuo. Por ende, resulta relevante considerar su ciclo de vida completo para poder catalogarlo como un combustible limpio. De esta forma, basado en los métodos de producción de hidrógeno existentes, es que se define un “código de colores” para identificar el origen de su obtención. Es así, que se acuñan los colores gris, azul y verde. Por un lado, el denominado hidrógeno gris, es ampliamente utilizado y es aquel que proviene de combustibles fósiles; principalmente a partir de gas natural u otros hidrocarburos ligeros como el metano o gases licuados de petróleo, los que son sometidos a procesos de reformado, dando como resultado una gran cantidad de emisiones de CO₂.^[29]

Asimismo, en un escenario intermedio existe el denominado hidrógeno azul, el que en vías de disminuir las emisiones de gases contaminantes es producido a partir de combustibles fósiles con CCUS (por su nombre en inglés Carbon Capture, Use and Storage). Al integrar métodos de reformado de gas natural o gasificación de carbón mediante técnicas de captura y almacenamiento

de CO₂, se consigue un proceso neutro en carbono. Esta tecnología puede ser aplicada en instalaciones de hidrógeno gris reduciendo las emisiones de efecto invernadero.^[30]

Por otro lado, la producción de hidrógeno basada en energías renovables se conoce como hidrógeno verde. Es así, que este tipo de hidrógeno es obtenido principalmente a través de la electrólisis del agua, proceso que es alimentado con fuentes de energía no convencionales. Asimismo, haciendo referencia a los fundamentos de esta clasificación, existen diversas tecnologías que se encuentran en proceso de maduración, las que podrían ofrecer un gran potencial para aplicaciones a gran escala en un futuro próximo.^[31] Sin embargo, éstas representan una pequeña parte de la producción mundial de hidrógeno, la que durante el año 2020 correspondió a 30 [kt], donde la electrólisis del agua constituyó aproximadamente un 0,03%. A su vez, 16 plantas en base a combustibles fósiles con CCUS produjeron solo 0,7 [Mt] de H₂ (0,7%).^[14] Lo que se puede apreciar en la Figura 1-5.

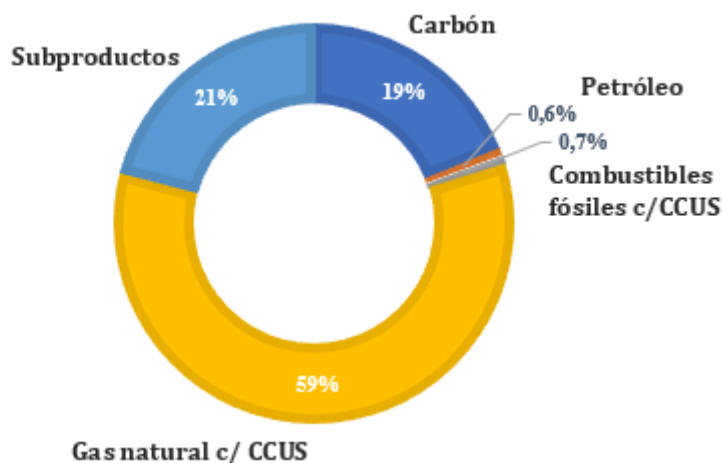


Figura 1-5. Fuentes de producción de hidrógeno (2020)

*CCUS: Carbon Capture, Use and Storage

Adaptado de IEA ^[14]

Por tanto, la generación de hidrógeno mediante energías limpias, la mejora de su almacenamiento y su utilización como vector energético son elementos claves para dar respuesta a las demandas energéticas actuales sin contribuir al deterioro medioambiental. Es por ello, que en base a los precedentes estipulados se detallan a continuación algunos métodos de producción de hidrógeno con origen renovable.

1.5. Métodos de producción de hidrógeno verde

Dado que el hidrógeno puede ser encontrado en diversos recursos presentes en la naturaleza, tales como el agua, hidrocarburos fósiles, biomasa, entre otros; es que resulta necesario recurrir a un

intermediario energético que permita extraerlo. Estas formas de energía pueden ser clasificadas en cuatro categorías: eléctrica, térmica, bioquímica y fotónica. Asimismo, existen diversas rutas por las que estos tipos de energía pueden ser impulsadas. Por un lado, tanto la energía eléctrica como térmica pueden derivarse de fuentes de energía renovable, nuclear o energía recuperada; esta última es asociada, por ejemplo, al calor industrial recuperado, gases de vertedero, desechos que pueden incinerarse, etc. Adicionalmente, la energía fotónica comprende únicamente la energía solar y por su parte, la bioquímica se encuentra almacenada en materia orgánica y puede ser impulsada, según sea el caso, por radiación solar.^[32] En la Figura 1-6 se presentan las rutas de energía descritas anteriormente.

Es así como las energías señaladas previamente, alimentan múltiples métodos de producción de hidrógeno existentes, ya sea mediante solo un tipo de energía o bien en una configuración híbrida de éstas. Con el paso del tiempo se han desarrollado numerosas tecnologías que han permitido dar paso a diversos métodos de producción de hidrógeno verde. A continuación, se detallarán algunos de los más representativos dentro de cada tipo de energía y que a su vez, en algunos casos, utilizan agua como recurso material.

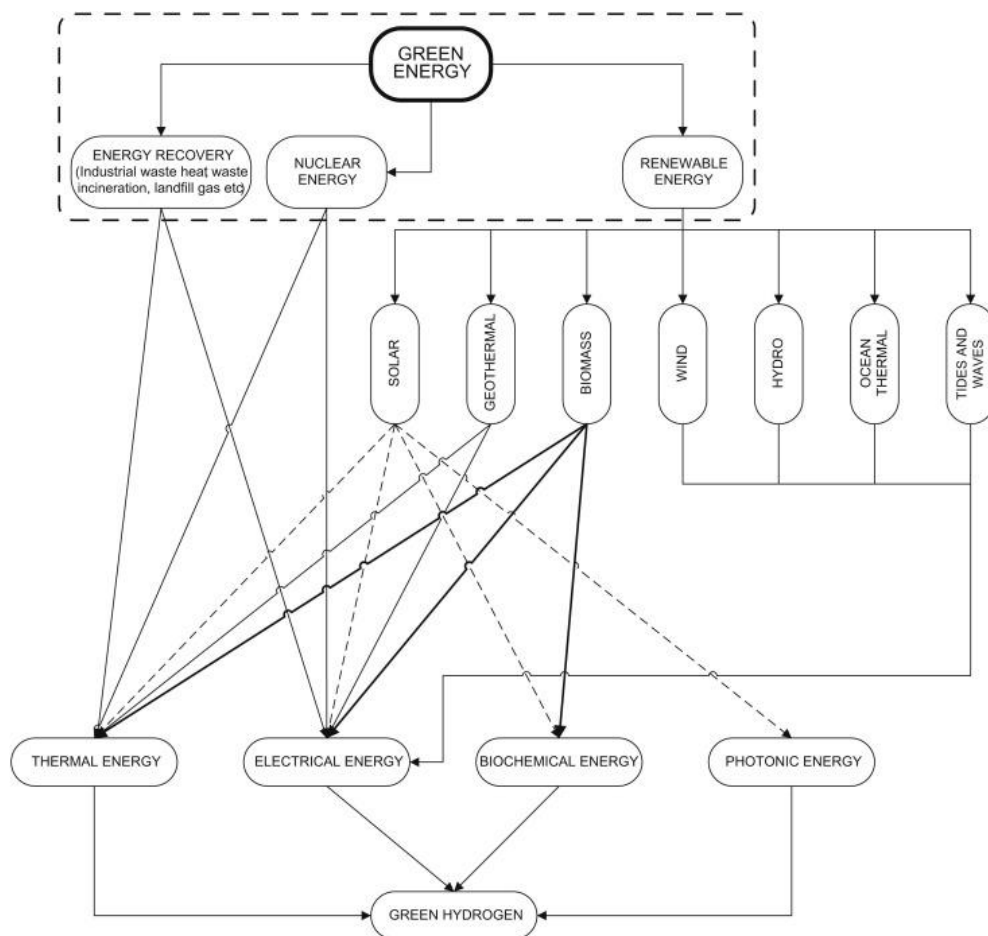


Figura 1-6. Rutas de generación de formas básicas de energía a partir de fuentes primarias de energía verde^[32]

1.5.1. Electrólisis

La electrólisis del agua es uno de los métodos más elementales en la generación hidrógeno; su modo de acción consiste en la disociación de la molécula de agua, en hidrógeno (cátodo) y oxígeno (ánodo), bajo la influencia de corriente continua.^[33]

Se han desarrollado diferentes sistemas los que utilizan diversos materiales y condiciones de trabajo, como es el caso de: electrólisis del agua alcalina (AWE), electrólisis del agua PEM, electrólisis de óxido sólido (SOE) y la electrólisis del agua con membrana de intercambio aniónico (AEM). Sin embargo, todos los casos comparten los mismos principios de operación. Tanto la electrólisis AWE como la PEM son tecnologías bien establecidas y que presentan mayores grados de madurez. Pero si bien, la electrólisis de agua PEM ofrece varias ventajas sobre la electrólisis de agua alcalina, como una alta densidad de corriente operativa, una alta pureza de los gases y una mayor presión de salida; aún existen grandes desafíos asociados al costo de sus componentes, como es el caso de los materiales utilizados en su fabricación, los que al estar basados en metales de alto costo (Pt, Ir, Ru) presentan una barrera al momento de ampliar este método^[34, 35] Con el fin de facilitar que la electrólisis PEM sea más competitiva comercialmente, algunos investigadores están trabajando en el desarrollo de nuevos materiales, tales como membranas de polímero, catalizadores y placas de electrodos, lo que permite reducir costos de construcción y operación de los equipos.^[36]

1.5.2. Termólisis

La reacción de descomposición térmica realizada en un solo paso se denomina termólisis del agua, la que, si bien se basa en un principio químico simple, requiere una gran cantidad de energía que es aportada por el calor, implicando que el sistema de reacción posea una temperatura de funcionamiento muy elevada ($T^{\circ} > 2500 \text{ K}$).

Las principales dificultades de este método corresponden a la utilización de materiales resistentes tanto a las altas temperaturas como a los cambios abruptos de ésta, los que suelen incrementar los costos del proceso. Por lo demás, en comparación con la electrólisis del agua, el hidrógeno y el oxígeno no son obtenidos en placas separadas, ya que para el caso de la termólisis, el producto obtenido consiste en una mezcla de dos gases, los que se recombinan fácilmente dado al bajo grado de disociación del H_2O y la naturaleza reversible de las reacciones involucradas^[36] Es por ello, que realizar el aislamiento del hidrógeno en la mezcla de gases resultante antes de que ocurra la recombinación conlleva un gran desafío y requiere estrategias de separación altamente efectivas. Uno de los enfoques utilizados consiste en aplicar una fase de enfriamiento instantáneo, lo que permite detener las reacciones, estabilizando así la composición del gas de la mezcla. Otra estrategia, abarca la separación de hidrógeno y oxígeno a altas temperaturas. Este proceso puede

ser realizado dentro del reactor mientras la termólisis se encuentra en progreso, utilizando métodos de membrana o técnicas de chorro de gas supersónico o de centrifugación.^[37]

1.5.3. Fermentación oscura

La fermentación oscura corresponde al proceso donde microorganismos anaeróbicos usan sustratos ricos en carbohidratos para producir hidrógeno y ácidos grasos volátiles. Usualmente, este método se lleva a cabo mediante el aprovechamiento de cultivos mixtos, donde el rendimiento de la producción de H₂ depende en gran medida de la composición, diversidad y estructura de la comunidad microbiana.

No obstante, la producción de hidrógeno fermentativo oscuro es altamente susceptible a la inestabilidad del proceso, ya sea por una transferencia de masa ineficiente, condiciones de operación desfavorables (temperatura, pH, concentración de sustrato, etc.), presencia de inhibidores químicos, cambios en comunidades microbianas y/o a la presencia de microorganismos perjudiciales. Es por ello, que para asegurar un rendimiento eficiente de esta técnica, se requiere una comprensión adecuada de su microbiología y principio de acción.^[38]

1.5.4. Fotocatálisis

La fotocatálisis es un proceso que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador inmerso en un medio donde se llevan a cabo reacciones de óxido-reducción. Para ello, la energía fotónica proveniente del espectro de luz se convierte en energía química, generando hidrógeno. A su vez, la energía que otorgan los fotones está definida por su longitud de onda en base a la relación de Planck (Ecuación 1), donde E es la energía de un fotón, h la constante de Planck, ν la frecuencia de onda, c la velocidad de la luz y λ la longitud de onda del fotón.

(Ecuación 1)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Cuando un fotón incide sobre el fotocatalizador, se genera un par electrón-hueco y la carga eléctrica resultante se utiliza para disociar el agua. Para que un fotocatalizador logre dividir el agua y generar hidrógeno, este debe tener un ancho de banda prohibida adecuada, como también bandas de conducción (CB) y bandas de valencia (VB) ubicadas correctamente para llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción. Asimismo, la generación y separación rápida de pares electrón-hueco es esencial a la hora de elegir un fotocatalizador adecuado.^[39]

En términos generales, si bien la producción de hidrógeno por disociación de agua detallada en los métodos precedentes cuenta con numerosas ventajas medioambientales, éstos corresponden a

procesos que exigen un gran aporte energético, donde la fuente de energía utilizada es altamente determinante en la sustentabilidad de estos. Entre los años 2000 y 2019, se han presentado 199 patentes en el tema, donde el 70% corresponde a procesos de electrólisis; los principales países involucrados corresponden a China, Japón y Estados Unidos. Actualmente la producción de hidrógeno por electrólisis es el único proceso renovable a gran escala.^[40]

En particular, dado que la fotocatálisis es una técnica en vías de desarrollo y altamente prometedora, es que los fundamentos y principios básicos englobados en el presente método renovable de producción de hidrógeno se estudiarán en más detalle en el Capítulo 3.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como principal objetivo la evaluación de un sistema experimental para la producción de hidrógeno verde fotocatalítico.

2.2. Objetivos específicos

- ◆ Revisar el estado del arte referente a la producción experimental de hidrógeno fotocatalítico.
- ◆ Implementar un sistema de iluminación adecuado al set-up experimental
- ◆ Mejorar el sistema de agitación de líquido con material en suspensión para un comportamiento que permita la futura producción de hidrógeno verde
- ◆ Desarrollar un sistema de captación de hidrógeno verde en base a pruebas experimentales con electrolizador
- ◆ Integrar los sistemas propuestos en el proceso fotocatalítico y presentar resultados

3. MARCO TEÓRICO ASOCIADO A LA DIVISIÓN FOTOCATALÍTICA DEL AGUA

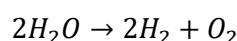
3.1. Disociación de agua mediante fotocatálisis

La disociación del agua mediante fotocatálisis es un camino prometedor en la producción de hidrógeno y ha sido investigada con gran interés desde el trabajo realizado en una celda fotoelectroquímica por Honda y Fujishima en el año 1972.^[41] Por otra parte, a nivel mundial este avance ha motivado la investigación de la división de la molécula del agua utilizando fotocatalizadores de partículas como también el impacto de diferentes materiales semiconductores en el rendimiento de esta reacción.^[42]

Existen tres enfoques principales para llevar a cabo la separación fotocatalítica del agua o photocatalytic water splitting (PWS), los que se representan a continuación.

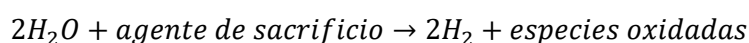
(a) *División fotocatalítica total:*

(Ecuación 2)



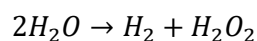
(b) *División fotocatalítica parcial:*

(Ecuación 3)



(c) *División fotocatalítica intermedia:*

(Ecuación 4)



La primera de ellas es una de las opciones que resulta ser más atrayente. No obstante, presenta diversos desafíos relacionados principalmente a una baja eficiencia fotocatalítica, pues no es una reacción favorecida termodinámicamente. Además, va acompañada de posibles reacciones inversas y altos costos asociados a la separación de los gases en la mezcla de H_2 y O_2 obtenida. Por otro lado, la división fotocatalítica parcial se logra mediante la ayuda de un agente de sacrificio, el que permite aumentar la eficiencia de reacción, si bien esta es una de sus grandes ventajas, la utilización de estos reactivos va ligada a limitantes económicas. Finalmente, la

división fotocatalítica intermedia corresponde a uno de los enfoques más nuevos, donde si bien se evita la separación de la mezcla de H_2 y O_2 , solamente se obtiene la mitad de las moléculas de hidrógeno en comparación al primer y segundo método.^[43]

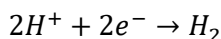
3.1.1. Semiconductores

Los materiales semiconductores son ampliamente estudiados como fotocatalizadores.^[44] Una de sus principales propiedades es poseer una banda de valencia y una banda de conducción. Estas bandas de energía se encuentran separadas por una pequeña área en donde no es posible la permanencia de ningún electrón, dicha zona se denomina banda prohibida o band gap. Las características electrónicas de cada material dependen del valor de esta banda prohibida, y cuando éste se encuentra entre 1 y 4 [eV] hablamos de un semiconductor. El tamaño de este desnivel energético establece la sensibilidad del semiconductor a la irradiación con una cierta cantidad de energía, por ende, para que un electrón del nivel más alto de la banda valencia sea promovido al nivel más bajo de la banda de conducción, dependerá de la energía necesaria en cada material (esta energía mínima requerida se denomina E_g).^[45]

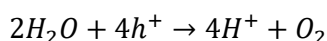
Cuando un electrón logra abandonar su banda de valencia, deja en su lugar un espacio ocupado por un hueco de electrón con carga positiva, lo que genera que los electrones adyacentes se muevan hacia él, generando en consecuencia una cadena de huecos que dan lugar a un desplazamiento de cargas positivas.^[46]

De esta forma, la reacción fotocatalítica de disociación de agua en partículas semiconductoras está definida por tres principios fundamentales, los que se ilustran en la Figura 3-1. Al existir una irradiación de luz que permita que el semiconductor absorba fotones con energías mayores a su banda prohibida, esta provocará que los electrones del semiconductor se exciten desde la banda de valencia a la banda de conducción, generando pares de electrones (e^-) y huecos (h^+) dentro de las partículas semiconductoras (paso 1). Luego, los electrones y huecos generados se separan y migran hacia la superficie del semiconductor (paso 2). De forma posterior, estos participan en las reacciones químicas superficiales de evolución de hidrógeno y oxígeno (HER y OER, respectivamente) donde los electrones generan la reducción del hidrógeno, y los huecos la oxidación del agua (paso 3).^[47] Las reacciones involucradas se indican en la (Ecuación 5 y (Ecuación 6).^[48]

(Ecuación 5)



(Ecuación 6)



Cuando un electrón que ha migrado a la banda de conducción coincide con un hueco, se produce el fenómeno de recombinación, llevando al electrón de vuelta a la banda de valencia, evitando así llevar a cabo las reacciones de reducción-oxidación, lo que conlleva una disminución de la actividad fotocatalítica y, por ende, de la eficiencia.^[49]

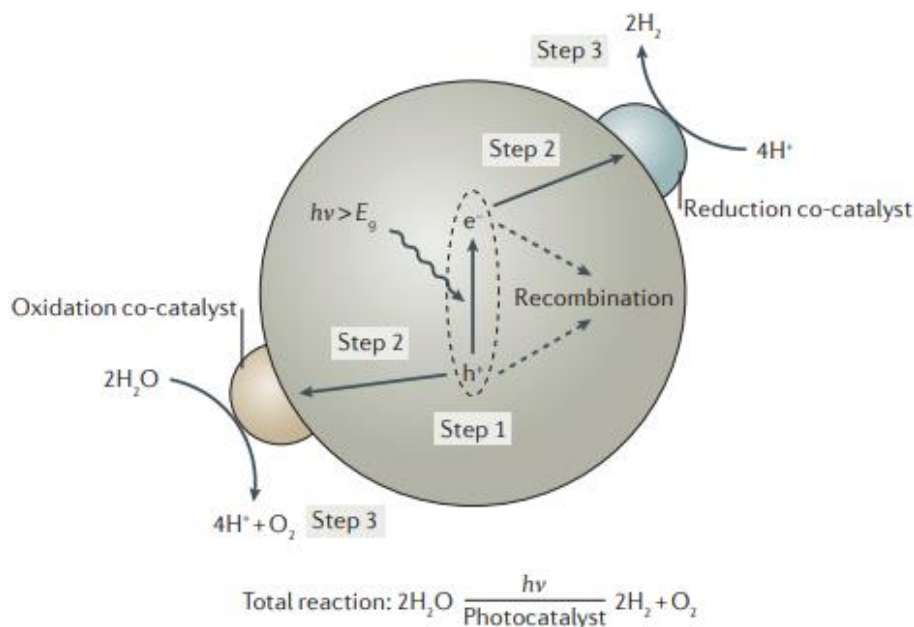


Figura 3-1. Ilustración esquemática de la división fotocatalítica del agua en un fotocatalizador semiconductor. Adaptado de [48]

Se ha revelado que numerosos factores pueden afectar la capacidad y desempeño de los fotocatalizadores, algunos de ellos corresponden a su área de superficie, morfología, estructura de banda, transferencia de carga y cristalinidad. Actualmente, se han recomendado numerosas estrategias de modificación para que los catalizadores de semiconductores logren maximizar su destreza en recolección de luz, donde se puede incluir el “doping”, la formación de compuestos y la fabricación de aleaciones. Adicionalmente, una progresión en novedosas técnicas de ingeniería, las que introducen sensibilizadores de colorantes, puntos cuánticos y cocatalizadores, permiten mejorar la eficiencia fotocatalítica para la producción de hidrógeno de los semiconductores.^[50]

3.1.2. Teoría de bandas

Una de las principales restricciones que se presenta en los fotocatalizadores corresponde a las posiciones de sus límites de banda, pues se debe conseguir que la carga logre desplazarse desde la banda de valencia (VB) a la banda de conducción (CB), para así llegar a la superficie del semiconductor. Durante el proceso, los electrones en la CB reducen los protones para generar hidrógeno, y al mismo tiempo, el oxígeno se produce a través de la oxidación de las moléculas de agua por los agujeros foto excitados en la VB.^[51] Para ello, se requiere una configuración

electrónica específica, tal que la energía de la banda de valencia sea más positiva que el potencial de oxidación O_2/H_2O , y la energía de la banda de conducción sea más negativa que el potencial de reducción H^+/H_2 , como se muestra en la Figura 3-2.

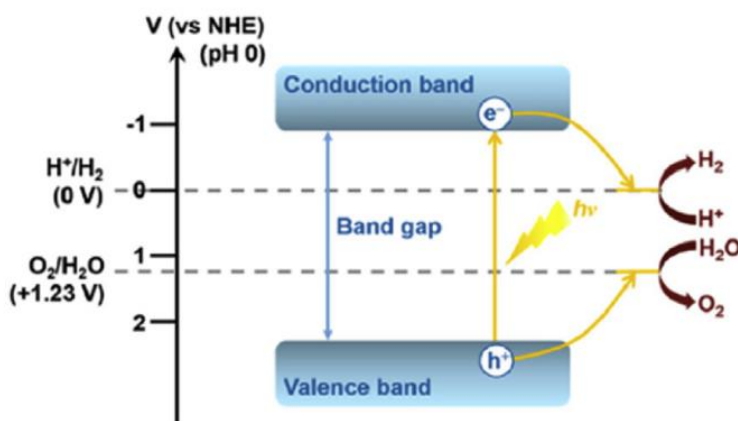


Figura 3-2. Esquema de la estructura de bandas y niveles de energía para la división fotocatalítica del agua.^[51]

De esta forma, la banda prohibida teórica mínima necesaria para impulsar la reacción de disociación de agua es de 1,23 eV (En relación con el Electrodo de Hidrógeno Normal (NHE) a pH=0).^[52]

En la Figura 3-3 se pueden observar las posiciones y anchos de banda de algunos semiconductores de uso común. Dentro de los más estudiados y utilizados se encuentra el dióxido de titanio (TiO_2),^[43] principalmente debido a su buena movilidad de los pares electrón-hueco fotogenerados y su alta capacidad óxido-reducción, además de ser estable, de baja toxicidad, abundante y de bajo costo.^[53]

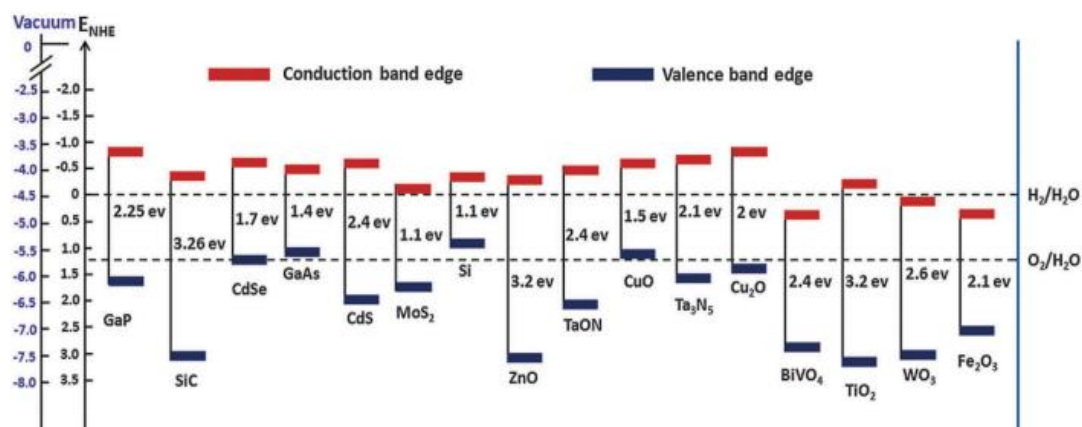


Figura 3-3. Posiciones y anchos de banda de semiconductores de uso común a pH cero con referencia al potencial óxido-reducción del agua.^[53]

Desde que el dióxido de titanio fue inicialmente usado como fotocatalizador, diversos oxinitruros, sulfuros y óxidos, han sido desarrollados con el objetivo de mejorar la actividad fotocatalítica. Sin embargo, el gran ancho de banda de algunos semiconductores, han limitado su aplicación solo a la región ultravioleta de la luz ($\lambda < 400$ nm), lo que comprende cerca del 4% de la energía solar. Por lo tanto, para que el fotocatalizador pueda utilizar la luz visible, lo que comprende el 43% del espectro solar, su ancho de banda debe ser reducido aproximadamente a 2 [eV].^[53]

3.1.3. Co-catalizadores

Los co-catalizadores cumplen un rol importante en la mejora de las propiedades de un fotocatalizador, pues al adicionar co-catalizadores en la superficie de éste se puede lograr incrementar su actividad y estabilidad. Dentro de las ventajas que ofrece el uso de co-catalizadores destaca la captura de electrones o huecos fotogenerados, lo que permite reducir la recombinación electrón-hueco.^[54] Asimismo, la transferencia de electrones y huecos a las moléculas superficiales del agua, disminuyen la energía de activación en las reacciones de reducción y oxidación. En la Figura 3-4 se ilustra el modo de operación descrito.^[55]

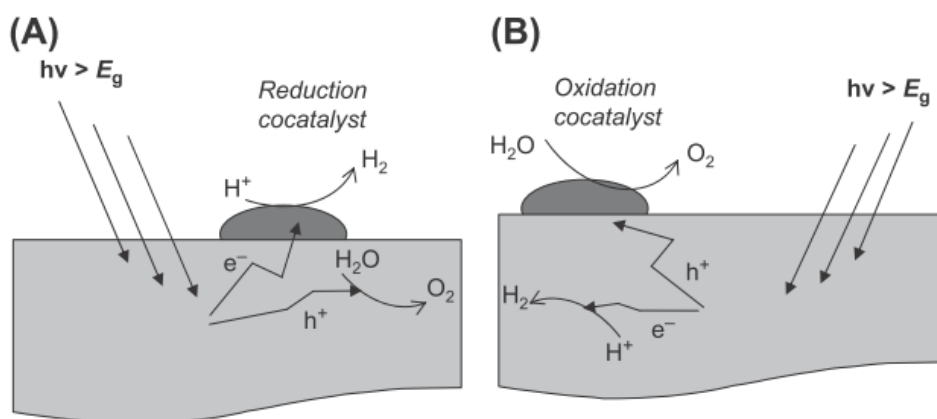


Figura 3-4. Mecanismo de acción de un co-catalizador adicionado a un fotocatalizador para facilitar la evolución de hidrógeno (A) y evolución de oxígeno (B) en el proceso de disociación del agua.^[55]

De esta forma, con el objetivo de lograr una alta actividad fotocatalítica, los sistemas de fotocatalizadores desarrollados actualmente suelen utilizar cocatalizadores basados en metales nobles, tales como Pt, Rh, Ru, Pd, Au y Ag.^[56] No obstante, este tipo de cocatalizadores suelen ser escasos y de alto costo, lo que dificulta su utilización en la producción de energía a gran escala. Por esta razón, en los últimos años se han desarrollado nuevas opciones más asequibles, un ejemplo de ello son los cocatalizadores basados en metales de transición, como Co, Ni y Cu.^[57]

El rendimiento de los co-catalizadores en las reacciones de disociación de agua dependen en gran medida de las características estructurales del co-catalizador adicionado. En general, la

composición, la cantidad adicionada, la dispersión y el tamaño de las partículas del co-catalizador son los factores con mayor influencia en la actividad fotocatalítica.^[58] Añadir una cantidad de co-catalizador por sobre el valor óptimo, puede provocar que los sitios activos del semiconductor se cubran evitando así su contacto con el agua, además de impedir una correcta absorción de la luz incidente. Por otro lado, los cocatalizadores con un tamaño de partícula más pequeño poseen un área de superficie más grande y una mayor cantidad de sitios activos. En consecuencia, un tamaño de partícula pequeño, una alta dispersión y una adición óptima de los cocatalizadores utilizados conllevan a una mejora significativa en la eficiencia fotocatalítica en la división de la molécula de agua.^[57]

3.1.4. Agentes de sacrificio

Una de las grandes limitantes en la división fotocatalítica total del agua son las bajas eficiencias presentes en el proceso, pues la rápida recombinación de cargas electrón-hueco reduce la efectividad en la generación de H_2 . Por esta razón, es que se utilizan agentes de sacrificio como donantes de electrones (o huecos), los que ayudan a prevenir la recombinación.^[59]

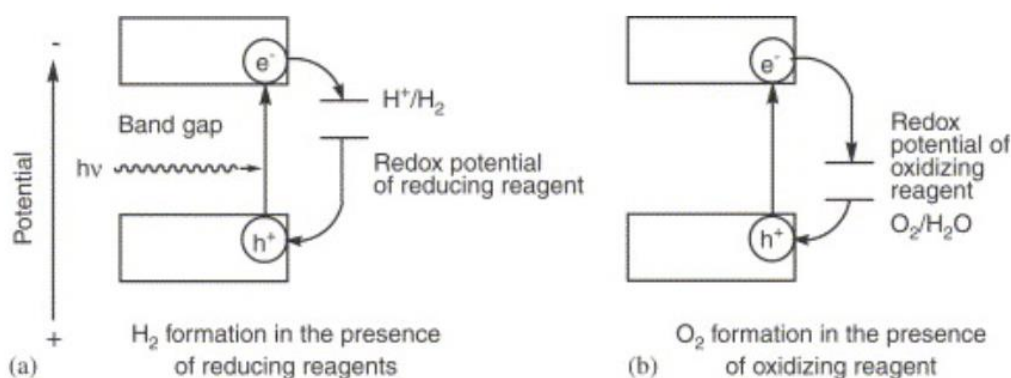


Figura 3-5. Esquema de la evolución fotocatalítica de hidrógeno (a) y oxígeno (b) en presencia de agentes de sacrificio.^[60]

Cuando la reacción fotocatalítica se lleva a cabo en presencia de reactivos donantes de huecos, los electrones fotogenerados en la banda de conducción son consumidos por ellos, potenciando la reacción de evolución de oxígeno. Por otro lado, al estar en presencia de reactivos donantes de electrones, los huecos fotogenerados oxidan al dador de electrones en lugar del agua, provocando que el fotocatalizador sea rico en electrones, lo que conlleva una mejora en la evolución de hidrógeno durante la reacción.^[60] Además, al no producirse O_2 se suprime la reacción inversa para producir agua, junto con evitar una etapa posterior de separación de gases.^[61] Los procesos descritos se ilustran en la Figura 3-5.

Varios compuestos como metanol, etanol, Na_2S , Na_2SO_3 , o iones tales como I^- , IO_3^- , CN^- , Fe^{3+} pueden ser utilizados como agentes de sacrificio en la generación de hidrógeno fotocatalítico.^[62]

3.1.5. Eficiencia STH (Solar to Hydrogen)

Uno de los factores más importantes en la implementación práctica de sistemas de disociación de agua fotocatalíticos corresponde a la eficiencia de conversión solar a hidrógeno (STH, por sus siglas en inglés), además, de ser sumamente útil al momento de comparar los datos informados por diferentes grupos de investigación. Este indicador (Ecuación 7) se define por la relación entre la energía almacenada como hidrógeno y la energía solar incidente.^[63]

(Ecuación 7)

$$\%STH = \frac{\text{Energía obtenida como } H_2}{\text{Energía solar incidente}} = \frac{r_{H_2} \cdot \Delta G_r}{P_{solar} \cdot S}$$

Donde P_{solar} corresponde al flujo de energía de la luz solar, S es el área irradiada, r_{H_2} es la tasa de producción de hidrógeno y ΔG_r es la energía de reacción de Gibbs.

Específicamente, los valores STH de última generación asociados a los fotocatalizadores de partículas, todavía rondan cifras del orden de 1%, lo que deja enormes brechas para la investigación y desarrollo de aplicaciones prácticas.^[64]

Tabla 2. Eficiencia STH de estudios recientes en la división de agua fotocatalítica.^[65]

Photocatalyst	Light source	Sacrificial reagent	STH efficiency (%)
CoO	AM1.5G solar simulator	–	0.6
Pt/TiO ₂	300 W Xe lamp	–	0.45
CDots/C ₃ N ₄	AM1.5G solar simulator	–	2.0
CuO-Ag/TiO ₂ core-shell	450 W Hg lamp (16% UV & 84% visible light)	Methanol	0.031–0.464
Hexagonal CdS	300 W Xe lamp	Na ₂ S & Na ₂ SO ₃	0.5–3.32
CuO/TiO ₂	AM 1.5G	–	2.0
Al/SrTiO ₃	Sunlight	–	0.4
3D g-C ₃ N ₄ nanosheet	300 W Xe lamp	–	0.06
Na ₂ Zr ₄ Ti _{6-x} O ₁₃ (x = 0,1)	4400 $\mu\text{W cm}^{-2}$ UV pen-ray lamp (254 nm)	–	2.83
CDots/NCN	AM1.5G solar simulator	–	0.1
M/AgTaO ₃ (M = Ag or Cu)	4400 $\mu\text{W cm}^{-2}$ UV pen-ray lamp (254 nm)	Na ₂ SO ₃	0.14 (bare); 0.04–1.51 (Ag); 0.68–4.19 (Cu)
Pt/Co-Pi/AgTa _{0.7} Nb _{0.3} O ₃	HAL-320 solar simulator	–	0.005–0.024
ATiO ₃ (A = Zn, Cd or Pb)	4400 $\mu\text{W cm}^{-2}$ UV pen-ray lamp (254 nm)	–	0.08–0.48 (Zn); 0.08–0.13 (Cd); 0.14–0.41 (Pb)

3.2. Configuraciones experimentales para producción de hidrógeno verde fotocatalítico

A pesar de la compleja naturaleza de reacción presente en la división fotocatalítica del agua, existe un vigoroso trabajo por parte de los investigadores quienes procuran desarrollar e implementar este proceso como una técnica comercial-ecológica para la producción masiva de hidrógeno verde. De esta forma, se busca lograr proporcionar una fuente de energía alternativa y eficiente frente a los combustibles fósiles. Es así, que con el objetivo de optimizar la eficiencia catalítica del proceso, se han propuesto diferentes diseños de configuraciones experimentales.^[66]

A pesar de que este campo de investigación ha experimentado un gran crecimiento durante las últimas décadas y con ello un número progresivo de artículos publicados, se torna cada vez más difícil comparar los resultados obtenidos en cada estudio. Cada laboratorio a lo largo del mundo posee configuraciones, condiciones de acción y fotorreactores de prueba completamente diferentes, con variaciones en su geometría, dimensiones, materiales, forma de iluminación, distribución de la intensidad de luz, disposición del fotocatalizador, cantidad de solución añadida, entre otros. Sin embargo, a pesar de que las condiciones operacionales y de carga óptima sean diferentes, se espera que la eficiencia fotónica sea la misma en base a una intensidad de luz y condiciones similares.^[67]

Es por ello, que se incentiva a los investigadores a describir sus condiciones experimentales detalladamente, caracterizando el tipo de fuente de luz utilizada, la configuración del reactor, las condiciones de reacción, como también los esquemas, dimensiones y fotografías del aparato experimental, facilitando así la reproducción y comparación de resultados fotocatalíticos por otros autores.^[68] A continuación, se presenta una recopilación de algunos avances y propuestas impulsadas por investigadores de esta materia.

Las configuraciones utilizadas para la realización de reacciones fotocatalíticas está fuertemente relacionada con la fuente de irradiación, en particular, el diseño empleado debe focalizarse en maximizar la recolección de luz emitida por parte del agente catalizador. A su vez, los reactores con catalizador suspendido en un reactivo líquido han sido objeto de un vasto estudio.^[69] Si bien estos cuentan con la ventaja de poseer una mayor superficie de iluminación, se requiere de una agitación continua de la solución fotocatalítica empleada. Con ello, se busca mantener áreas activas en las partículas del catalizador a través del contacto con la irradiación, para así conseguir llevar a cabo la reacción fotocatalítica.^[70]

Los experimentos fotocatalíticos reportados durante 2013 por Schwarze y sus colaboradores, se sustentaron en un diseño de fotorreactor con iluminación lateral (Figura 3-6), mediante dos modos de operación diferentes (Figura 3-7), donde el reactor fue diseñado para admitir ambas

configuraciones. Asimismo, se probaron dos tipos de lámparas, una lámpara de arco de Xenón de 300 W y un simulador solar, con intensidades de luz de 1,5 [W/cm²] y 1000 [W/m²], respectivamente.

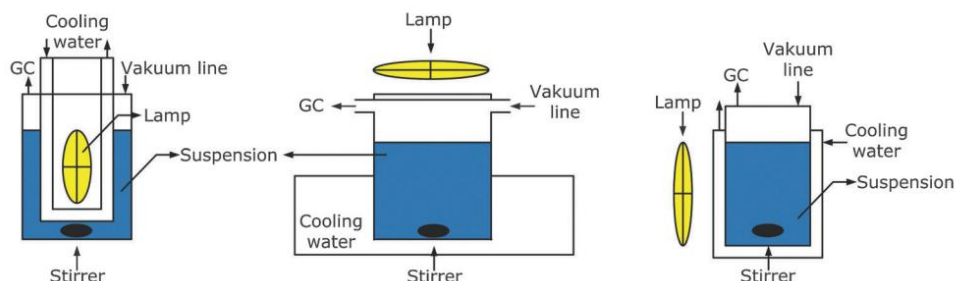


Figura 3-6. Esquema de reactores de prueba típicos para reacciones fotocatalíticas (izquierda: irradiación interna, centro: irradiación superior, derecha: irradiación lateral).^[71]

Para el modo 1, se dispuso de una bomba de engranajes para hacer circular la solución de reacción entre el depósito y el fotorreactor. A su vez, la solución contenida en el depósito se agitó magnéticamente (300-400 rpm) para evitar el asentamiento del catalizador. En el caso del modo 2, la agitación de la solución de reacción tomó lugar dentro del fotorreactor, el que simultáneamente se encontraba conectado al termostato. Para cada escenario, se utilizó una termocupla para controlar la temperatura de operación (25 [°C]). Asimismo, la parte superior del fotorreactor se diseñó para estar acoplado a un manómetro, un tanque de gas (unido a una línea Schlenk con argón como gas inerte) y un sensor de presión, este último se empleó para monitorear el aumento de presión ocasionada por la generación de hidrógeno.

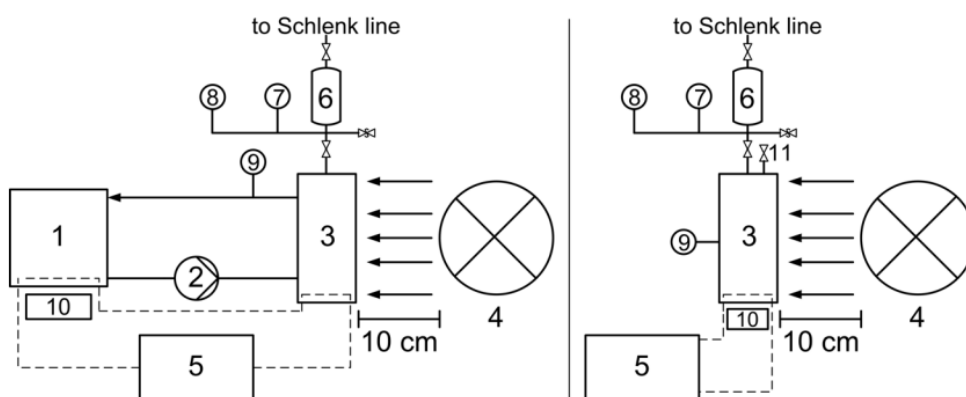


Figura 3-7. Esquema de la configuración utilizada para experimentos fotocatalíticos, modo 1 (izquierda) y modo 2 (derecha). Se define: (1) depósito, (2) bomba de suministro, (3) fotorreactor, (4) lámpara, (5) termostato, (6) tanque de gas, (7) manómetro, (8) sensor de presión, (9) termocupla, (10) agitador magnético y (11) válvula dosificadora.^[71]

En ambos modos de operación, se utilizó nitruro de carbono dopado con platino como fotocatalizador y trietanolamina como agente de sacrificio. Además, se trabajó en condiciones inertes, para ello se efectuó una purga de argón previo al inicio de los ensayos. Una vez concluidos, se analizó una muestra del volumen de cabeza del reactor para determinar el contenido de hidrógeno a través de un cromatógrafo de gases.

A partir de ambos métodos de operación empleados, solo para el modo 2 con agitación directa en el fotorreactor, se logró obtener una tasa de generación de hidrógeno estable correspondiente a $0,5 \text{ [mL h}^{-1}\text{]}$ con una eficiencia STH de 0,09% ^[71]

Por otra parte, durante el año 2011, Huang y su grupo de investigadores, desarrolló dos tipos de configuraciones experimentales para evaluar las tasas de generación de hidrógeno a partir de soluciones de sulfito de amonio. La configuración tipo I consistió en un reactor tipo batch (discontinuo) con agitación, equipado con una camisa de agua y provisto de una ventana de cuarzo para permitir el paso de luz (Figura 3-8).

Dado que los datos experimentales indican que la eficiencia del proceso de producción de hidrógeno se ve afectada por el asentamiento del fotocatalizador en el fondo del reactor, es que se utilizó una técnica de agitación magnética durante todo el periodo de reacción. Las pruebas realizadas en este tipo de configuración permitieron observar que la variación de parámetros tales como la temperatura, profundidad de la solución, la carga del fotocatalizador y la concentración de scavenger generaban efectos en la tasa de generación de hidrógeno. A medida que se elevó la temperatura, la tasa de generación de hidrógeno descendió. Asimismo, se notó un aumento en la tasa al tiempo que la profundidad de solución se incrementaba. Por otro lado, si bien un aumento en la carga de fotocatalizador potenció la tasa de generación de hidrógeno, esta disminuyó después de cierto punto, dado que una mayor carga generó que la dispersión de la luz por partícula se intensificara. Finalmente, con el scavenger ocurrió algo similar, donde después de agregar cierta cantidad de concentración la tasa se redujo, debido a su influencia en la filtración de luz y a la separación de moléculas de hidrógeno por el aumento de la viscosidad en la solución.

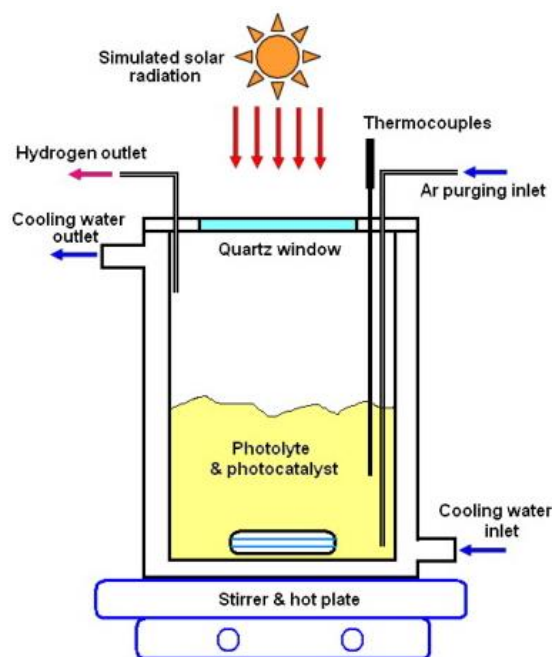


Figura 3-8. Configuración de reactor discontinuo tipo I.^[72]

Por su parte, la configuración tipo II (Figura 3-9) consistió en un diseño de fotorreactor pasivo que permite altos grados de mezcla y turbulencia en el flujo, evitando así, el desarrollo de zonas muertas, asentamiento y acumulación de partículas. Se usó una bomba para hacer circular la solución desde un matraz de tres bocas hasta el borde del fotorreactor. De esta forma, la solución fotocatalítica entra tangencialmente al fotorreactor y sale a través de un puerto en su centro inferior. Para evitar que las partículas de fotocatalizador se depositen dentro del reactor, se mecanizó la superficie inferior del mismo para que tuviera un ángulo cónico en un rango de 10° a 15° . Asimismo, se pulió para reducir aún más la acumulación de polvo de fotocatalizador gracias a un mejor acabado superficial. Cabe destacar que los efectos evidenciados en la configuración tipo I, para la tasa de generación de hidrógeno debido a las variaciones de carga de fotocatalizador, también se observaron para este tipo de reactor.

El hidrógeno producido se recolectó en una probeta graduada invertida y se determinó su volumen en base al desplazamiento de agua. Después de cada experimento, se analizó una muestra de gas recolectado por el método de cromatografía de gases.

De esta forma, mediante la utilización de un simulador de solar de 1000 [W] como fuente de iluminación, sulfuro de cadmio (CdS) como catalizador y sulfito de amonio como scavenger, las máximas tasas de generación de hidrógeno alcanzadas para las configuraciones tipo I y tipo II, fueron de $58 \text{ [mL h}^{-1}\text{]}$ y $177,6 \text{ [mL h}^{-1}\text{]}$, respectivamente.^[72]

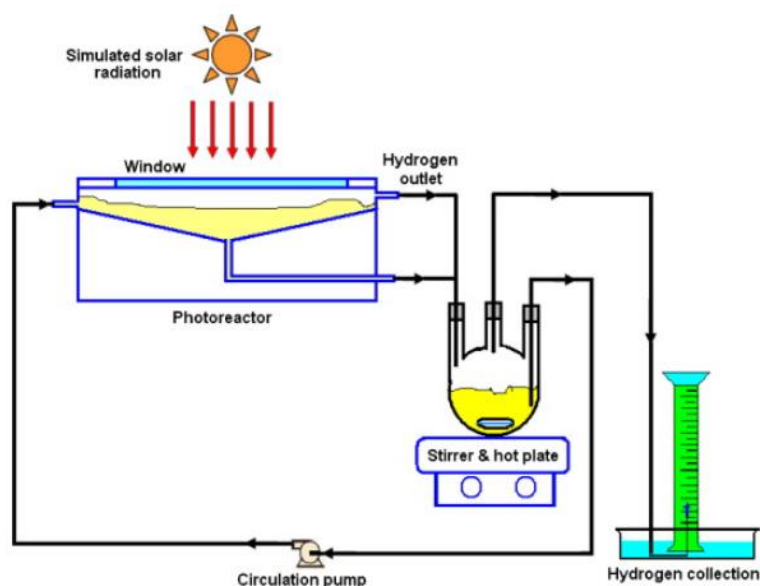


Figura 3-9. Diagrama de flujo del fotoreactor tipo II con mezcla pasiva.^[72]

A pesar de la diversidad de los arreglos y modos de operación presentes en las configuraciones experimentales, se pueden observar semejanzas en las variables de estudio y factores determinantes de la actividad fotocatalítica. De esta forma, se destaca la disposición de un sistema de iluminación adecuado, donde tanto la geometría y materiales del reactor como la posición de la fuente de luz favorezcan una distribución de luz efectiva, permitiendo así maximizar el rango de absorción de fotones incidentes. No obstante, dado que el espectro lumínico es inherente a cada fuente de luz, es esencial que las propiedades de absorción del semiconductor sean compatibles con el espectro de luz seleccionado, promoviendo la eficiencia de descomposición del agua.^[73]

De este modo, proporcionar una condición de irradiación uniforme de las partículas de catalizador está fuertemente relacionado con la agitación de la solución, pues la distribución del catalizador influirá en la absorción de fotones. Por ello, es fundamental disponer de un área de superficie fotocatalítica lo más amplia posible, manteniendo los rendimientos en todo el volumen de trabajo. Una agitación efectiva favorece la reacción, dado que la turbulencia del flujo evita la acumulación y sedimentación de las partículas del catalizador.^[74]

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con sustento en la revisión bibliográfica llevada a cabo, es que se propone una configuración experimental para la producción de hidrógeno verde fotocatalítico. Para ello, se dio continuidad a un proyecto en estudio en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) perteneciente a la Universidad Técnica Federico Santa María, el que posee sus bases en el diseño de un reactor tipo batch con su respectivo sistema de iluminación como una primera fase de este proyecto [75]. A partir de ello, se impulsa el desarrollo de un set-up experimental completo, el que permita acondicionar un sistema de producción de hidrógeno verde mediante fotocátalisis. A su vez, se realizan modificaciones con el fin de favorecer las condiciones operativas del sistema.

4.1. Configuración experimental propuesta

A partir de las múltiples configuraciones experimentales estudiadas en el capítulo 3.2, es que se logran identificar las principales variables, condiciones de diseño y componentes a tomar en consideración. De esta forma, se desarrolló el set-up esquematizado en la Figura 4-1 el que está integrado por seis etapas:

1. Suministro de mezcla
2. Reacción e instrumentos de control
3. Iluminación
4. Control
5. Secado
6. Recolección

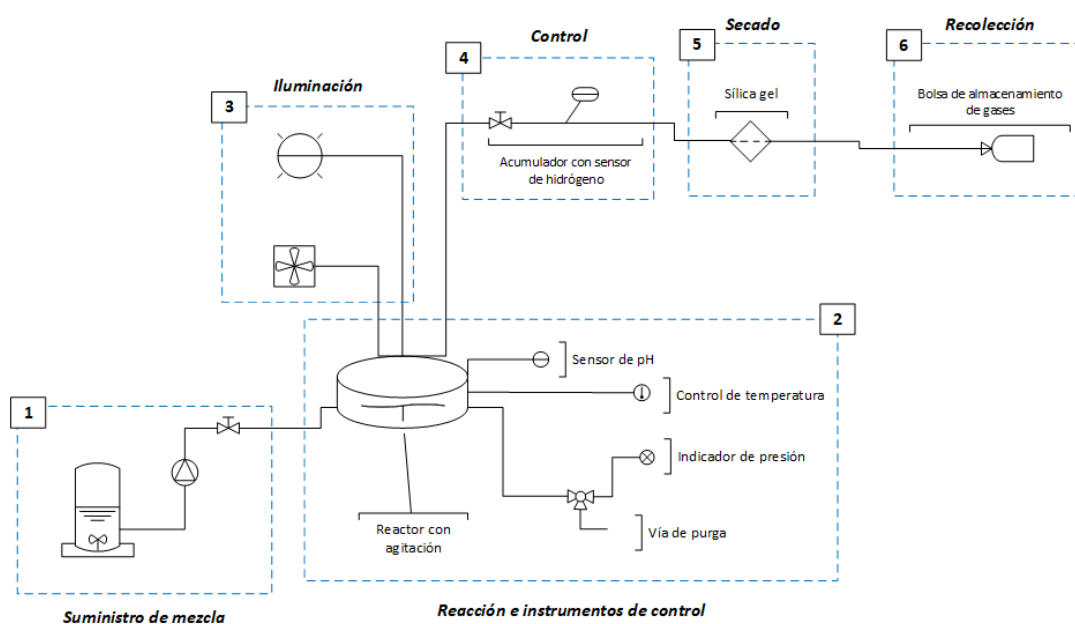


Figura 4-1. Esquema configuración experimental para producción de hidrógeno verde fotocatalítico.

La primera zona, está conformada por un agitador magnético con placa de vidrio marca IKA y un matraz Erlenmeyer, el que fue modificado para admitir estar conectado a una bomba peristáltica Lead Fluid modelo BT100S-YZ15, favoreciendo el flujo de la mezcla hasta el reactor. Luego, en la zona de reacción e instrumentos de control se dispone del fotorreactor tipo batch diseñado anteriormente, un electrodo de pH Hanna Instruments FC240B y una sonda de temperatura, ambos conectados a equipos de medición Sper Scientific SP- 860031 y CEM DT-612, respectivamente. Tanto el electrodo como la sonda se encuentran insertos de forma vertical en el reactor. Cabe señalar, que el fotorreactor está dispuesto sobre un equipo de agitación magnética con placa calefactora SH-3, el que fue sometido a un proceso de adaptación en algunos de sus componentes. Los detalles del proceso se describen en la sección 4.3.

Adicionalmente, con el objetivo de monitorear la presión dentro del reactor, se diseñó una curva de vidrio que permite visualizar fluctuaciones de presión mediante el desplazamiento de volumen de agua. Asimismo, una válvula de 3 vías permite conectar el reactor, por un lado, al indicador de presión y por otro, a un canal de purga equipado con un tanque de nitrógeno con su respectivo sistema de regulación.

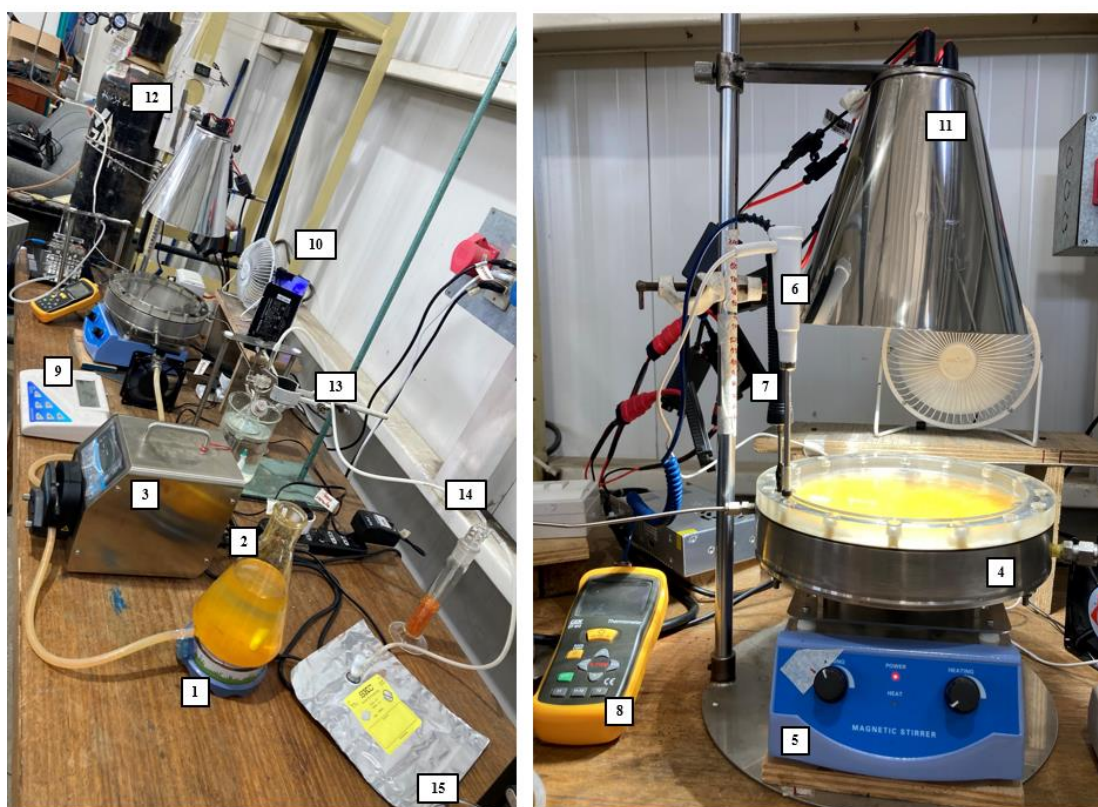


Figura 4-2. Configuración experimental compuesta por: (1) agitador magnético, (2) matraz Erlenmeyer modificado, (3) bomba peristáltica, (4) fotorreactor, (5) agitador magnético con placa calefactora, (6) electrodo de pH, (7) sonda de temperatura, (8) medidor de temperatura, (9) medidor de pH, (10) sistema de convección forzada, (11) fuente de iluminación (12) tanque de nitrógeno, (13) acumulador, (14) frasco desecador de gases con sílica gel y (15) bolsa de muestra de gases.

Por consiguiente, la tercera zona se compone de la fuente de luz y un sistema de convección forzada, donde este último permite mantener la temperatura en el rango de trabajo requerido. La cuarta zona consiste en una etapa de control, en la que se dispone de un acumulador (Figura 4-3), el que está conformado por un embudo modificado (3), un vaso precipitado de vidrio (7) y un soporte (6). El embudo de vidrio fue diseñado y modificado con una vía de acceso a un costado (4), la que permite hacer una conexión con el equipo detector de gases. A su vez, se dispuso verticalmente en la zona superior de este embudo, una llave de paso (8) la que concede el desplazamiento de gases desde el reactor hacia las etapas siguientes. La zona cinco consiste en un tubo desecador de gases que opera en base a sílica gel y finalmente, la zona seis correspondiente a la recolección, se compone por una bolsa de almacenamiento de gases SKC FlexFoil PLUS de 1 [L] de capacidad. Cabe señalar, que todas las conexiones entre los distintos componentes fueron realizadas por medio de mangueras de silicona, las que favorecían un acople flexible entre los elementos de diversos materiales y dimensiones.



Figura 4-3. Sistema acumulador, compuesto por: (1) válvula de acceso al reactor, (2) soporte, (3) embudo modificado, (4) vía de conexión con detector de gases, (5) vía de salida de hidrógeno desde el reactor, (6) pinza de fijación, (7) vaso precipitado de 1000 [mL] y (8) llave de paso de vidrio.

4.2. Sistema de iluminación

4.2.1. Diseño original

El sistema de iluminación propuesto en la primera fase de este proyecto consistió en un conjunto de 3 lámparas de alta intensidad de Xenón (Xenón HID) de 35 [W] y 6000 [K], las que se dispusieron dentro de una pantalla concentradora de rayos de luz. El sistema pantalla-lámparas se mantienen suspendidas sobre el fotorreactor mediante un pedestal con altura ajustable, lo que permite iluminar la cámara de reacción.

El arreglo eléctrico se desarrolló con el objetivo de lograr encender las 3 lámparas simultáneamente, lo que otorgaría una mayor potencia de iluminación, generando así un consumo de 10,5 [A] luego de que éstas alcanzaran un estado estable de encendido. Por consiguiente, los terminales positivo y negativo de las lámparas fueron conectados a través de una regleta (1) a cables trifásicos. Asimismo, con el fin de variar la cantidad de luces encendidas en simultáneo y de esta forma poder contar con distintas intensidades en una misma fuente de luz, se optó por conectarlas a un interruptor (2), y luego a una toma de corriente a través de unos enchufes (3), (4). Como fuente de alimentación del sistema, se dispuso de una batería de auto (6) la que se conectó a la toma de corriente a través de una regleta (5). A su vez, la batería fue conectada permanentemente a un cargador (7) para evitar su consumo mientras fuera utilizada. De este modo, el arreglo eléctrico quedó conformado como se ilustra en Figura 4-4.

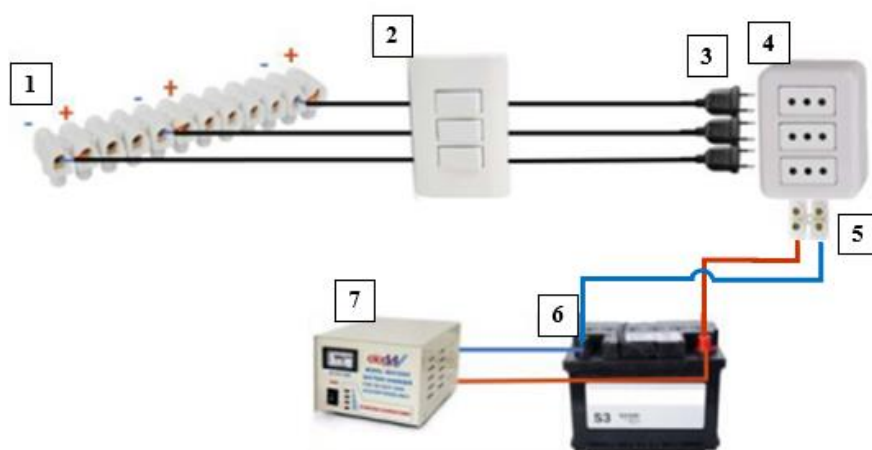


Figura 4-4. Arreglo eléctrico inicial: (1) Regleta para conectar lámparas, (2) interruptor, (3) enchufes, (4) toma de corriente, (5) regleta conexión batería-toma de corriente, (6) batería y (7) cargador de batería. Adaptado de [75]

Al realizar pruebas en el sistema, se detectaron alteraciones considerables en la temperatura de trabajo dado al calor producido por la fuente de luz. Lo anterior, elevaba la temperatura tanto de la pantalla concentradora como de la superficie del fotorreactor, provocando efectos en la temperatura de la mezcla de reacción dentro del reactor. Por ende, con tal de desplazar la masa de aire tibio entre la pantalla y el fotorreactor, se dispuso de un sistema de convección forzada mediante dos ventiladores, los que permitían mover el aire en dirección paralela a la ventana del fotorreactor. ^[75]

Finalmente, si bien el sistema de iluminación se mantuvo estable durante algunos períodos de operación, eventualmente presentó intermitencias en sus horas de uso, hasta que en definitiva se generó una falla total de sus componentes, específicamente en la batería de auto y su respectivo cargador, impidiendo el funcionamiento del sistema de iluminación.

4.2.2. Propuesta e implementación

En base a los antecedentes presentados, es que se propone a modo de solución un arreglo eléctrico alternativo para el sistema de iluminación que logre otorgar la estabilidad requerida durante el periodo de operación. En la Figura 4-5 se pueden observar los componentes, donde las lámparas (2) están dispuestas dentro de la pantalla concentradora (1), lo que a su vez se encuentra sostenido mediante el pedestal de altura ajustable (3). Además, con el objetivo de poder variar la cantidad de lámparas a encender y, por ende, poseer diferentes puntos de irradiación, se mantuvo dentro de la configuración el uso del interruptor (5), para luego ser conectado a una fuente de poder (4) que permitiese una conexión directa a la red eléctrica de las dependencias del laboratorio (6). Cabe mencionar, que para suministrar el consumo necesario de las lámparas de Xenón HID se dispuso de una fuente de poder de 12 [V] y 50 [A] marca IRM.

A partir de esta nueva configuración directa y sin intermediarios (batería y cargador), se consiguió una operación estable del sistema, logrando un estado de funcionamiento continuo de hasta 8 horas ininterrumpidas. Las horas señaladas corresponden a los tiempos en que el sistema estuvo bajo observación. Cabe señalar, que durante este periodo no se advirtieron indicadores de un funcionamiento ineficiente, tales como el sobrecalentamiento de la fuente de poder o de los cables de conexión. Historial con el que se podría estimar un tiempo de operación superior al ya mencionado.

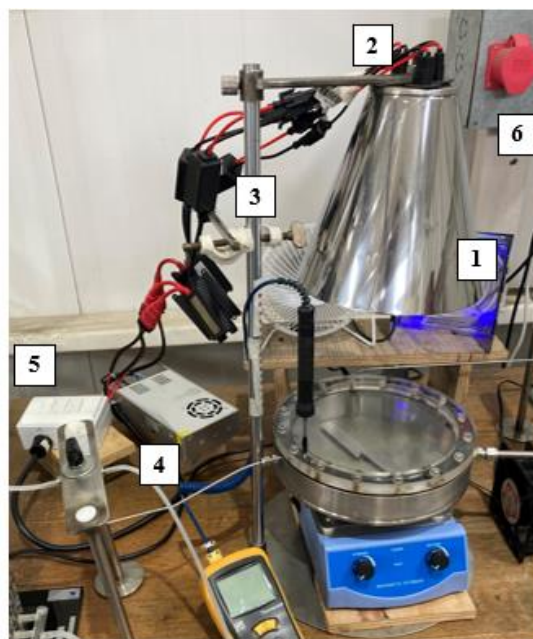


Figura 4-5. Sistema de iluminación y su respectivo arreglo eléctrico: (1) Pantalla concentradora, (2) lámparas, (3) soporte ajustable, (4) fuente de poder (5) interruptor, (6) toma de corriente en LER

Con el objetivo de validar el sistema propuesto y poder tener una relación con la configuración desarrollada en una primera fase de este proyecto, se realizaron mediciones tanto de espectro como de irradiancia de la fuente de luz.

Para las mediciones de espectro de luz de las lámparas utilizadas, se acudió con todos los componentes del sistema de iluminación al Laboratorio de Física Moderna UTFSM en las dependencias del Campus Casa Central. Para la realización de este experimento se dispuso de un espectrómetro Vernier Emissions equipado con su respectiva sonda de fibra de emisiones. Asimismo, se utilizó un software de análisis y recopilación de datos Logger Pro, compatible con las interfaces Vernier. Para proceder con las mediciones, se posicionó el conjunto pantalla-lámparas en su respectivo soporte y se energizó la fuente de poder para alimentar el sistema. Una vez dispuestos los implementos necesarios, se prosiguió a apagar las luces del laboratorio que pudiesen intervenir con las mediciones. Se llevaron a cabo dos escenarios de medición, para el primero de ellos se encendieron todas las lámparas de forma simultánea, para luego iniciar la recopilación de datos mediante el acercamiento de la sonda de fibra de emisiones a la fuente de luz (Figura 4-6). Por otro lado, para el segundo escenario se ejecutó la toma de datos en base a un encendido paulatino de las lámparas, es decir, una lámpara, luego dos lámparas en conjunto y por último tres lámparas, con sus respectivos puntos de medición (Figura 4-7). Cabe señalar, que la sonda de fibra se vio afectada por el ángulo de incidencia de la luz lo que provocó variaciones en la intensidad registrada, sin embargo, no causaba alteraciones en la distribución de las longitudes de onda.

A pesar de que se presentaron dos escenarios de medición, se puede apreciar una distribución de longitudes de onda prácticamente idéntica en ambos casos. Tanto en el gráfico de la Figura 4-6 como el de la Figura 4-7 se pueden observar cuatro picos de intensidad, los que se posicionan en los puntos de 432, 450, 532 y 542 [nm]. Asimismo, se puede apreciar una amplia presencia de longitudes de onda contenidas dentro del espectro de luz visible, entre 400 – 750 [nm], como también una porción de luz ultravioleta (inferior a 400 [nm]).

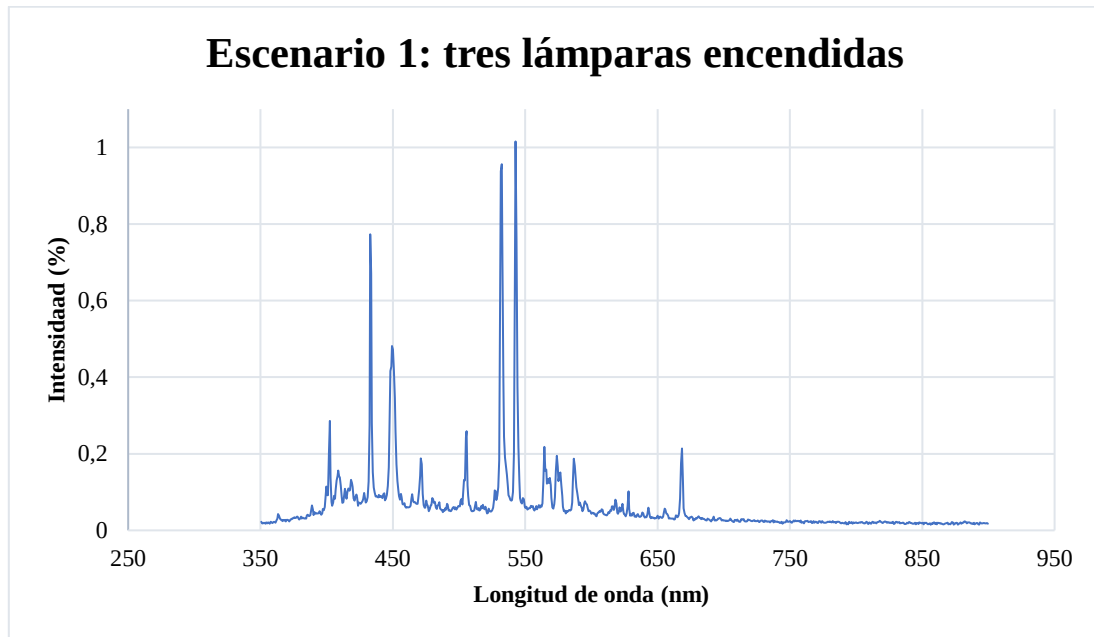


Figura 4-6. Primer escenario de medición: espectro de luz de lámpara de Xenón HID de 35 [W] y 6000 [K]. Registro realizado en Laboratorio de Física Moderna UTFSM

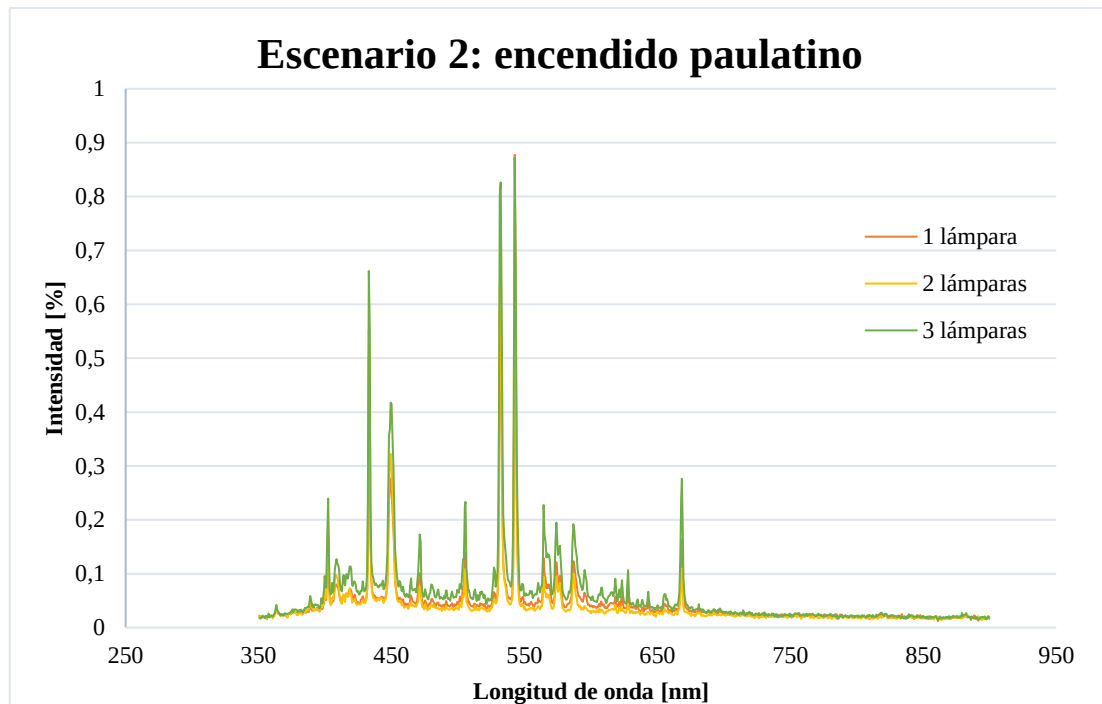


Figura 4-7. Segundo escenario de medición: espectro de luz de lámpara de Xenón HID de 35 [W] y 6000 [K]. Registro realizado en Laboratorio de Física Moderna UTFSM

Por otro lado, las mediciones referentes a la irradiancia de la fuente de luz se basaron en el método utilizado en [75], para el caso en que se obtuvo el mayor valor de irradiancia incidente correspondiente a $267,5 \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$. Para el caso mencionado, la pantalla concentradora se dispone a 130 [mm] de la ventana del reactor y se encienden las 3 lámparas en forma simultánea. En la metodología original se consideraron 88 puntos de medición distribuidos a lo largo y ancho de la superficie del reactor, sin embargo, en esta ocasión el objetivo es verificar de una manera sintetizada los niveles de irradiancia asociados al sistema de iluminación propuesto y poder compararlos con el modelo original. Para ello, se efectuaron mediciones en los puntos más característicos, los que fueron definidos como el conjunto a valores máximos, medios y mínimos en base al registro del método original. Se consideraron cinco puntos para cada caso y en una primera instancia de esta verificación, se procedió mediante la identificación espacial de los puntos seleccionados de acuerdo con su distribución en la superficie del fotorreactor. Luego, por medio de un piranómetro SP Lite 2 y un multímetro Microlab MCL 4547 se llevaron a cabo las mediciones de irradiancia incidente, en las que se efectuó un total de tres repeticiones para cada punto de medición. De esta forma se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de irradiancia incidente [Wm^{-2}] obtenidos en el proceso de verificación del sistema de iluminación propuesto.

Medición 1 [Wm^{-2}]	Medición 2 [Wm^{-2}]	Medición 3 [Wm^{-2}]	Valor promedio [Wm^{-2}]	Irradiancia inicial [Wm^{-2}]	% error
437,6	439,1	463,8	446,8	447,4	0,11%
406,8	439,1	439,1	428,4	429,4	0,24%
396,0	426,8	426,8	416,5	419,6	0,73%
380,6	454,5	420,6	418,6	418,6	0,00%
403,7	380,6	408,3	397,5	396,5	0,26%
277,3	280,4	243,5	267,1	266,1	0,39%
282,0	258,9	258,9	266,6	264,5	0,78%
280,4	260,4	251,2	264,0	263,5	0,19%
282,0	251,2	251,2	261,4	260,9	0,20%
268,1	252,7	252,7	257,8	255,3	1,01%
166,4	161,8	144,8	157,7	155,1	1,66%
154,1	147,9	146,4	149,5	148,4	0,69%
152,5	152,5	131,0	145,4	144,8	0,35%
151,0	144,8	141,8	145,9	144,8	0,71%
120,2	127,9	120,2	122,8	122,2	0,42%

A partir de los datos recabados, se puede determinar que los valores de irradiancia promedio en el método de verificación no difieren en gran medida de los valores de irradiancia original, lo que se ve reflejado en el mínimo porcentaje de error alcanzado. Asimismo, para los puntos evaluados se puede calcular la irradiancia incidente total promedio del sistema, la que corresponde a 267,4 [Wm^{-2}].



Figura 4-8. Sistema de iluminación en operación

4.3. Sistema de agitación

4.3.1. Diseño original

Durante la primera fase del presente proyecto, se definieron las bases de diseño para el fotorreactor utilizado. Entre ellas se destaca su geometría, la que dentro de un volumen de trabajo definido tiene por objetivo maximizar la cantidad de luz incidente. Para ello, se determinó que su área superficial fuese mayor a la altura, manteniendo las proporciones en una configuración de forma cilíndrica. Asimismo, la geometría seleccionada permite realizar modelados y simulaciones computacionales con menores requerimientos, favoreciendo los tiempos de simulación. De esta manera, el fotorreactor posee 250 [mm] de diámetro, con una cámara de reacción de 205 [mm] de diámetro y 40 [mm] de altura, pensada para trabajar con una profundidad máxima de solución acuosa de 33 [mm] equivalente a 1 [L] de volumen de trabajo.

A su vez, el reactor se desarrolló bajo el principio de agitación magnética y en base a generar condiciones favorables, para así lograr mantener al fotocatalizador en suspensión. El fotorreactor se compone por un cuerpo de acero inoxidable SS316, una ventana de acrílico fijada desde la parte superior mediante 16 pernos Parker M08-1.25x16 [mm] y una empaquetadura de nitrilo para evitar fugas entre el reactor y la ventana. Dentro del cuerpo del reactor se destacan algunas partes relevantes, tales como: cuatro deflectores (1) que favorecen la turbulencia del flujo, dos vías de acceso para la sonda de temperatura y de pH (2), junto a su respectivo espacio de medición dentro del reactor (3). Asimismo, se pueden apreciar puertos para entrada (4) y salida de gas (5), como también uno para la entrada y salida de la solución acuosa (6). La estructura descrita se muestra en la Figura 4-9.

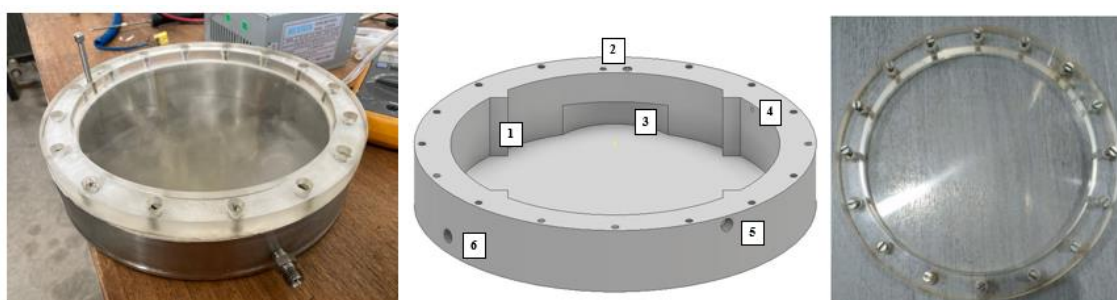


Figura 4-9. Fotorreactor (izquierda), cuerpo del reactor modelado en software Autodesk Inventor (centro) y ventana (derecha). Para el cuerpo del fotorreactor: (1) deflectores, (2) vías de acceso para sonda de temperatura y pH, (3) espacio de medición, (4) puerto entrada de gas, (5) puerto salida de gas y (6) puerto para la entrada y salida de solución acuosa. Adaptado de [75]

Los fundamentos técnicos, especificaciones de diseño y dimensiones detalladas del fotorreactor, se encuentran respaldadas en la primera fase de este proyecto^[75]. No obstante, no se profundizará en ello, pues no es el propósito del presente desarrollo experimental.

Para las pruebas de agitación efectuadas, se dispuso centradamente el fotorreactor sobre un agitador magnético SH-3, para luego posicionar dentro de éste una barra magnética de 73,75 [mm] de largo. Para evaluar la efectividad de este modo de agitación, se utilizó una solución acuosa con una concentración de catalizador de 1 [gL⁻¹]. Al agitar la solución se observó que el fotocatalizador no lograba mantenerse en suspensión, precipitando en la base del reactor. Por consiguiente, con el objetivo de aumentar la turbulencia del flujo se desarrollaron cuatro soportes de acople para la barra magnética, los que fueron impresos en una impresora 3D.

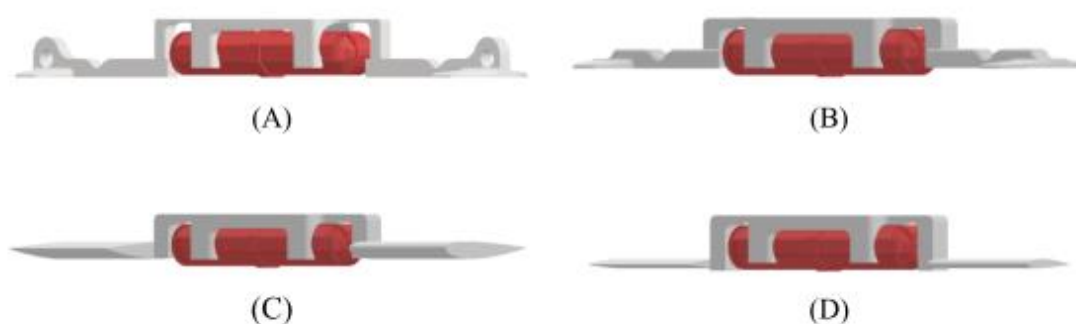


Figura 4-10. Diseños de soporte de barra magnética utilizados en pruebas de agitación magnética.^[75]

Los modelos (A), (B) y (C) se probaron para la misma concentración de trabajo ya utilizada anteriormente para la barra magnética libre de soportes. Si bien estos modelos generaron un aumento en la turbulencia de flujo, provocaron también efectos adversos asociados a una turbulencia no controlada dada a la concentración de masa en los extremos de los soportes. Por un lado, un incremento en la altura de la concavidad de la superficie del agua causó el ingreso de ésta en los puertos de gas. Asimismo, se produjeron salpicaduras de la solución acuosa en la ventana del fotorreactor, lo que se considera un efecto no deseado dado a la obstrucción del paso de luz incidente.

Cabe señalar, que para los tres casos no se pudo obtener un tiempo de rotación estable superior a 5 minutos, pues la barra con su respectivo soporte se descolocaba y perdía su giro. De esta forma, con tal de obtener una turbulencia más controlada y un giro estable, es que para el modelo (D) se consideró un diseño basado en un perfil aerodinámico NACA, el que alcanzó en algunas oportunidades un tiempo de operación estable de 4 horas.

Sin embargo, todos los diseños sometidos a prueba presentaron inconvenientes en base a su geometría, ocasionando altos niveles de turbulencia, induciendo así efectos adversos y una

aleatoriedad en los tiempos de operación. Lo anterior no permite mantener condiciones de experimentación adecuadas y es por ello que, se propone una alternativa sustentada en un método de agitación mecánica.

4.3.2. Propuesta e implementación

Con el propósito de reemplazar el sistema de agitación magnético por uno mecánico, es que se evaluó la alternativa de diseñar y fabricar un nuevo modelo de álabe que pudiese ser instalado en el fotorreactor. En la etapa de diseño, se buscó desarrollar una geometría que favoreciera la turbulencia del flujo, pero que a su vez no ocasionara un escenario descontrolado donde se incrementara la altura de la concavidad de la capa superficial de la solución acuosa, al punto de provocar obstrucciones en los puertos de gas y causar salpicaduras en la ventana de acrílico. En base a esas consideraciones, se optó por una geometría plana y que a su vez estuviese mínimamente despegada de la base del reactor (0,5 [mm]). Asimismo, se consideró una longitud para el álabe agitador de 185 [mm] la que pudiese abarcar la mayor parte de la superficie basal del fotorreactor en una disposición radial, pero que al mismo tiempo no colisionara con los deflectores. De esta forma se proyecta maximizar el levantamiento de partículas de catalizador mediante una turbulencia controlada, reduciendo así el efecto de sedimentación observado en las pruebas de agitación magnética.

Una vez definida la geometría del aspa, se ideó la forma de conseguir la cinética esperada para el modelo. Para ello, se realizaron modificaciones en el equipo de agitación magnética SH-3, donde se retiró el imán acoplado al motor de éste con el objetivo de conectar una nueva pieza que permitiera montar el eje del agitador diseñado al equipo; cabe señalar que este eje delimita la altura comprendida entre la cara plana del álabe agitador y la base interior del fotorreactor. Para montar el eje al motor, se desarrolló un conector cilíndrico que fuese compatible con las dimensiones del eje del motor y que a su vez admitiera la sujeción al eje del agitador. Junto con ello, para ensamblar los componentes giratorios y fijos de esta nueva configuración se optó por utilizar un sello radial con diámetro exterior de caucho y labio de sello simple. Asimismo, el fotorreactor fue intervenido mediante una perforación en el centro de su superficie basal para introducir así un componente adicional correspondiente a una pieza porta retén, la que fue diseñada para contener el sello seleccionado. De esta forma el sistema descrito se ilustra en la Figura 4-11. Asimismo, el ensamble del conjunto se puede ver en la Figura 4-12.

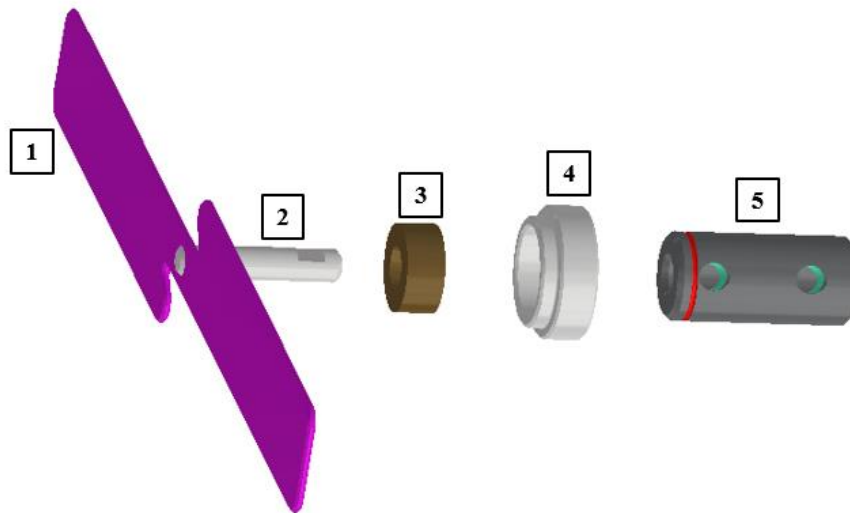


Figura 4-11. Sistema de agitación mecánica diseñado en software Ansys SpaceClaim: (1) álabe, (2) eje, (3) sello de caucho, (4) porta retén y (5) contenedor cilíndrico para sujeción al motor.



Figura 4-12. Conjunto de agitación mecánica diseñado para un fotorreactor tipo batch.

Las piezas descritas fueron mecanizadas en acero inoxidable AISI 304 dado a su buena resistencia a la corrosión, soldabilidad, resistencia al calor y a las bajas temperaturas, como también a su buena procesabilidad y propiedades mecánicas, lo que lo convierten en un material apropiado para el modo de operación propuesto. El conjunto álabe-eje agitador fue unido a través de soldadura TIG en una atmósfera de argón (Ar). Del mismo modo, la pieza porta retén fue fijada a la perforación realizada en la base del fotorreactor bajo el mismo procedimiento de soldadura ya mencionado.

Los planos utilizados en el proceso de fabricación se encuentran en el Anexo B. Planos agitador. El sistema de agitación mecánico ya montado se muestra en la Figura 4-13. Cabe señalar, que una vez dispuestas las piezas del sistema, la sujeción final entre el cilindro conector, eje del motor y eje del agitador se realizó mediante 2 tornillos tipo prisionero Allen M5.

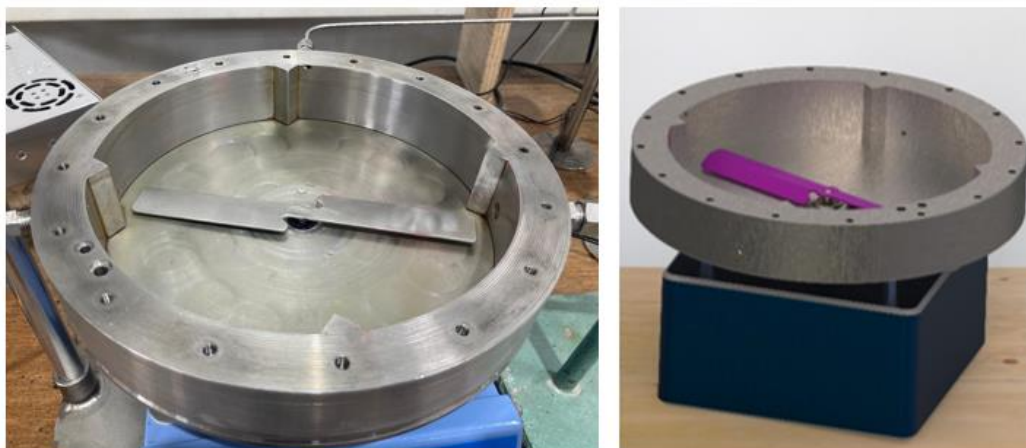


Figura 4-13. Fotorreactor modificado para agitación mecánica (izquierda) y diseño modelado en software Ansys SpaceClaim (derecha)

Las pruebas preliminares de funcionamiento del sistema propuesto se realizaron con el reactor abierto y sin solución acuosa, para así evaluar el desempeño del acople efectuado entre el motor del equipo modificado y los componentes diseñados. Luego de algunas horas de operación y de un funcionamiento ininterrumpido se pudo notar una alta estabilidad del sistema. Sin embargo, se advirtió un sobrecalentamiento en la carcasa del equipo (SH-3) y por ende del motor. Es así, que se optó por incluir un ventilador adicional al sistema de convección forzada ya implementado anteriormente, pero que estuviese focalizado a la altura del equipo. De esta forma, se consiguió mantener una temperatura de operación del motor controlada, pudiendo así prevenir fallas ocasionadas por un sobrecalentamiento.

Por otro lado, dado que el equipo agitador funciona con un potenciómetro rotativo para ajustar la velocidad de giro del motor, es que se realizaron pruebas para determinar las revoluciones por minuto alcanzadas por el agitador instalado. Para realizar las pruebas de medición, se dispuso de un tacómetro láser digital suspendido sobre el reactor mediante un soporte y una pinza de sujeción. A su vez, se adhirió a la cara superior del aspa de agitación una sección de cinta reflectante, lo que permite efectuar la medición de velocidad de giro a distancia, debido a que el haz de luz infrarrojo emitido por el tacómetro es reflejado. De esta forma, se tuvo como criterio de evaluación, determinar la velocidad angular máxima de trabajo que pudiese garantizar una altura óptima de la concavidad en la capa superficial del agua, permitiendo así no sobrepasar los puertos de gas. Así, se determinó una velocidad angular de operación de 250 ± 10 [rpm].



Figura 4-14. Sistema de agitación mecánico sometido a medición de velocidad angular mediante un tacómetro láser digital.

Por su parte, la hermeticidad del sello de caucho utilizado en el sistema fue verificada para un tiempo de operación de 8 horas, donde se dispuso agua dentro del reactor la que fue sometida a una agitación de 250 [rpm]. Cabe destacar que, para asegurar un funcionamiento libre de filtraciones, el eje del aspa se debe alinear cuidadosamente con el conector cilíndrico, dado que cualquier desalineación entre los componentes provocará un giro con cierto grado de inclinación, generando desgastes en el sello y por ende fugas del líquido en agitación. Asimismo, es fundamental mantener lubricadas las superficies de contacto entre el sello y el eje.

Luego de haber establecido las condiciones de operación adecuadas para el sistema de agitación propuesto, se procedió a evaluar su capacidad de mantener partículas de fotocatalizador en suspensión y constante movimiento, como también el desempeño en contrarrestar el efecto de sedimentación y acumulación de éstas durante un tiempo de operación determinado.

Para ello, se utilizó una solución de agua y sulfuro de cadmio (CdS) como fotocatalizador, la que fue preparada en tres concentraciones diferentes 0,5 [gL⁻¹], 1,0 [gL⁻¹] y 2,0 [gL⁻¹]. Para la realización de las pruebas, el reactor vacío fue cerrado con la ventana de acrílico, pero no de forma hermética, pues la producción de hidrógeno y una eventual fuga de éste, no corresponde al objetivo de este ensayo en particular. Una vez cerrado, se puso en marcha el sistema agitador a la velocidad angular definida anteriormente (250 [rpm]). Paralelamente, dentro del matraz Erlenmeyer ubicado en la zona 1 del set-up experimental (Figura 4-1) se dispuso la solución acuosa con su respectiva concentración de catalizador. Al interior del matraz, la solución se mantuvo bajo agitación magnética para ser traspasada simultáneamente al reactor, el que ya se encontraba previamente en agitación para así minimizar el efecto de sedimentación de las

partículas. La transferencia de 1 [L] de solución desde el matraz hacia la cámara de reacción del reactor se realizó por medio de la bomba peristáltica. Una vez completado el volumen de trabajo dentro del reactor, se dejó transcurrir un tiempo de 5 [min], para luego realizar la toma de muestras de la solución en agitación mecánica. Para ello, se accedió de forma vertical por los puertos destinados para las sondas de temperatura y pH. Asimismo, para poseer un espectro experimental más amplio, se determinaron dos alturas de toma de muestra, correspondientes a 10 [mm] y 5 [mm]. Ambas alturas están definidas como la distancia comprendida entre el punto de succión de la solución y el fondo de la cámara de reacción. Las muestras extraídas se dispusieron en tubos previamente rotulados en base a la nomenclatura definida en la Tabla 4. Cabe destacar que, el proceso descrito anteriormente fue replicado para cada uno de los ensayos realizados en base a las concentraciones de solución definidas inicialmente

Tabla 4. Nomenclatura utilizada para toma de muestras en pruebas efectuadas al sistema de agitación propuesto.

Tubo N°	Concentración inicial [gL ⁻¹] X, Y, Z	Altura de muestra [mm] A, B	Nomenclatura
1	1,0	10,0	1XA
2			2XA
3		5,0	3XB
4			4XB
5	0,5	10,0	5YA
6			6YA
7		5,0	7YB
8			8YB
9	2,0	10,0	9ZA
10			10ZA
11		5,0	11ZB
12			12ZB

Los tubos de muestra fueron llevados al Laboratorio de Biocatálisis de la Escuela de Ingeniería Bioquímica perteneciente a la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), donde se sometieron a una medición de concentración, obteniendo así los resultados expuestos en la Tabla 5. Asimismo, en la Figura 4-15 se aprecia una comparación entre las concentraciones iniciales y las obtenidas experimentalmente, para cada altura de muestra.

Tabla 5. Resultados de concentración experimental obtenidos con una agitación de 250 [rpm].

Muestra	Concentración experimental [gL ⁻¹]	Concentración experimental	
		promedio en altura de muestra [gL ⁻¹]	Desviación estándar
1XA	0,61	0,61	0,01
2XA	0,62		
3XB	0,64	0,65	0,00
4XB	0,65		
5YA	0,33	0,32	0,01
6YA	0,31		
7YB	0,37	0,36	0,00
8YB	0,36		
9ZA	1,19	1,20	0,02
10ZA	1,22		
11ZB	1,26	1,44	0,24
12ZB	1,61		

De los datos exhibidos se desprende que, para una velocidad de giro de 250 [rpm] establecida para el sistema de agitación mecánico, se logró mantener entre un 60% y un 73% de las concentraciones iniciales dispuestas en la cámara de reacción, para cada altura de muestra definida previamente.

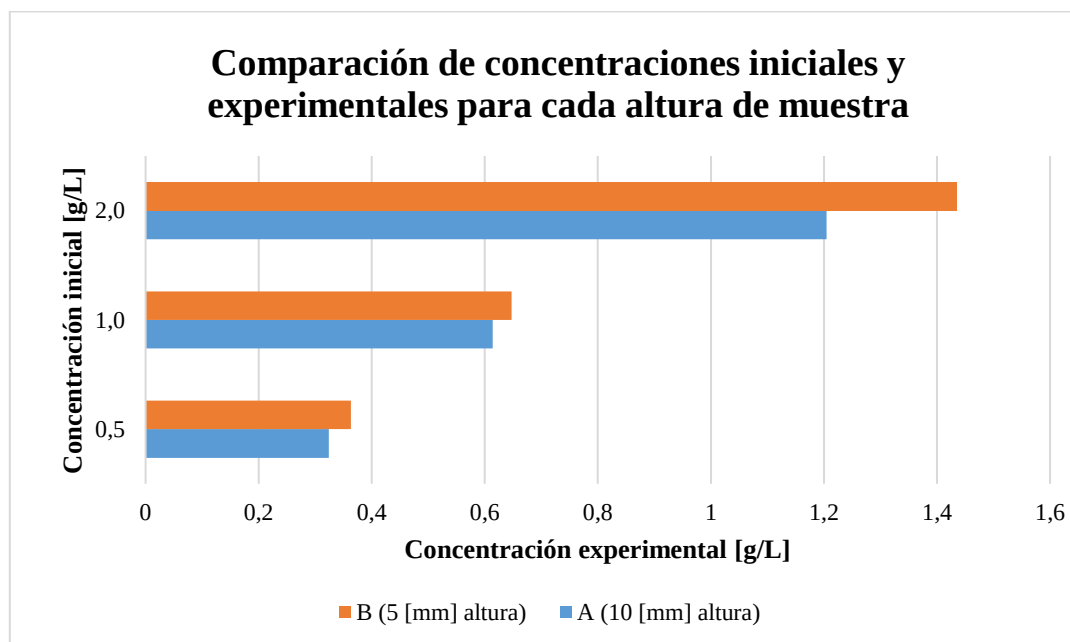


Figura 4-15. Concentraciones experimentales para dos alturas de medición

4.4. Sistema de recuperación de hidrógeno

Dado que en la experimentación para producción fotocatalítica de hidrógeno se han reportado tasas de obtención que oscilan en pequeños rangos^[59, 71, 72, 76], es que surge el desafío de evaluar si el hidrógeno producido dentro del volumen de cabeza del fotorreactor podrá recorrer de forma autónoma el set-up desarrollado, para finalmente disponerse en la zona de recolección. Para ello, como método de recuperación de hidrógeno se propone un proceso de arrastre mediante la utilización de un gas inerte.

4.4.1. Propuesta e implementación

Mediante el manejo de un equipo electrolizador PEM y su respectiva curva de operación determinada experimentalmente (Figura 4-16), se simulará un escenario de producción de hidrógeno dentro de la cámara de reacción del fotorreactor para así lograr evaluar su comportamiento en la configuración experimental propuesta. Las pruebas efectuadas, se llevaron a cabo a través de un flujo de hidrógeno que fue determinado en base a la curva de operación descrita, el que una vez dispuesto dentro del volumen de cabeza del reactor, fue sometido a un proceso de arrastre con gas nitrógeno (N₂).

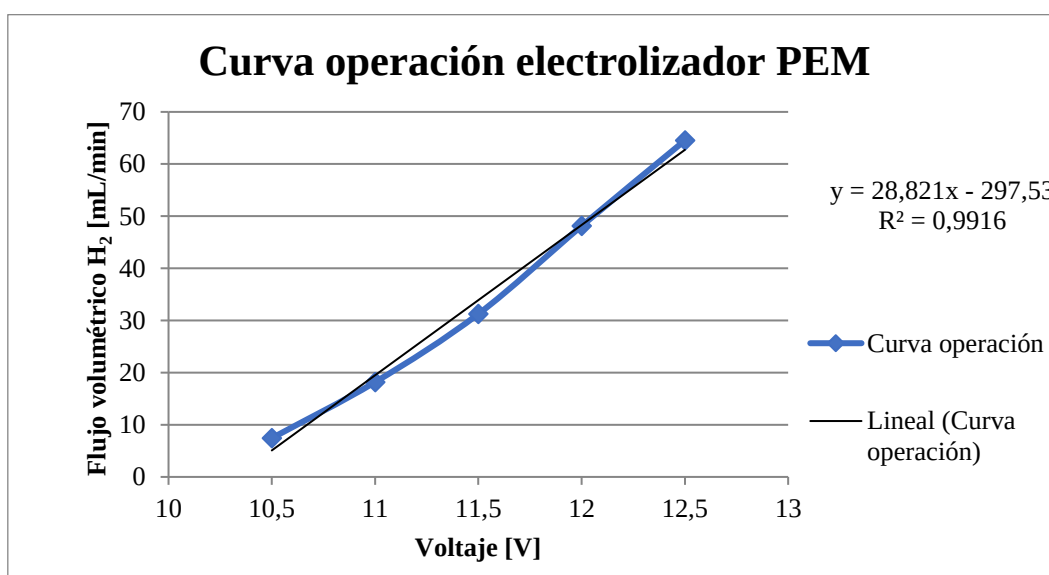


Figura 4-16. Curva de operación para un electrolizador PEM determinada experimentalmente para variaciones de voltaje [V] y su respectiva medición de flujo volumétrico de hidrógeno producido [mL/min].

En primer lugar y dado a los requerimientos de este ensayo, se realizó un acondicionamiento temporal respecto de la configuración experimental original (Sección 4.1). Para este fin, los puntos de acceso hacia reactor provenientes de la válvula de 3 vías (1) se dispusieron de una forma diferente (Figura 4-17 y Figura 4-18). Para ello, se mantuvo la conexión al tanque de nitrógeno definida originalmente (2), pero la vía restante se asignó para dar ingreso al flujo de hidrógeno

producido por el electrolizador (3). Asimismo, para dar funcionamiento al electrolizador PEM (4), este fue conectado a una fuente de poder Ele-tech HY3003E-3. Adicionalmente, la bolsa de muestra de gases ubicada en la zona final del set-up experimental fue retirada y el extremo de la línea ahora libre fue sumergido en una probeta con agua (9), pudiendo así tener un control visual del flujo de salida mediante el efecto de burbujeo ocasionado.



Figura 4-17. Configuración experimental acondicionada para ensayos de recuperación de hidrógeno

Adicionalmente, las mediciones de captación de hidrógeno que permitieron evaluar el comportamiento del gas fueron efectuadas en el sistema acumulador (Figura 4-3) por medio de un instrumento detector de gases Multigas GS-400 JUMTEC (6). Este instrumento fue conectado herméticamente al acumulador a través de la vía de acceso diseñada para ello (7). Cabe señalar que el frasco desecador de gases (8) también se incluyó en la línea de trabajo. De este modo, se dio comienzo a los ensayos que se llevaron a cabo de acuerdo con la modalidad descrita a continuación.

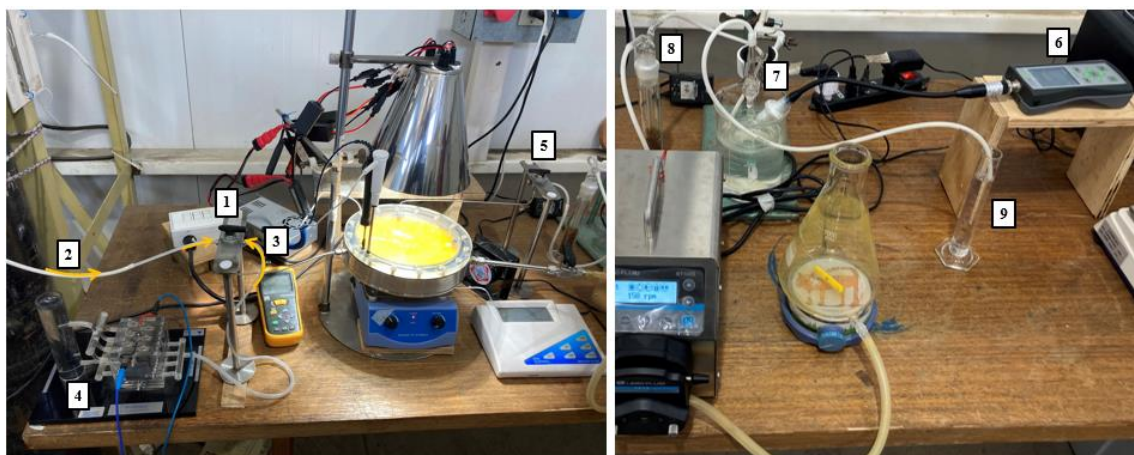


Figura 4-18. Vista en detalle de configuración experimental acondicionada para ensayos de recuperación de hidrógeno. Se señala: (1) válvula de 3 vías, (2) flujo de nitrógeno, (3) flujo de hidrógeno producido por proceso de electrólisis, (4) electrolizador PEM, (5) válvula de salida de gas desde el fotorreactor (6) instrumento detector de gases (7) vía de conexión entre acumulador y detector de gases, (8) frasco desecador de gases y (9) probeta.

Primeramente, para lograr simular el volumen de cabeza en el reactor que se generaría en condiciones normales de operación, se dispuso de 1 [L] de agua dentro de la cámara de reacción para luego proceder a cerrar herméticamente. Una vez sellado el fotorreactor, se realizó un proceso de purgado con un flujo constante de nitrógeno durante 15 minutos^[77], el que se aplicó a lo largo de todo el set-up experimental a fin de conseguir una atmósfera inerte de trabajo. A continuación, se llevó a cabo la puesta en marcha del electrolizador PEM para un voltaje de operación de 11 [V]. Una vez estabilizado se dio paso al flujo de hidrógeno proveniente de la electrólisis, mediante la apertura de la válvula de 3 vías por un tiempo de 2 segundos. De esta forma y con bases en la curva de operación del electrolizador (Figura 4-16), se consigue ingresar a la cámara de reacción un volumen de 0,6 [mL] de H₂.

Subsiguientemente, por medio de gas nitrógeno se dio inicio al proceso de arrastre del volumen de hidrógeno dispuesto dentro de la cámara de reacción. Una vez abierta la válvula de 3 vías para dar paso al flujo de nitrógeno, se comenzó a cronometrar el tiempo de operación y simultáneamente a visualizar las lecturas otorgadas por el instrumento detector de gases. Asimismo, se verificó la salida de flujo de gas a través del burbujeo en la probeta ubicada al final de la línea. Como ya se ha mencionado, las mediciones de detección de hidrógeno fueron efectuadas por una vía de acceso directa al acumulador, lo que implicaba que la lectura registrada por el sensor del instrumento correspondía a la concentración de hidrógeno presente en el flujo de gases, el que era arrastrado en vías de salida hacia el final del set-up experimental.

De esta forma, el procedimiento descrito se estructuró en una iteración de tres ensayos experimentales, donde se recopilaron los datos mostrados en el gráfico de concentración de H₂

versus tiempo de la Figura 4-19. Para ello, se dispuso de un flujo constante de arrastre con nitrógeno durante un tiempo de 40 minutos y un periodo de registro para las mediciones de detección de hidrógeno cada 2 minutos.

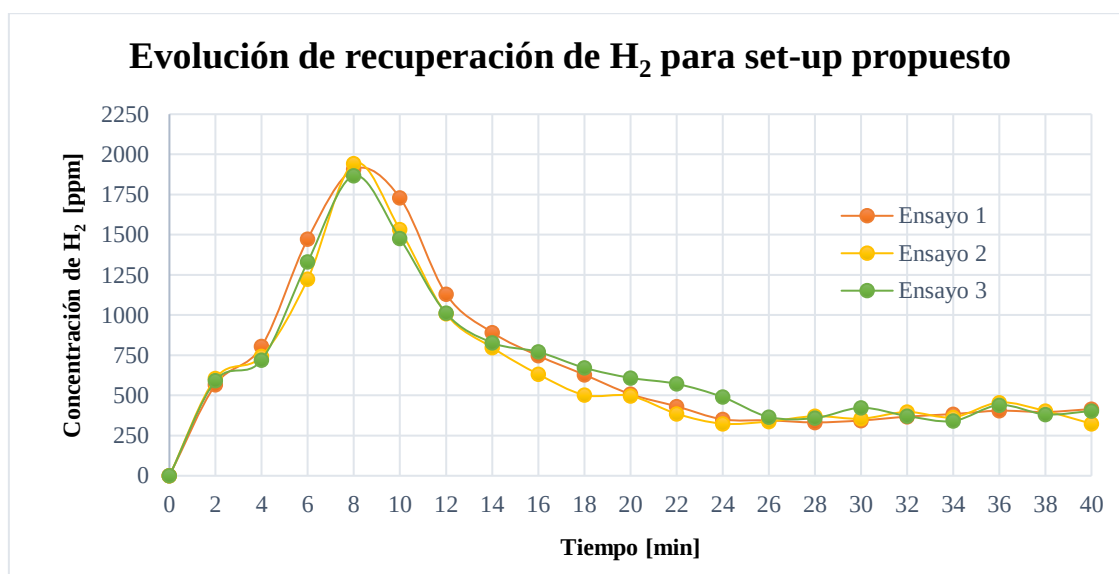


Figura 4-19. Evolución en el tiempo de la recuperación de hidrógeno experimental para tres ensayos con punto de medición en set-up propuesto.

En los tres ensayos desarrollados para evaluar la evolución en la recuperación de hidrógeno experimental, se pudo observar en un transcurso de tiempo dado, un comportamiento similar para todos los casos. En los primeros 6 minutos se constató un incremento de la concentración de hidrógeno, la que al cumplir los 8 minutos alcanzó un nivel máximo, el que fue cercano a los 1900 [ppm] para los tres casos ilustrados. En los minutos siguientes, la concentración comenzó a descender indicando que el hidrógeno efectivamente estaba siendo arrastrado por medio del nitrógeno, permitiendo así su salida desde el fotorreactor. Asimismo, un indicador claro de una recuperación total del hidrógeno estaría dada por una lectura de detección igual a cero del instrumento de medición utilizado. Sin embargo, a pesar de que el flujo de hidrógeno fue disminuyendo a lo largo del tiempo, durante los últimos 15 minutos de registro se observó un comportamiento inusual en los valores de concentración de H₂. Estos valores se mantuvieron en una fluctuación constante, oscilando entre 320 y 460 [ppm], sin llegar a cero.

Debido al comportamiento reiterativo observado en los tres ensayos descritos anteriormente, es que se optó por realizar una ronda adicional con tres repeticiones, pero esta vez en una configuración sin componentes que pudiesen obstaculizar el paso de gas. Por esta razón, se decidió modificar la zona de medición del instrumento detector de gases. Para ello, se efectuó la desconexión de la parte final del set-up experimental, posicionando así el detector de gases directamente a la salida de la válvula de evacuación de gas desde el fotorreactor (componente (5) referenciado en Figura 4-18). A excepción de esta modificación, los ensayos se llevaron a cabo

bajo la misma metodología ya descrita, obteniendo así una nueva recopilación de datos los que se muestran en el gráfico de la Figura 4-20.

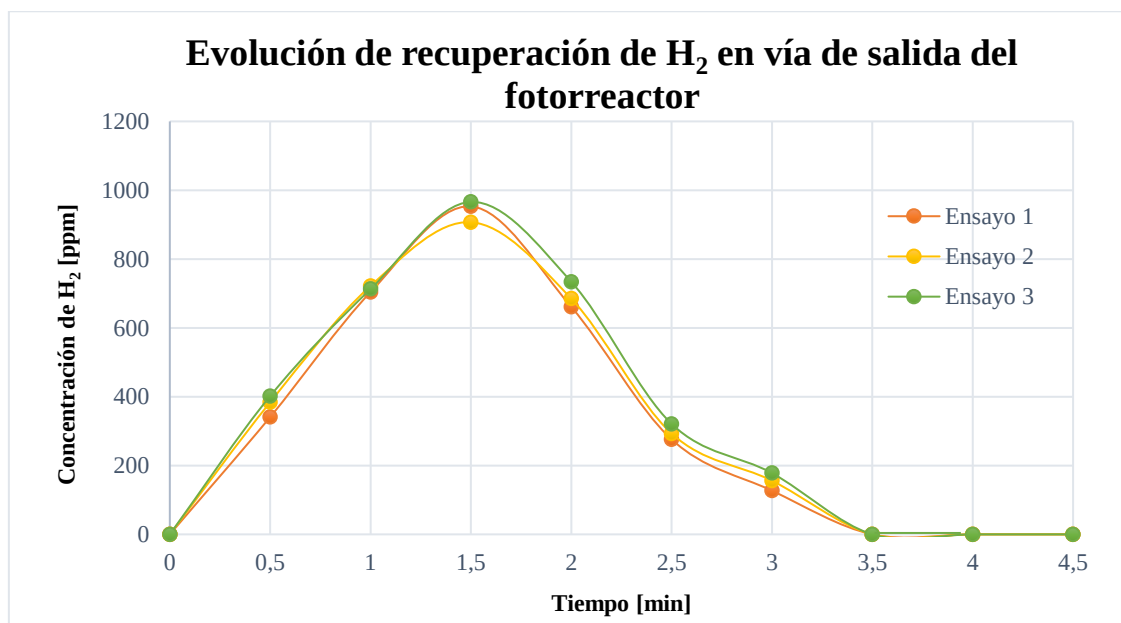


Figura 4-20. Evolución en el tiempo de la recuperación de hidrógeno experimental para tres ensayos con punto de medición en vía de salida de gas desde el fotorreactor.

Para los datos registrados en esta nueva fase experimental, se pudo apreciar un comportamiento parcialmente similar al de la ronda inicial, donde en el transcurso de los primeros minutos se generó un incremento paulatino de los valores de concentración de hidrógeno, alcanzando posteriormente un valor máximo para luego comenzar a decrecer. No obstante, en esta ocasión se logró registrar una recuperación total de hidrógeno mediante el arrastre con nitrógeno, lo que se vio reflejado en las lecturas de medición de concentración iguales a 0 [ppm] para el último tramo de tiempo observado.

Cabe señalar que, para ambas rondas experimentales se replicaron las mismas condiciones de operación. Por un lado, el volumen inicial de hidrógeno ingresado a la cámara de reacción correspondiente a 0,6 [mL], y por otro, el flujo constante de nitrógeno como medio de arrastre. Ahora bien, se pueden observar algunas diferencias adicionales entre los gráficos presentados, donde para la segunda ronda experimental se puede apreciar un tiempo de recuperación de hidrógeno total menor, correspondiente a 4,5 minutos. Asimismo, los niveles máximos de concentración alcanzados (cerca de 1000 [ppm]) son menores en comparación a los advertidos en la ronda inicial.

4.5. Integración de sistemas propuestos

A partir de la configuración experimental propuesta, en conjunto con los sistemas desarrollados y sus respectivas mejoras de operación, es que se llevó a cabo la integración y puesta en marcha de un sistema fotocatalítico de producción de hidrógeno verde. El montaje de este proyecto, como ya se ha mencionado, se estableció en el Laboratorio de Energías Renovables del Departamento de Ingeniería Mecánica, el que posee sus instalaciones en la sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María.

4.5.1. Puesta en marcha

Para dar un funcionamiento inicial al sistema planteado y lograr así implementar un proceso experimental para la producción de hidrógeno verde, se llevó a cabo una propuesta basada en la división parcial de la molécula de agua (Ecuación 3). Para ello, en el proceso experimental de producción de hidrógeno fotocatalítico se utilizó sulfuro de cadmio (CdS) como catalizador en presencia de una mezcla de agentes de sacrificio, correspondientes a sulfuro de sodio (Na_2S) y sulfito de sodio (Na_2SO_3), dado que estos últimos permiten reducir la recombinación electrón-hueco.

Se optó por esa combinación, debido a que el sulfuro de cadmio posee una banda prohibida (E_g) de 2,2 [eV] a 2,4 [eV] y se destaca por mostrar una alta actividad fotocatalítica en presencia de reactivos de sacrificio. Asimismo, ha sido ampliamente estudiado como un fotocatalizador sensible a la luz visible.^[78] Cabe señalar, que el catalizador empleado posee un formato en polvo con una disposición de partículas irregulares, es decir, con presencia de ciertas aglomeraciones. Por esta razón, con el objetivo de reducir dicha aglomeración se decidió integrar como parte de las etapas de desarrollo experimental, un proceso de sonicación que permita separar las partículas de catalizador y conseguir una dispersión uniforme de éstas dentro del medio líquido. Para ello se utilizó un equipo ultrasónico de 46 [kHz] con un tiempo de trabajo distribuido en 3 ciclos de 600 segundos cada uno.

Una vez dispuesto el set-up propuesto en conjunto con todos sus componentes (Figura 4-2), se procedió a cerrar herméticamente el fotorreactor con su cámara de reacción vacía. Luego, se realizó una purga con nitrógeno durante 15 minutos^[77] a lo largo de toda la línea de trabajo, generando así condiciones inertes para la operación.

Se dispuso de una solución acuosa previamente sometida a sonicación, en base a 1 [L] de agua desionizada y catalizador (CdS) con una concentración de 1 [g L^{-1}]. En ella se adicionaron 17 [mg L^{-1}] y 20 [mg L^{-1}] de Na_2S y Na_2SO_3 , respectivamente.^[79]

Dado que una agitación efectiva de la solución favorece la reacción fotocatalítica, se definió una metodología de trabajo que disminuyera la acumulación y sedimentación de las partículas de catalizador. Para ello, el método empleado para realizar el traspaso de la solución acuosa desde la zona 1 a la zona 2 (Figura 4-1), se llevó a cabo de forma análoga al procedimiento efectuado para los ensayos de toma de muestras ya descrito en la sección 4.3.2. Una vez completado el proceso y dispuesto el volumen de trabajo correspondiente dentro de la cámara de reacción bajo agitación, se procedió a encender el sistema de iluminación. Cabe mencionar que la pantalla concentradora se posicionó a 130 [mm] de la superficie del reactor



Figura 4-21. Solución acuosa dispuesta bajo agitación en cámara de reacción del fotorreactor.

Adicionalmente, se puso en funcionamiento el sistema de convección forzada, el que contribuye a mantener una temperatura de operación estable y dentro de los rangos de trabajo deseados (25 ± 5 °C). Por un lado, los ventiladores dispuestos en la zona de iluminación evitan que la ventana de acrílico se empañe debido a un aumento de temperatura en la solución acuosa, lo que es causado por el calor transferido desde las ampollitas a la superficie del reactor. Se busca evitar el efecto de empañamiento, dado a la obstaculización que este provoca en la absorción de luz por parte de las partículas de catalizador. Por otro lado, el ventilador posicionado al nivel del equipo de agitación permite disipar el calor de este, mitigando así un eventual sobrecalentamiento del motor.

De esta manera, bajo las condiciones ya descritas, se llevó a cabo la puesta en marcha de la integración del sistema para un tiempo de operación de 8 horas continuas. Durante el transcurso de la experimentación, se monitorearon las variables de temperatura y pH con sus respectivos equipos de medición.

Una vez finalizado el periodo de operación ya definido, se procedió a verificar la presencia de hidrógeno en el sistema de acumulación. Para ello, se efectuaron mediciones por medio del equipo detector de gases, obteniendo así los resultados mostrados en la Figura 4-22.

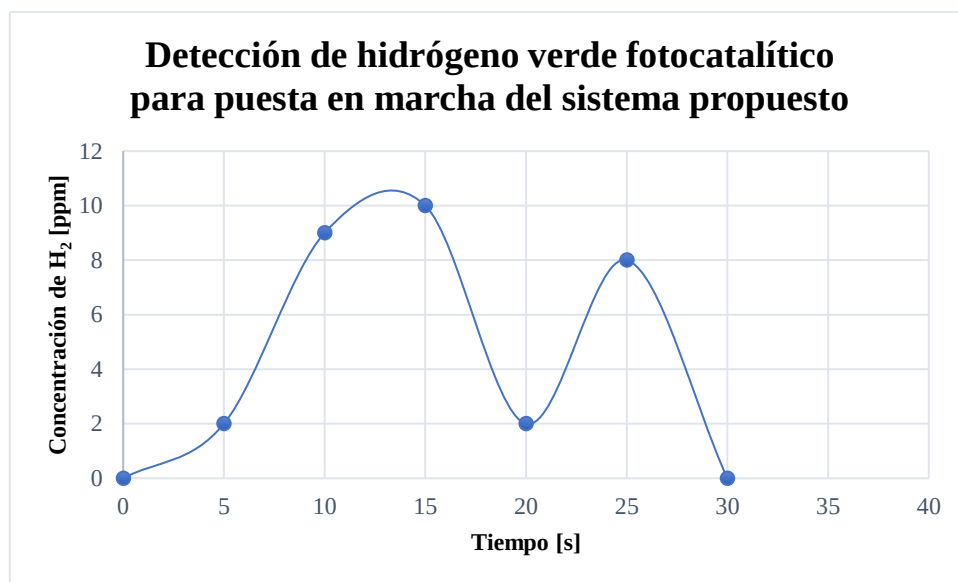


Figura 4-22. Detección de hidrógeno verde fotocatalítico para puesta en marcha del sistema propuesto, en base a mediciones efectuadas en sistema de acumulación.

En función de los datos recopilados, se pudo corroborar la presencia de hidrógeno producido a partir de la división fotocatalítica parcial del agua. Es importante señalar, que el propósito de la puesta en marcha desarrollada era verificar la estabilidad de la configuración experimental propuesta una vez integrados cada uno de sus componentes, por un tiempo de operación ininterrumpido. A su vez, se evaluó la capacidad de generación de hidrógeno del sistema para un proceso fotocatalítico de disociación parcial del agua. Si bien se consigue verificar una obtención de hidrógeno bajo las condiciones ya descritas, cabe destacar que las mediciones efectuadas fueron sustentadas para un volumen de hidrógeno acumulado a lo largo de las horas de operación del sistema, y no en base a un registro continuo para un flujo de hidrógeno estable y constante.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cada uno de los sistemas propuestos, junto a su respectiva implementación y desarrollo de mejoras en sus condiciones de operación, permitieron diseñar una configuración experimental para la producción de hidrógeno verde fotocatalítico.

Por un lado, el nuevo arreglo eléctrico implementado a partir de una fuente de poder de 12 [V] proporcionó un funcionamiento estable del sistema de iluminación. Asimismo, a partir de las pruebas realizadas a la fuente de luz, tanto en mediciones de espectro como de irradiancia, se pudo verificar una caracterización equivalente a la ya registrada en la primera fase de este proyecto^[75]. Para el caso del espectro de luz, se obtuvieron cuatro picos de intensidad, correspondientes a 432, 450, 532 y 542 [nm] los que poseen una alta similitud a los ya registrados en la primera fase (432, 448, 531 y 542 [nm]). A su vez, en ambos casos se aprecia una amplia presencia de longitudes de onda contenidas dentro del espectro de luz visible, como también una porción de luz ultravioleta (Figura 4-6). Con respecto al caso de mayor irradiancia, donde se dispone la fuente de luz a 130 [mm] sobre la superficie del reactor, se obtuvo un valor de irradiancia total promedio de 267,4 [Wm⁻²] coincidente con el registro original de 267,5 [Wm⁻²] y que a su vez, es comparable con otras investigaciones.^[80]

Por su parte, las modificaciones desarrolladas en el sistema de agitación se basaron en una transición desde un diseño magnético a uno mecánico, lo que permitió eliminar las aleatoriedades en la operación de este y conseguir un funcionamiento ininterrumpido y constante de al menos 8 horas. En función de las pruebas efectuadas para evaluar la capacidad de agitación del sistema y los respectivos valores de concentración experimental obtenidos, indican que para una velocidad de agitación (250 ± 10 [rpm]), puntos de toma de muestra (A; B) y tiempo determinado, se consigue mantener entre un 60% y 73% de la concentración inicial dispuesta en el reactor. De ello se desprende, que el mecanismo de agitación implementado favorece el movimiento y suspensión de las partículas de catalizador estudiado, reduciendo en gran medida el efecto de sedimentación. No obstante, se puede apreciar que los valores de concentración experimental registrados fueron superiores para el caso de altura de muestra B (más cercana a la base del fotorreactor), lo que evidencia que, a pesar de la turbulencia del flujo, algunas partículas tenderán a precipitar y a acumularse en el fondo de la cámara de reacción (Figura 4-15).

Por otro lado, durante las pruebas desarrolladas por medio de un electrolizador PEM para el sistema de recuperación de hidrógeno propuesto, se analizó el comportamiento de salida del gas en dos configuraciones diferentes. Para el caso donde se consideró el recorrido de hidrógeno a lo largo de todo el set-up experimental (Figura 4-19), se pudo observar que los valores de concentración de H₂ proporcionados por el equipo detector de gases no evidenciaron una evacuación completa de este. Incluso después de haber transcurrido un periodo de medición de

40 minutos, los valores registrados no llegaron a cero. Asimismo, fue posible advertir un efecto de oscilación en los datos proporcionados durante los últimos 15 minutos de medición, lo que se puede atribuir a una obstaculización en la expulsión del gas causada por el sistema.

Para el segundo caso, donde se evaluó la recuperación de hidrógeno directamente en la vía de salida de gas del fotorreactor (Figura 4-20), se logró una evacuación de hidrógeno sin inconvenientes, corroborando que los componentes ubicados en la zona final del set-up experimental (acumulador y frasco desecador, incluidos en el primer caso) no favorecen la salida del gas. Además, cabe señalar que a pesar de haber dispuesto un mismo volumen de hidrógeno inicial (0,6 [mL]) para ambas rondas experimentales, se constató que los valores de medición de concentración de H_2 fueron mayores en el primer caso. Es así, que el efecto de obstrucción identificado en la primera configuración puede ocasionar una acumulación de hidrógeno, la que a su vez genera incrementos en la concentración de gas dentro del volumen de medición y de esta forma, causa lecturas de medición superiores en comparación con el segundo caso estudiado.

Finalmente, la puesta en marcha de la configuración propuesta permitió validar la integración de los sistemas desarrollados. De este modo, durante un periodo de operación de 8 horas se llevó a cabo un proceso experimental para la producción de hidrógeno verde, logrando detectar la presencia de éste (Figura 4-22). Sin embargo, se debe tener en consideración que a diferencia de las muestras de gas obtenidas para producción de hidrógeno fotocatalítico correspondientes a otras investigaciones^[71, 72, 76], en esta ocasión no se logró recolectar una cantidad de hidrógeno manejable que posibilitara un análisis posterior, para así determinar una tasa de producción del sistema por medio de cromatografía gaseosa. Además, cabe destacar que las mediciones efectuadas se basan en el principio de corroborar la presencia de hidrógeno a partir de una acumulación de gas durante un periodo de operación determinado y, por ende, no corresponde a un sistema de producción bajo un flujo continuo de hidrógeno.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de una profunda revisión bibliográfica, se logró comprender los fundamentos del fenómeno físico referente al proceso de disociación fotocatalítico del agua, como también definir las principales variables y factores determinantes referentes a la actividad fotocatalítica y a configuraciones experimentales diseñadas para ello. Bajo estos principios, se llevó a cabo el desarrollo, evaluación y puesta en marcha de un sistema experimental para la producción de hidrógeno verde.

Se implementó un sistema de iluminación adecuado para el set-up experimental propuesto, donde por medio de la instalación de un nuevo arreglo eléctrico se logró proporcionar estabilidad de funcionamiento. A su vez, por medio de la caracterización de la fuente de luz, se identificó que ésta comprende un espectro de luz visible y ultravioleta. Asimismo, se determinó una irradiancia total promedio de $267,4 \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$.

Adicionalmente, se estableció un diseño de agitación mecánica que otorgó un funcionamiento ininterrumpido del sistema de al menos 8 horas, lo que permitió eliminar la aleatoriedad presente en la primera fase de este proyecto causada por la influencia de la fuerza magnética. Se determinó una velocidad angular máxima de trabajo de $250 \pm 10 \text{ [rpm]}$, que pudiese garantizar una altura óptima de la concavidad en la capa superficial del agua, permitiendo así no sobrepasar los puertos de gas del fotorreactor. Además, por medio de mejoras considerables en la estabilidad del proceso agitación, se consigue reducir el efecto de sedimentación para un líquido con material en suspensión, lo que asegura condiciones favorables para la producción de hidrógeno verde.

En base a pruebas experimentales con un electrolizador PEM, se desarrolló un sistema de recuperación de hidrógeno por medio de una metodología de arrastre con nitrógeno, donde se evaluó el comportamiento de salida de hidrógeno para dos configuraciones experimentales diferentes.

Por medio de la integración de los sistemas propuestos se efectuó la puesta en marcha del presente desarrollo experimental. A partir de una propuesta de producción de hidrógeno fotocatalítico con bases en la disociación parcial de la molécula de agua, se utilizó sulfuro de cadmio como catalizador en presencia de una mezcla de agentes de sacrificio, correspondientes a sulfuro de sodio y sulfito de sodio. De esta manera, una vez transcurrido un tiempo de experimentación de 8 horas se efectuaron mediciones de detección de hidrógeno para un volumen determinado de acumulación de gas, comprobando la presencia de hidrógeno verde.

En el ámbito de la propuesta implementada durante el transcurso de este proyecto, fue posible identificar oportunidades de mejora las que podrían favorecer el desempeño del sistema en un futuro. A pesar de la alta estabilidad alcanzada en el sistema de agitación desarrollado, se debe

tener en consideración que una eventual desalineación entre los mecanismos diseñados provocará en el eje de giro un cierto grado de inclinación, generando desgastes en el sello de caucho y, por ende, fugas del líquido en agitación. Es por ello que, una alternativa de solución consiste en incorporar un diseño enfocado en una concentricidad fija de los componentes, empleando por ejemplo, rodamientos de bolas.^[81]

Con respecto a las observaciones realizadas en el sistema de recuperación de hidrógeno, la obstaculización de la salida de gas es probablemente causada por los componentes ubicados en el tramo final del set-up propuesto, lo que se puede atribuir a la geometría del dispositivo acumulador de gases. Por ello, es recomendable reevaluar su diseño idealmente sustentado en un análisis CFD que permita visualizar el comportamiento de la mezcla de gases, teniendo en consideración las propiedades inherentes del hidrógeno y nitrógeno. Es importante tener en cuenta que, el objetivo del acumulador ya diseñado es mantener un control visual y verificar la generación de hidrógeno localmente durante las corridas experimentales.

Finalmente, se sugiere realizar nuevas rondas experimentales que permitan evaluar otros tipos de fotocatalizadores y nuevas combinaciones de agentes de sacrificio compatibles con las condiciones de operación desarrolladas, como también complementar las metodologías de trabajo propuestas. Lo anterior, con el fin de recolectar una cantidad manejable de hidrógeno producido por medio de la disociación fotocatalítica parcial de la molécula de agua, favoreciendo así un análisis detallado de las muestras obtenidas.

Referencias

- [1] BP, "Statistical Review of World Energy ", 2022. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- [2] N. S. Pratik and B. V. Babu, "Production of hydrogen energy through biomass (waste wood) gasification," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 19, pp. 10803-10810, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.009>.
- [3] S. Surbhi, B. Soumen, P. S. Nagaraj, and M. A. Tejjraj, "Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy," *Science of The Total Environment*, vol. 713, p. 136633, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>.
- [4] K. Ilgi Karapinar and K. Fikret, "Bio-hydrogen production from waste materials," *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 569-582, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015>.
- [5] H. Seyed Ehsan and W. Mazlan Abdul, "Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 850-866, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>.
- [6] O. Edenhofer *et al.*, Eds. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [7] IEA, "Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021," Paris, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>
- [8] IEA, "Energy Technology Perspectives 2020," Paris, 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- [9] ONU. (2015). *Acuerdo de París*. [Online] Available: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

- [10] ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. [Online] Available: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/70/L.1&Lang=S
- [11] IEA, "Renewables 2020 - Analysis and forecast to 2025," Paris, 2020. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf
- [12] I. J. Pérez-Arriaga and C. Batlle, "Impacts of Intermittent Renewables on Electricity Generation System Operation," *Economics of Energy and Environmental Policy*, vol. 1, 2012.
- [13] R. Vásquez and F. Salinas, "Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile," *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*, 2019.
- [14] IEA, "Global Hydrogen Review 2021," Paris, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- [15] C. Mansilla, C. Bourasseau, C. Cany, B. Guinot, A. L. Duigou, and P. Lucchese, "Hydrogen Applications: Overview of the Key Economic Issues and Perspectives," 2018.
- [16] C. Rashmi, S. Satanand, O. J. Olusola, and M. Sudip, "A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 443-462, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.019>.
- [17] S. Fernández and J. Jusmet, "Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: Algunos posibles escenarios futuros de emisiones," *Revista Galega de Economía*, vol. 19, 2010.
- [18] Ministerio de Energía de Chile. (2022). *Política Energética Nacional 2050, Actualización 2022*. [Online] Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf
- [19] Ministerio de Energía de Chile. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. [Online] Available:

https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

- [20] HIF. "Haru Oni." <https://www.hifglobal.com/es/haru-oni> (accessed 2022).
- [21] Enel. "Instalan la primera piedra del proyecto piloto para producir hidrógeno verde en Magallanes." Enel Green Power. <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/prensa/press-enel-green-power-chile/d202109-instalan-primer-piedra-proyecto-piloto-producir-hidrogeno-verde-en-magallanes.html> (accessed 2022).
- [22] J. I. L. Hurtado and B. Y. M. Soria, *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, 2007.
- [23] K. Rajeshwar, R. D. McConnell, K. W. Harrison, and S. Licht, "Renewable Energy and the Hydrogen Economy," 2008.
- [24] N. T. Stetson, S. McWhorter, and C. C. Ahn, "Introduction to hydrogen storage," pp. 3-25, 2016, doi: 10.1016/B978-1-78242-362-1.00001-8.
- [25] College of the Desert. (2001). *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Module 2: Hydrogen Use*. [Online] Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-cell-engines-and-related-technologies-course>
- [26] A. Züttel, "Hydrogen storage methods," *Naturwissenschaften*, vol. 91, no. 4, pp. 157-172, 2004/04/01 2004, doi: 10.1007/s00114-004-0516-x.
- [27] G. Valenti, "2 - Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage," *Woodhead Publishing Series in Energy*, pp. 27-51, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00002-X>.
- [28] S. Billur, L.-D. Farida, and H. Michael, "Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1121-1140, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>.

- [29] M. Lorena *et al.*, "Process design for green hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 12, pp. 7266-7277, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.206>.
- [30] I. Haris, D. Ibrahim, and C. Curran, "A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 62, pp. 26238-26264, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>.
- [31] Y. Minli, W. Ke, and V. Harrie, "Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 41, pp. 21261-21273, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>.
- [32] D. Ibrahim, "Green methods for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954-1971, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>.
- [33] C. Jun and Y. Hongmei, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production," *Chinese Journal of Catalysis*, vol. 39, no. 3, pp. 390-394, 2018, doi: [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8).
- [34] S and L. Hankwon, "An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13793-13813, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>.
- [35] S and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 442-454, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.
- [36] J. Mengdi and W. Jianlong, "Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 78, pp. 38612-38635, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>.
- [37] S. Z. Baykara, "Experimental solar water thermolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, no. 14, pp. 1459-1469, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.011>.

- [38] P.-B. Rodolfo, M.-R. José de Jesús, and R.-F. Elías, "Advances towards the understanding of microbial communities in dark fermentation of enzymatic hydrolysates: Diversity, structure and hydrogen production performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 54, pp. 27459-27472, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.016>.
- [39] C. Acar, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Review of photocatalytic water-splitting methods for sustainable hydrogen production," *International Journal of Energy Research*, vol. 40, no. 11, pp. 1449-1473, 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/er.3549>.
- [40] M.-B. Walter José *et al.*, "Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 286, p. 124970, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124970>.
- [41] A. Fujishima and K. Honda, "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode," *Nature*, vol. 238, no. 5358, pp. 37-38, 1972/07/01 1972, doi: 10.1038/238037a0.
- [42] R. M. Navarro Yerga, M. C. Alvarez Galván, F. J. O. del Valle, J. A. Villoria de la Mano, and J. L. G. Fierro, "Water splitting on semiconductor catalysts under visible-light irradiation," *ChemSusChem*, vol. 2 6, pp. 471-85, 2009.
- [43] C. Shuang, P. Lingyu, and C. Xiaobo, "Emerging Photocatalysts for Hydrogen Evolution," *Trends in Chemistry*, vol. 2, no. 1, pp. 57-70, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.06.009>.
- [44] C. Acar, I. Dincer, and C. Zamfirescu, "A review on selected heterogeneous photocatalysts for hydrogen production," *International Journal of Energy Research*, vol. 38, 2014, doi: 10.1002/er.3211.
- [45] R. J. C. J. Rodríguez, J. Solís, W. Estrada and M. A. Blesa, "El Fotocatalizador: Síntesis, Propiedades y Limitaciones," *Solar Safe Water, Tecnologías Solares Para la Desinfección y Descontaminación del agua*, pp. 135-152, 2006.
- [46] M. Andrew and Stephen, "An overview of semiconductor photocatalysis," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 108, no. 1, pp. 1-35, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(97\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(97)00118-4).

- [47] B. Y. Alfaifi, H. Ullah, S. Y. Alfaifi, A. A. Tahir, and T. K. Mallick, "Photoelectrochemical solar water splitting: From basic principles to advanced devices," 2018.
- [48] S. Chen, T. Takata, and K. Domen, "Particulate photocatalysts for overall water splitting," *Nature Reviews Materials*, vol. 2, p. 17050, 2017.
- [49] Z. Liwu, H. M. Hanan, D. Ralf, and B. Detlef, "Kinetics and mechanisms of charge transfer processes in photocatalytic systems: A review," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 13, no. 4, pp. 263-276, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.07.002>.
- [50] I. Tehmeena *et al.*, "A perspective on possible amendments in semiconductors for enhanced photocatalytic hydrogen generation by water splitting," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 79, pp. 39036-39057, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.165>.
- [51] Y. Li and S. C. E. Tsang, "Recent progress and strategies for enhancing photocatalytic water splitting," *Materials Today Sustainability*, vol. 9, p. 100032, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100032>.
- [52] Q. Wang and K. Domen, "Particulate Photocatalysts for Light-Driven Water Splitting: Mechanisms, Challenges, and Design Strategies," (in eng), *Chem Rev*, vol. 120, no. 2, pp. 919-985, Jan 22 2020, doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00201.
- [53] F. Opoku, K. K. Govender, C. G. C. E. van Sittert, and P. P. Govender, "Recent Progress in the Development of Semiconductor-Based Photocatalyst Materials for Applications in Photocatalytic Water Splitting and Degradation of Pollutants," *Advanced Sustainable Systems*, vol. 1, 2017.
- [54] Y. Chen, H. Yang, X. Liu, and L. Guo, "Effects of cocatalysts on photocatalytic properties of La doped Cd₂TaGaO₆ photocatalysts for hydrogen evolution from ethanol aqueous solution," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 7029-7035, 2010.
- [55] R. M. N. Yerga, M. C. Álvarez-Galván, F. Vaquero, J. Arenales, and J. L. G. Fierro, "Hydrogen Production from Water Splitting Using Photo-Semiconductor Catalysts," 2013.

- [56] S. Cao, C. J. Wang, W. F. Fu, and Y. Chen, "Metal Phosphides as Co-Catalysts for Photocatalytic and Photoelectrocatalytic Water Splitting," (in eng), *ChemSusChem*, vol. 10, no. 22, pp. 4306-4323, Nov 23 2017, doi: 10.1002/cssc.201701450.
- [57] J. Ran, J. Zhang, J. Yu, M. Jaroniec, and S.-z. Qiao, "Earth-abundant cocatalysts for semiconductor-based photocatalytic water splitting," *Chemical Society reviews*, vol. 43, no. 22, pp. 7787-812, 2014.
- [58] K. Maeda, K. Teramura, and K. Domen, "Development of Cocatalysts for Photocatalytic Overall Water Splitting on (Ga_{1-x}Zn_x)(N_{1-x}O_x) Solid Solution," *Catalysis Surveys from Asia*, vol. 11, no. 4, pp. 145-157, 2007/12/01 2007, doi: 10.1007/s10563-007-9032-2.
- [59] F. Nur and T. Muhammad, "A critical review in strategies to improve photocatalytic water splitting towards hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 2, pp. 540-577, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.200>.
- [60] K. Akihiko, "Development of photocatalyst materials for water splitting," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 2, pp. 197-202, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.050>.
- [61] J. Schneider and D. W. Bahnemann, "Undesired Role of Sacrificial Reagents in Photocatalysis," *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 4, pp. 3479-3483, 2013.
- [62] A. Galińska and J. Walendziewski, "Photocatalytic Water Splitting over Pt–TiO₂ in the Presence of Sacrificial Reagents," *Energy & Fuels*, vol. 19, pp. 1143-1147, 2005.
- [63] Z. Wang *et al.*, "Efficiency Accreditation and Testing Protocols for Particulate Photocatalysts toward Solar Fuel Production," *Joule*, vol. 5, no. 2, pp. 344-359, 2021/02/17/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.01.001>.
- [64] T. Takata *et al.*, "Photocatalytic water splitting with a quantum efficiency of almost unity," *Nature*, vol. 581, no. 7809, pp. 411-414, 2020/05/01 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2278-9.
- [65] N. Kim Hoong, L. Sin Yuan, C. Chin Kui, C. Yoke Wang, and C. Chi Cheng, "Photocatalytic water splitting for solving energy crisis: Myth, Fact or Busted?,"

Chemical Engineering Journal, vol. 417, p. 128847, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128847>.

- [66] G. Aayush, L. Blaž, J. Runia, C. Wairakpam Chinglembi, and S. Mahesh Kumar, "A review of hydrogen production processes by photocatalytic water splitting – From atomistic catalysis design to optimal reactor engineering," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 78, pp. 33282-33307, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.210>.
- [67] M. Qureshi and K. Takanabe, "Insights on Measuring and Reporting Heterogeneous Photocatalysis: Efficiency Definitions and Setup Examples," *Chemistry of Materials*, vol. 29, 2016, doi: 10.1021/acs.chemmater.6b02907.
- [68] J. M. Buriak, P. V. Kamat, and K. S. Schanze, "Best practices for reporting on heterogeneous photocatalysis," (in eng), *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 15, pp. 11815-6, Aug 13 2014, doi: 10.1021/am504389z.
- [69] M. Bouchy and O. Zahraa, "Photocatalytic reactors," *International Journal of Photoenergy*, vol. 5, p. 484067, 1900/01/01 2003, doi: 10.1155/S1110662X03000321.
- [70] L. Sandeep Kumar, R. Aswathy, T. P. Rugma, and B. Neppolian, "A review on particulate photocatalytic hydrogen production system: Progress made in achieving high energy conversion efficiency and key challenges ahead," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 152, p. 111694, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111694>.
- [71] M. Schwarze *et al.*, "Quantification of photocatalytic hydrogen evolution," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10.1039/C3CP50168J vol. 15, no. 10, pp. 3466-3472, 2013, doi: 10.1039/C3CP50168J.
- [72] H. Cunping, Y. Weifeng, T. R. Ali, and M. Nazim, "Development of efficient photoreactors for solar hydrogen production," *Solar Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 19-27, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.004>.
- [73] X. Zheng, Z. Xu, P. Jian, and W. Lianzhou, "On the engineering part of solar hydrogen production from water splitting: Photoreactor design," *Chemical Engineering Science*, vol. 104, pp. 125-146, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.08.039>.

- [74] X. Hu and L. Guo, "Numerical investigations of catalyst–liquid slurry flow in the photocatalytic reactor for hydrogen production based on algebraic slip model," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 13, pp. 7065-7072, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.162>.
- [75] C. Evensen, "Diseño e implementación de un reactor fotocatalítico para la producción de hidrógeno verde ", Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, 2022.
- [76] M. Schröder *et al.*, "Impact of the reaction conditions on the photocatalytic reduction of water on mesoporous polymeric carbon nitride under sunlight irradiation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 19, pp. 10108-10120, 2014/06/24/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.164>.
- [77] T. Siow Hwa, I. Aminul, T.-Y. Yun Hin, and A. Md. Rabiul, "Introducing the novel composite photocatalysts to boost the performance of hydrogen (H₂) production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 313, p. 127909, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127909>.
- [78] J. Jum Suk, H. Dong Won, and L. Jae Sung, "CdS–AgGaS₂ photocatalytic diodes for hydrogen production from aqueous Na₂S/Na₂SO₃ electrolyte solution under visible light ($\lambda \geq 420\text{nm}$)," *Catalysis Today*, vol. 120, no. 2, pp. 174-181, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.07.052>.
- [79] M. Yongjin, L. Yi, B. Yuan, Z. Anquan, Y. Yang, and P. Jun, "Controlling shape anisotropy of hexagonal CdS for highly stable and efficient photocatalytic H₂ evolution and photoelectrochemical water splitting," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 518, pp. 140-148, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.011>.
- [80] F. Nur and T. Muhammad, "2D-montmorillonite-dispersed g-C₃N₄/TiO₂ 2D/0Dnanocomposite for enhanced photo-induced H₂ evolution from glycerol-water mixture," *Applied Surface Science*, vol. 471, pp. 1053-1064, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.076>.
- [81] T. Oluwatosin, P. Radhakrishna, A. L. Linda, and K. J. R. Peter, "A photocatalytic impeller reactor for gas phase heterogeneous photocatalysis," *Journal of Environmental*

Chemical Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 3942-3948, 2017, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.068>.

ANEXOS

1. Anexo A. Especificaciones de equipos e instrumentos de medición

Espectrómetro



Marca: Vernier

Rango: 350 – 900 [nm]

Resolución: 3 [nm]

Fibra de emisiones



Marca: Vernier

Longitud: 1 [m]

Diámetro del núcleo: 400 [μm]

Material del núcleo: vidrio

Revestimiento: PVC de 2,2 [mm]

Piranómetro



Rango espectral: 400 a 1100 [nm]

Sensibilidad: 60 a 100 [$\mu\text{V/W/m}^2$]

Tiempo de respuesta (95%): < 500 [s]

Error direccional (hasta 80° a 1000 [W/m^2]):

< 10 [W/m^2]

Dependencia a la temperatura: < -0.15 [% / °C]

Rango temperatura de operación: -40 [°C] a +80 [°C]

Irradiancia solar máxima: 2000 [W/m^2]

Campo de visión: 180 °

Multímetro digital



Marca: Microlab

Modelo: 4547

Tolerancia hasta 200 [V]: $\pm (0,5\% + 2)$

Tolerancia sobre 1000 [V]: $\pm (0,8\% + 2)$

Apto para medición de temperatura

Agitador magnético con placa calefactora SH-3



Potencia de calentamiento: 500 [W]

Potencia del motor del agitador: 20 [W]

Temperatura máx. placa de calentamiento:

380 [°C] / 716 [°F]

Velocidad de agitación: 0-1600 [rpm] ajustable

Capacidad de agitación máxima: 3000 [mL]

Dimensiones placa de calentamiento: 170 x 170 [mm]

Tacómetro láser digital



Modelo: DT-2234C+

Rango de medición: 0,1 [rpm] (desde 2,5 a 999,9 [rpm])

1 [rpm] (sobre 1000 [rpm])

Precisión: $\pm (0,05\%)$

Distancia de medición: 50 a 500 [mm]

Detector Multigas



Marca: JUMTEC

Modelo: GS-400

Tipo de gas*: metano, propano, butano, hidrógeno

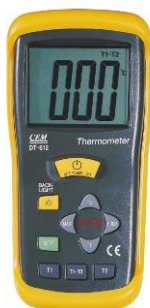
Rango: 1 [ppm]

1 [ppm] = 0,0001 Vol %

1 [ppm] = 1 [cm³] de gas en un [m³] de aire

(*) Equipado con sensor GS-430 de brazo flexible (360 [mm] de largo) para gases especificados (CH₄, C₃H₈, C₄H₁₀, H₂)

Termómetro digital



Marca: CEM

Modelo: DT-612

Rango: 50 [°C] a 1300 [°C]; -58 [°F] a 2000 [°F]

Resolución: 1 [°C]; 1 [°F]

(*) Apto para utilizar con termopar tipo K externo como sensor de temperatura

Electrodo de pH



Marca: Hanna Instruments

Modelo: FC240B

Electrolito: Viscoleno

Presión máxima: 0,1 [bar]

Rango: 0 a 13 pH

Temperatura recomendada de operación: 20 a 40 [°C]
(68 a 104 [°F])

Punta: forma cónica de 3 x 5 [mm]

Medidor de pH



Marca: Sper Scientific

Modelo: SP-860031

Rango: 0 a 14 pH

Resolución: 0,01 pH

Exactitud: $\pm 0,02$ pH

Bolsa de muestra/almacenamiento de gases



Marca: SKC

Modelo: Bolsa de muestra FlexFoil PLUS

Capacidad máxima: 1 [L]

Material fitting: Polipropileno simple

Estabilidad: 48 horas

Indicada para: Metano, Hidrógeno, CO/CO₂

Bomba peristáltica



Marca: Lead Fluid

Modelo: BT100S-YZ15

Rango de flujo: 0,0001 - 720 [mL/min]

Rango de velocidad: 0,1 - 150 [rpm]

Resolución de velocidad: 0,1 [rpm] (0,1 - 100 [rpm])

1 [rpm] (100 - 150 [rpm])

Precisión de velocidad: 0,2%

Agitador magnético



Marca: IKA

Modelo: COLUOR SQUIDIKAMAG

Capacidad máxima de agitación: 800 [mL]

Rango de velocidad: 0 a 1500 [rpm]

Material de la placa: Vidrio

Dimensiones de la placa: Ø110 [mm]

Balanza analítica



Marca: FAITHFUL

Modelo: FA2204N

Capacidad: 220 [g]

Resolución: ± 0.0001 [g] (0.1 [mg])

Linealidad: ± 0.0003 [g]

Repetibilidad: ± 0.0002 [g]

Tiempo de estabilización: 3 segundos

Tamaño del plato: 80 [mm]

Temperatura de operación: 5 – 25 [°C]

Dimensiones de cabina de pesaje: 240x190x265 [mm]

Calibración de peso: Calibración interna

2. Anexo B. Planos agitador

Anexo B-1: Plano conjunto agitador

Anexo B-2: Plano álabe agitador

Anexo B-3: Plano eje agitador

Anexo B-4: Plano porta retén

Anexo B-5: Plano cilindro conector