UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2021-08

Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema de separación térmica de la molécula de agua mediante energía solar para la obtención de hidrógeno

García Peñaloza, Sebastián Daniel

https://hdl.handle.net/11673/54290

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN TÉRMICA DE LA MOLÉCULA DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO”

SEBASTIÁN DANIEL GARCÍA PEÑALOZA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: PHD. RODRIGO BARRAZA VICENCIO

Agosto - 2021

AGRADECIMIENTOS

A todos los que me empujaron, me apoyaron y acompañaron incondicionalmente en esta etapa de mi vida, ¡gracias por creer en mí!

A Nicolas Ripoll por la ayuda, facilitación y apoyo en todo el proyecto y por traspasar ese gran amor a la ciencia a todos a sus ayudados.

A Don Francisco Vargas y Miguel Cubillos por toda la ayuda entregada en el laboratorio de energías renovables.

A todo el departamento de mecánica por facilitar todo lo que parece difícil.

DEDICATORIA

A mi familia ampliada

"Parecía que habíamos llegado al final del camino y resulta que era una curva abierta a otro paisaje y a nuevas curiosidades"

José Saramago

RESUMEN

El aumento antropogénico de dióxido de carbono en la atmosfera a producido un aumento promedio de 1 °C en la tierra. El 73,6% de las emisiones de dióxido de carbono corresponden a actividades energéticas, por lo que un cambio en esa materia es fundamental en los lineamientos futuros. Chile por su parte posee en su matriz eléctrica instalada un 51% de energías renovables para el año 2020, valor que sigue en crecimiento debido a su bajo costo y amplia disponibilidad. Con esto se abre un camino hacia la exportación energía verdes. La pregunta es ¿cómo se logra este objetivo? aquí es donde toma protagonismo el hidrógeno como vector energético libre de CO_2 siempre que se obtenga de fuentes renovables (Hidrógeno Verde) así como también cambiar su método de obtención tradicional (hidrógeno gris e hidrógeno azul) para procesos donde ya es utilizado.

El proceso desarrollo consiste en la utilización de energía solar térmica para realizar un proceso de separación termoquímica de la molécula agua con un catalizador de dos pasos. Para ello se diseña un reactor con la geometría apropiada para el proceso solar con ayuda de una camisa eléctrica para un ciclo con catalizador de óxido de fierro (III). Se desarrollan las pruebas térmicas del reactor. De esta manera se determina el comportamiento de la aislación, la camisa eléctrica, las temperaturas alcanzadas por el reactor y la radiación incidente tanto en plano horizontal como la energía teórica entregada por el concentrador solar. El comportamiento de la camisa eléctrica fue optimo llegando a temperaturas sobre los 500 °C, las temperaturas del reactor medidas en la estructura llegaron a los 330 °C, el flujo de calor perdido tuvo un máximo de 160 [W] y la radiación solar teórica entregada al reactor tuvo máximos de 708 [W].

Palabras clave: Hidrógeno, energía solar, separación de la molécula de agua.

ABSTRACT

The anthropogenic increase of carbon dioxide in the atmosphere has produced an average increase of 1 ° C on earth. 73.6% of carbon dioxide emissions correspond to energy activities, so a change in this matter is essential in future guidelines. Chile, for its part, has 51% renewable energy installed in its electricity matrix by 2020, a value that continues to grow due to its low cost and wide availability. This opens a path towards exporting green energy. The question is how is this goal achieved? This is where hydrogen takes center stage as a CO2-free energy vector provided it is obtained from renewable sources (Green Hydrogen) as well as changing its traditional method of obtaining (gray hydrogen and blue hydrogen) for processes where it is already used.

The development process consists of the use of solar thermal energy to carry out a thermochemical separation process of the water molecule with a two-step catalyst. For this, a reactor with the appropriate geometry for the solar process is designed with the help of an electric jacket for a cycle with an iron (III) oxide catalyst. The thermal tests of the reactor are developed. In this way, the behavior of the insulation, the electrical jacket, the temperatures reached by the reactor and the incident radiation both horizontally and the theoretical energy delivered by the solar concentrator are determined. The behavior of the electric jacket was optimal, reaching temperatures over 500 ° C, the reactor temperatures measured in the structure reached 330 ° C, the lost heat flux had a maximum of 160 [W] and the theoretical solar radiation delivered to the reactor had maximums of 708 [W].

Keywords: Hydrogen, solar energy, water splitting.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ..... **I**

DEDICATORIA ..... **II**

RESUMEN ..... **III**

ABSTRACT ..... **IV**

ÍNDICE ..... **V**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **VI**

ÍNDICE DE GRÁFICOS ..... **VIII**

ÍNDICE DE TABLAS ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

GLOSARIO DE TÉRMINOS ..... **IX**

SUBÍNDICES ..... **X**

SUPERÍNDICES ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

NÚMEROS ADIMENSIONALES ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ESPECIES QUÍMICAS ..... **X**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 ESTADO ENERGÉTICO MUNDIAL 3

1.2 HIDRÓGENO 7

1.2.1 Hidrógeno como vector energético *7*

1.2.2 Clasificación del Hidrógeno según método de obtención *9*

1.3 ESTRATEGIA NACIONAL EN EL HIDRÓGENO VERDE 10

1.4 FORMAS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO 12

1.4.1 Métodos tradicionales de obtención de hidrógeno *13*

1.4.2 Métodos de obtención termo-solar. *15*

1.5 CATALIZADORES USADOS PARA PROCESOS DE DOS PASOS 18

1.5.1 Óxidos metálicos *19*

1.5.2 Perovskitas (estroncio y lantano) *21*

1.6 TIPOS DE REACTORES PARA WATER SPLITTING: 22

1.7 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL **24**

2.1 CATALIZADOR 24
2.2 CONCENTRADOR SOLAR 28
2.3 REACTOR 29
2.4 EQUIPOS UTILIZADOS 32
2.4.1 Generador de vapor 32
2.4.2 Camisa eléctrica con variac 34
2.5 RESULTADOS ESPERADOS 35
2.6 MONTAJE DE EXPERIMENTO 36
2.6.1 Parámetros operacionales del modelo 37
2.6.2 Acumulador de gases 38
*2.6.3 Diagrama de operación ..... **¡Error! Marcador no definido.***
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS 39
3.1 FABRICACIÓN 39
3.1.1 Reactor 40
3.1.2 Brazo para el concentrador 40
3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO 42
3.2.1 Energía entregada por camisa electrica 43
3.2.2 Energía solar disponible 44
3.2.3 Aislación utilizada 45
3.2.4 Set de ensayos 46
3.3 PERFIL TÉRMICO EN EL REACTOR 46
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 50
5. REFERENCIAS 53
ANEXOS 56
ANEXO A: ALGORITMO DE THOMAS 56
ANEXO B: PARÁMETROS OPERACIONALES DE MODELO 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Procesos de obtención del hidrógeno. Fuente: Solarpaces: Solar chemistry research [18]. 12
Figura 1-2:Esquema de los 3 procesos de descarbonización de combustibles fósiles. Fuente: Montes & Abánades, 2011[19]. 14

Figura 1-3: Diagrama de descomposición del agua en el proceso de termólisis. Fuente: Baycara, 2004 [21]. 15
Figura 1-4: Procesos de obtención del hidrógeno. Fuente: Solarpaces: Solar chemistry research [18]. 17
Figura 1-5: Estudios realizados sobre la obtención de hidrogeno con fuente solar. Fuente: F. Yilmaz 2016 [17]. 19
Figura 1-6: Esquema general del ciclo termoquímico de dos etapas basado en $Fe3O4/FeO$. Fuente: Sattler y Roeb, 2009 [14]. 20
Figura 1-7: Esquema reactor de estructura monolítica (izquierda) y lecho fluidizado (derecha). Fuente: Xiao, Wu and Liu, 2012 [30]. 22
Figura 2-1: Descomposición de 1 mol de Fe_2O_3 en un ambiente de 100 mol de N_2 a 1 bar. Fuente: P. Charvin, 2007 [23]. 25
Figura 2-2: Esquema de flujo de calor de un ciclo ideal de óxido de hierro(III). Fuente: R. B. Diver, 2008 [31]. 27
Figura 2-3: Concentrador solar y su estructura. Fuente: elaboración propia. 28
Figura 2-4: Esquema de la estructura del concentrador. Fuente: elaboración Propia. 29
Figura 2-5: Esquema del reactor. Fuente: elaboración propia. 31
Figura 2-6: Generador de vapor. Fuente: elaboración propia. 32
Figura 2-7: Esquema de dispositivo generador de vapor. Fuente: L. Paz, 2018 [33]. 33
Figura 2-8: Camisa eléctrica instalada a camisa del reactor. Fuente: elaboración propia. 35
Figura 2-9: Esquema de operación. Fuente: elaboración propia. 36
Figura 2-10: a) Piranómetro Kipp y Zonen CMP10 b) DAQ Omega OM-2401 c) Termocupla tipo K. 37
Figura 2-11: Sistema de acumulación de gases con trampa de agua. Fuente: trabajo de titulación de Jonathan San Martin [34]. 38
Figura 3-1: Imagen de brazo que soporta el reactor montado en el soporte del concentrador. Fuente: elaboración propia. 41
Figura 3-2: Imagen del diseño del soporte del reactor. Fuente: elaboración propia. 42
Figura 3-3: Fotografía del ensayo realizado el día 29 y 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 43
Figura 4-1: Fotografía del reactor posterior a los ensayos. Fuente: elaboración propia. 52

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:Evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Chile en los últimos 10 años. Fuente: BP Statistical Review 2020 [2]. 2

Gráfico 1-2: Evolución de los precios promedio de los combustibles fósiles en los últimos 20 años. Fuente: BP Statistical Review, 2020 [2]. 4

Gráfico 1-3: Volumen de energía generada por fuente energética en Chile. Fuente: Generadoras de Chile 2020 [4]. 6

Gráfico 1-4: Costos de producción del hidrógeno en diferentes partes del mundo. Fuente: The Future of hydrogen 2019 [12]. 8

Gráfico 1-5: Costos nivelados de hidrógeno verde en Chile. Fuente: estrategia nacional de hidrógeno verde en Chile 2020 [6]. 11

Gráfico 2-1: Relación flujo masico del generador de vapor vs voltaje en Variac. Fuente: elaboración propia. 34

Gráfico 3-1: radiación solar 29 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 44

Gráfico 3-2: radiación solar 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 45

Gráfico 3-3: Perfil térmico 29 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 47

Gráfico 3-4: Perfil térmico 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 47

Gráfico 3-5: Balance energético 29 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 48

Gráfico 3-6: Balance energético 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia. 49

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Símbolo	Definición	Unidad SI
A	Área	m^2
C	Concentración solar media	-
c_P	Calor específico a presión constante	$j\ kg^{-1}\ K^{-1}$
I	Radiación	$W\ m^{-2}$
I_α	Radiación en plano horizontal	$W\ m^{-2}$
I_0	Radiación en superficie normal al sol	$W\ m^{-2}$
L	Largo del reactor	m
m	Masa	kg
η	Rendimiento	-
Q	Flujo de calor	W
r_1	Radio exterior reactor	m
r_2	Radio exterior de reactor con aislación	m
t	tiempo	s
T_L	Temperatura de rechazo de calor	K
T_s	Temperatura de la superficie	K
T	Temperatura	K
T_∞	Temperatura ambiente	K
V	Volumen, Voltaje	$m^3\ ,Volt$
α	Angulo de incidencia	grados
σ	Constante Stefan-Boltzmann	$W\ m^{-2}\ K^{-4}$
k	Conductividad térmica del material	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
h	Coeficiente de convección	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
ε	Emisividad del material	-

SUBÍNDICES

Subíndices	Definición
a	Absoluta
m	Manométrica

ESPECIES QUÍMICAS

Abreviatura	Definición
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
H	Hidrógeno
H_2O	Agua
OH	Hidróxido
Mn_2O_4	Óxido de magnesio (II,III)
Na_2CO_3	Carbonato de sodio
MnO	Óxido de magnesio (II)
Fe_2O_4	Óxido de fierro (III)
FeO	Óxido de fierro (II)
Zn	Zinc
ZnO	Óxido de zinc
CeO_2	Óxido de cerio (IV)
Ce_2O_3	Óxido de cerio (III)
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Mn	Manganeso

CONSIDERACIÓN

Se utiliza el “punto” (.) como separador decimal entre la parte entera y la parte decimal de un número real, y se usa la coma (,) como separador de miles de unidades.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El exponencial crecimiento que tiene la demanda energética en el mundo ha traído consigo un aumento insostenible en el uso de combustibles fósiles, representando en la actualidad más del 87% del combustible utilizado, siendo los contaminantes más importantes, hidrocarburos no quemados, óxidos nitrosos y gases de efecto invernadero[1]. Este último corresponde al principal responsable del aumento de la temperatura media del planeta, al que se le atribuye el 60% del efecto invernadero antropógeno, el cual ha aumentado en un grado Celsius la temperatura media del planeta hasta la fecha y se pronostica que aumentara en al menos 1.5°C al 2040. Concretamente existe un crecimiento constante en las emisiones de dióxido de carbono de 11.3 billones de toneladas en el año 1965 a 34 billones de toneladas al año 2019 a nivel mundial [2].

Lo anterior ha llevado a priorizar procesos que consideren carbono neutral, ya sea a través de combustibles que no produzcan huella de carbono entre su obtención y combustión o bien complementar con procesos que captura el carbono para obtener neutralidad en la emisión como proceso global. Esto se vuelve un desafío en procesos que necesitan altas concentraciones de energía, alimentación contaste y disponibilidad en extensos territorios.

Chile por su parte es el país con mayor emisión de dióxido de carbono por habitante dentro de Latinoamérica, aportando 92.4 millones de toneladas de CO_2 en el año 2019 (ver Gráfico 1-1). Sin embargo, Las energías renovables no convencionales (ERNC) (generación en base a biomasa, viento, radiación solar, hidráulica de pasada menor a 20 [MW] y geotérmica) se levantan como una opción prometedora para disminuir los índices de contaminación. Debido a que ha tenido una espectacular caída en los costos

de la matriz energética chilena. en los últimos 10 años el crecimiento ha sido abrumante, pasando a representar un 1.8% el año 2009 a un 19.6% de la matriz energética nacional en actualidad y con un 51% de su parque energético basado en energía renovables[3]. Sin embargo, uno de los grandes desafíos del área es la acumulación de estas fuentes energéticas las cuales presentan una alta variabilidad y han llegado incluso a valores marginales de 0 [USD/kWh] en noviembre del 2018 y julio del 2020 (invierno)[4] además de la necesidad de una disponibilidad menos variable. Es en este punto donde el hidrógeno se presenta como un vector energético prometedor para reparar en dicho problema, razón por la cual en Chile se ha declarado elemento estratégico para la exportación en las energías renovables[5].

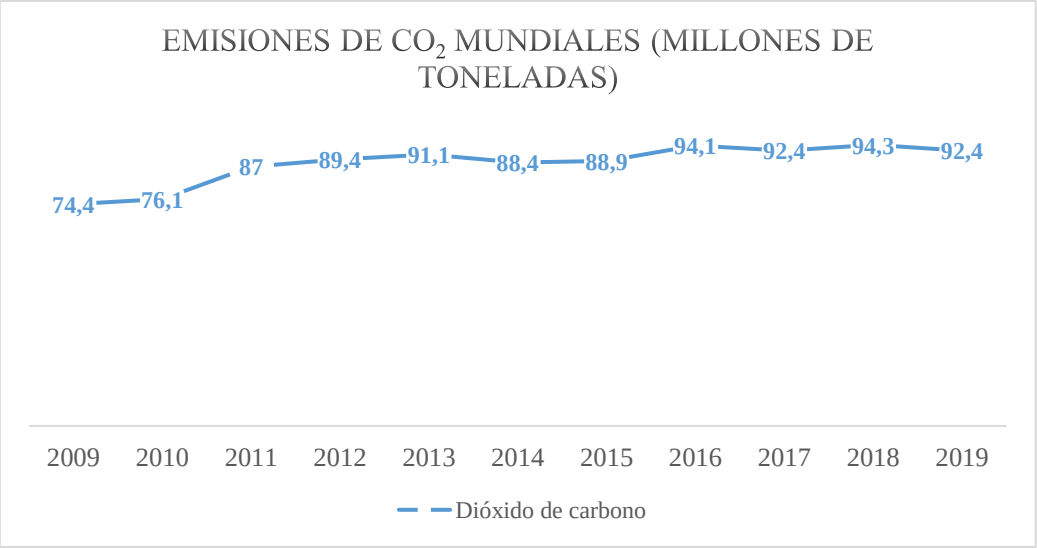


Gráfico 1-1*:Evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Chile en los últimos 10 años. Fuente: BP Statistical Review 2020 [2].*

1.1 Objetivos generales y específicos

Objetivo General

- Diseñar, construir y operar un sistema de separación térmica de agua mediante energía solar para la obtención de hidrógeno.

Objetivos específicos

- Definir el estado del arte de los sistemas de separación térmica de agua con catalizadores de óxidos de metal.
- Analizar los métodos de concentración solar y de energía complementaria para el proceso.
- Diseñar un sistema de separación termo-químico de agua que utilice una estructura catalítica.
- Implementar un sistema de alimentación de vapor de agua y un acumulador de gases para el proceso.
- Construir e implementar un soporte para el conjunto reactor termo-químico y concentrador solar.
- Realizar pruebas de puesta en marcha experimentales y analizar los resultados obtenidos.

1.2 Estado energético mundial

Las principales reservas de combustibles fósiles se encuentran en zonas de inestabilidad política y social, produciendo variaciones repentinas de precio y disponibilidad.

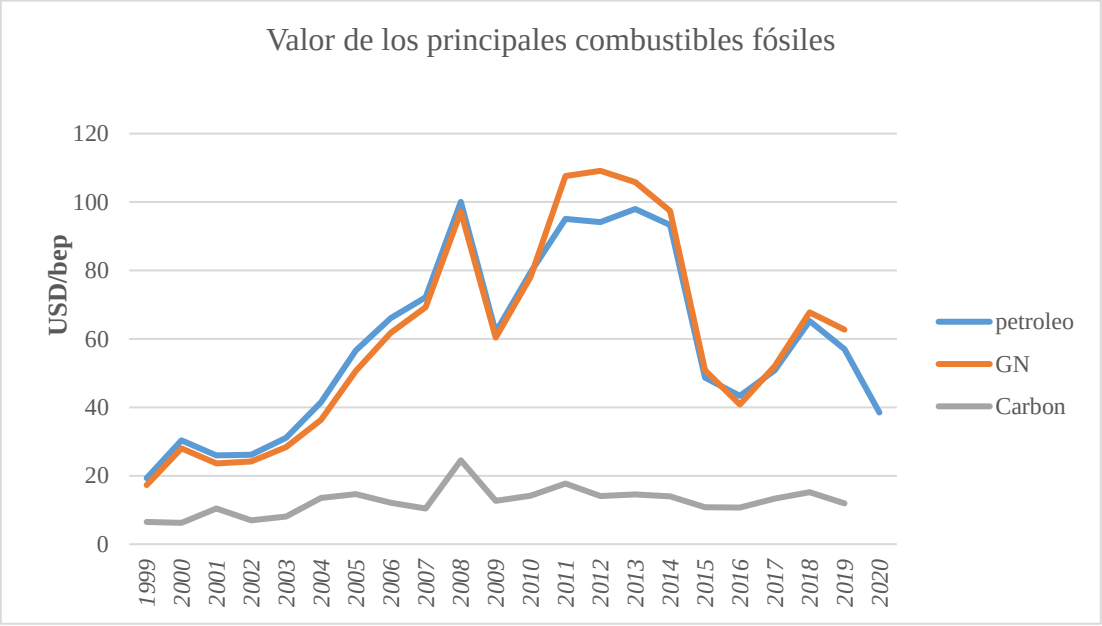


***Gráfico 1-2**: Evolución de los precios promedio de los combustibles fósiles en los últimos 20 años. Fuente: BP Statistical Review, 2020 [2].*

En el Gráfico 1-2 se observa la alta variabilidad de los valores del crudo de petróleo y gas natural en los últimos 20 años, llegando a valores 110 USD/barril como extremo superior el año 2012 y -37.63 USD/barril en abril del presente año luego de existir una sobre acumulación de este hidrocarburo en los depósitos, marcando la primera vez que se encuentra bajo 0 USD/barril el valor del crudo [6]. Por otra parte, los valores del carbón han tendido a la baja dado que la economía emergente de China ha visto transformada su matriz energética desde el 2017 a fuentes renovables, bajando su consumo de combustibles fósiles en estos últimos años. Además de lo anterior se debe hacer hincapié en que los combustibles fósiles no son renovables en la escala de tiempo humana por lo que los yacimientos existentes decrecerán, entregando una incertidumbre más a la variación de su precio y disponibilidad.

Las políticas públicas mundiales han impulsado a una mayor participación de las energías renovables, lo cual se ve reflejado en la evolución de su porcentaje de uso con respecto a otras energías primarias. Su evolución ha sido tal, que al 2019 represento el 5% de las energías primarias utilizadas y el 10% en la producción de electricidad mundial [2].

Chile por su parte no posee grandes reservas y su grado de dependencia se sitúa entre los más altos de Latinoamérica, llevando a los procesos productivos con alta densidad energética a tener altas fluctuaciones de precio y accesibilidad agregando incertidumbre a los procesos y crecimiento del país. Sin embargo, ha tenido desarrollos notables en el desarrollo de energías renovables. Uno de los lineamientos más importantes que explican este comportamiento es la hoja de ruta energética 2050 donde Chile se comprometió a bajar sus niveles de emisión de CO_2 entre un 35% y un 45% por unidad de PIB al alcanzado en el 2007 y tener al menos un 70% de generación eléctrica con energías renovables para el 2050 [7]. Si bien este compromiso no fue ambicioso fue el primer impulso para el vasto desarrollo de las ERNC en el país.

La búsqueda de energías renovables en Chile ha tenido un crecimiento importante en esta última década, pasando de 0.03 ExaJoule el año 2009 a 0.13 ExaJoule para el año 2020 en cuanto a la inyección a la red eléctrica [3]. Dentro de esta categoría la fuente que ha tenido mayor crecimiento es la captación de energía solar, pasando de una participación casi nula el 2012 a representar 9.8 % de la generación bruta para el año 2020 en el SEN (7,638 [GWh]). Esto se entiende por su amplia disponibilidad en sectores donde ocurren procesos que necesitan una alta concentración de energía, como lo es la minería y las industrias anexas a este proceso productivo.

Como se puede apreciar en el Gráfico 1-3 la energía eólica y solar han tomado importancia en estos últimos 5 años, sin embargo, el crecimiento en la demanda energética nacional no ha permitido suplantar los combustibles fósiles, pero sí aminorar su ascendente utilización según el crecimiento económico del país. Los cambios paulatinos en los porcentajes que actúan los actores del SEN son tanto por contratos

firmados con antelación como también por la necesidad de robustez en el suministro eléctrico.

Evolución de la generación en el SEN por tipo de tecnología (GWh)

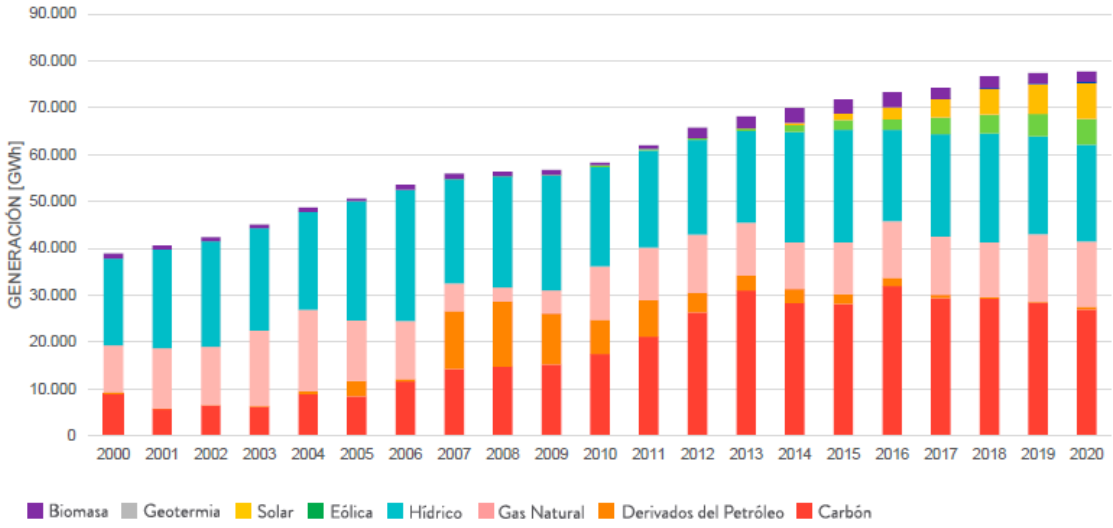


***Gráfico 1-3**: Volumen de energía generada por fuente energética en Chile. Fuente: Generadoras de Chile 2020 [4].*

1.3 Energía solar

La radiación producto de la fusión nuclear del Sol es la principal fuente de energía del planeta. Esta se utiliza como energía hídrica, eólica, undimotriz y biomasa. En esta ultima es donde se encuentra el combustible fósil, proceso que demoro más de 400 millones de años en capturar el carbono y que se libera aceleradamente.

Sí solo se aprovechase la radiación solar que capta la tierra en una hora esta sería suficiente para satisfacer la demanda energética mundial de un año [8]. Dado que Chile posee una de las más altas tasas de radiación del mundo, llegando a valor de potencia sobre los 1,400 [kW/m^2] y valores promedios energéticos de 9.45 [kW/m^2/día] en Calama [9], nos encontramos en un escenario ideal para implementar procesos de alta densidad energética que puedan ser dispuestos en zonas donde se encuentra este recurso

o bien ser acumuladas para utilizarse posteriormente. La pregunta que surge es ¿Cómo se logra acumular esta energía para tener disponibilidad permanente o para poder transportase?

1.4 Hidrógeno

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y no tóxico, el cual posee un elevado contenido energético por masa (poder calorífico inferior de 120.7 [MJ/kg]) comparada con otros combustibles fósiles como la gasolina (poder calorífico inferior 43.5 [MJ/kg]) y a su vez posee una baja densidad de 0.0089 [kg/m^3]. Su utilización es de amplia variabilidad e importancia en la industria. Dentro de sus utilidades, se encuentra en el proceso de tratamiento de escoria de cobre para obtener una mayor ley, en la refinería de fuel-oil, dónde se utiliza en el proceso de hidro-sulfuración, hidro-craqueo y en el proceso de cracking para obtención de combustibles con muy bajo nivel de azufre, en la industria alimenticia para esterilizar, limpieza e incluso para blanqueo de alimentos, para la fabricación de nitrato de amonio y metanol, además de su utilización como como vector energético principalmente en la industria del transporte, entre otros.

La producción volumétrica anual de hidrógeno en el mundo es de 5 Giga Nm^3, lo cual corresponde al 2% de la demanda primaria de energía. A su vez para la obtención de este elemento según fuente energética, el 96% se realiza con la ayuda de combustibles fósiles, el 3.9% corresponde a electrólisis de agua y el 0.1% restante es bajo otros procesos [10].

1.4.1 Hidrógeno como vector energético

El uso del hidrógeno en procesos energéticos se denomina vector energético, esto es, como una sustancia utilizada para el almacenamiento de energía que se puede liberar posteriormente de manera controlada. El producto de la reacción de su combustión directa o como pila de hidrógeno es únicamente agua y si la forma de obtención es con

fuentes renovables se puede hablar de un vector energético libre de polución y aporte en la producción de CO_2, lo que representa un desarrollo sostenible para los procesos donde se utilice. Como se mencionó anteriormente, el desafío es modificar la fuente energética que se utiliza para su producción. Para mediados del 2019, 50 países habían entregado incentivos y objetivos para acelerar el proceso, con lo que se ha conseguido un aumento significativo en proyectos de electrólisis del tipo PEM, logrando disminución significativa del costo por kilogramo. En concreto se han obtenido valores bajo los 2 [USD/kg] de H_2, costos de producción incluso más bajos que procesos convencionales en países con menos disponibilidad de estos combustibles [11].

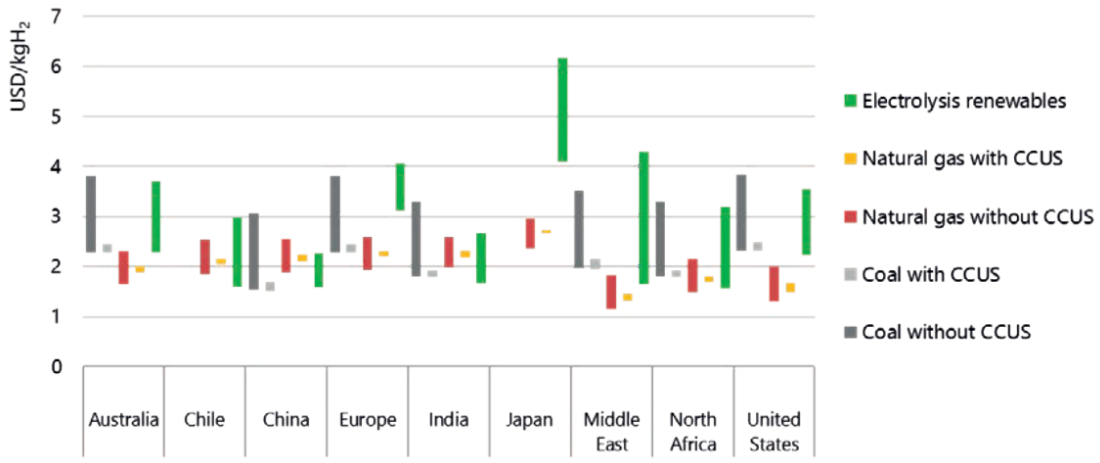


***Gráfico 1-4**: Costos de producción del hidrógeno en diferentes partes del mundo. Fuente: The Future of hydrogen 2019 [12].*

El hidrógeno presenta otras características que se deben tomar en cuenta en cuanto a su transporte. El primero es que se trata de un gas explosivo en contacto con oxígeno, por lo que las medidas de seguridad en su almacenamiento y transporte son de alta especificidad. El segundo es respecto a su densidad, la cual corresponde a 0.09 [kg/m^3] a presión atmosférica, por lo que se requieren grandes volúmenes para procesos que demandan una alta demanda energética. Sin embargo, para este último existen desarrollos notables en cuanto a tanques de alta presión [12], adsorbentes porosos [13]

e hidruros metálicos [12], con lo que se podrían transportar grandes cantidades de hidrógeno en volúmenes reducidos.

Como última acotación al hidrógeno como vector energético, se debe entender que cuando el hidrógeno se despliega junto con infraestructura eléctrica, la electricidad y el hidrógeno se pueden convertir en ambos sentidos, o bien convertirse en otro combustible. Esto permite que los usuarios finales dependan menos de recursos específicos y aumente la resiliencia de los suministros de energía. Si se desarrolla la infraestructura adecuada, en un futuro podría resultar atractivo para los países diversificar sus economías exportando energía baja en carbono en forma de hidrógeno y combustibles a base de hidrógeno, o importando hidrógeno para beneficiarse de la competencia que restringe los precios. Los países con recursos de alta calidad para la producción de hidrógeno están dispersos por todo el mundo, y muchos países que son actuales exportadores de energía también están dotados de recursos renovables que podrían producir hidrógeno. En un ambicioso contexto de bajas emisiones de carbono, el comercio de hidrógeno permitiría efectivamente el almacenamiento e intercambio de energía eólica y solar entre diferentes regiones para superar las diferencias estacionales. Por último, el hidrógeno podría proporcionar una forma adicional para que los países almacenaran reservas de energía estratégicamente en un mundo con bajas emisiones de carbono altamente electrificado [14].

1.4.2 Clasificación del hidrógeno según método de obtención

Debido a que la combustión del hidrógeno genera como resultado únicamente agua y ya que se presenta por esto mismo como una alternativa viable a descarbonización, toma una gran importancia la forma en que se obtiene. Por ello existe una clasificación según su método de obtención [15]:

Hidrógeno blanco: Hidrógeno que se obtiene de forma natural directamente desde depósitos subterráneos. Forma muy inusual y sin estrategias para su explotación.

Hidrógeno Negro: También se le asigna el color café, se denomina al hidrógeno obtenido de la gasificación del carbón (lignito y bituminoso), con oxígeno controlado y separado del gas, de síntesis mediante membranas o absorbentes.

Hidrógeno Gris: Es la forma más usual de obtención de hidrógeno en la actualidad, este proceso involucra al gas natural y se lleva a cabo bajo el proceso de reformado con vapor, el exceso de carbono conlleva a la liberación de CO_2. Este proceso libera 9.3 [kg] de CO_2 cada 1 [kg] de H_2. Se diferencia con el hidrógeno negro o café por la menor cantidad de dióxido de carbono liberado.

Hidrógeno azul: Corresponde al mismo proceso que el hidrógeno gris, sin embargo, en este proceso las emisiones generadas son capturadas y almacenadas bajo tierra. Esta tecnología se conoce como CSS (Carbon Dioxide Capture and Storage). Si bien este proceso se cataloga como carbono neutral, en la práctica la disminución en la liberación de CO_2 es entre un 80-90%.

Hidrógeno Rosado: Obtenido mediante electrólisis con energía nuclear.

Hidrógeno amarillo: obtenido mediante electrólisis con energías eléctricas mixtas, dependiendo de la disponibilidad de la energía solar transformada a eléctrica.

Hidrógeno Verde: Corresponde al hidrógeno obtenido mediante energías renovables, principalmente se habla de electrólisis con fuentes energéticas renovables. Sin embargo, en esta clasificación entran varias tecnologías que obtienen el hidrógeno sin necesidad de la electrólisis y es donde se enmarca este trabajo.

1.5 Estrategia nacional en el hidrógeno verde.

En noviembre del año 2020 se presentó una hoja de ruta para Chile en el camino al desarrollo del hidrógeno verde como elemento de exportación de las energías renovables del país [5], donde se presentaron números preliminares y proyecciones para llevar a cabo esta ambiciosa misión. Este hito marca un punto de partida y es relevante al ser el primer país en vías de desarrollo en hacerlo.

Dentro de las proyecciones entregadas en el informe destacan los precios estimados de producción de hidrógeno verde en el país, donde se estima un costo de producción en el desierto de atacama y magallanes de 1.3 $[\frac{USD}{kg}]$ de H_2 producido para el año 2030, marcando el valor más bajo de producción en el mundo y con la capacidad de producir a gran escala. Estas estimaciones se realizan bajo la proyección de las energías renovables actuales, las mejoras en eficiencia y costos que tendrán estas tecnologías.

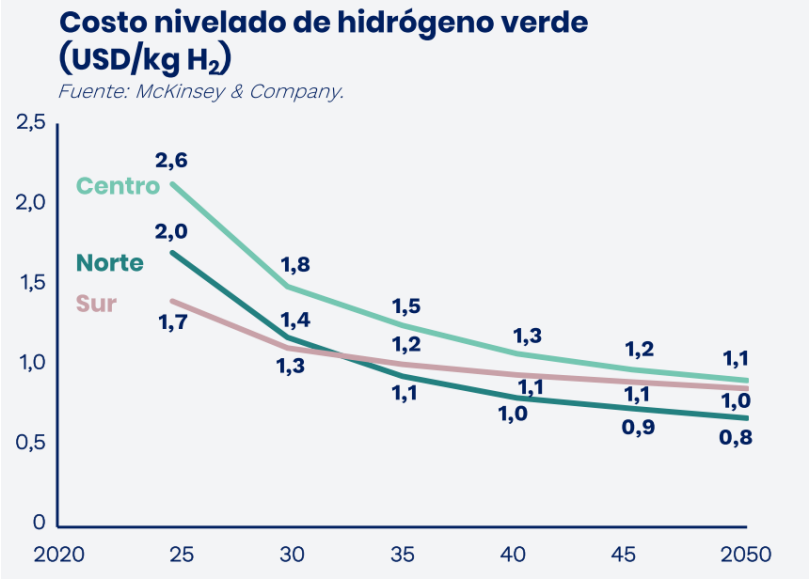


***Gráfico 1-5**: Costos nivelados de hidrógeno verde en Chile. Fuente: estrategia nacional de hidrógeno verde en Chile 2020 [6].*

La estimulación del desarrollo de esta industria en Chile se desarrollará a través del abastecimiento interno de este producto para procesos existentes, como lo son el amoniaco doméstico, uso en la refinería e inyecciones a redes de gas en forma de metanol. Así como a procesos que actualmente se encuentran en desarrollo, como lo es camiones mineros (CAEX), camiones pesados en ruta y buses de larga autonomía. Esta hoja de ruta marca la pauta a seguir en cuanto a legislación, normativa y seguridad que se debe desarrollar en el país para la nueva industria del hidrógeno.

En relación con lo previamente expuesto, cabe destacar, la reciente publicación de la ley de eficiencia energética que tiene como objetivo principal la reducción de la

intensidad energética en al menos un 10% al 2030, respecto al año 2019. También define en el artículo 7° al hidrogeno y sus portadores como fuente de combustible y vector energético [16].

1.6 Formas de obtención del hidrógeno

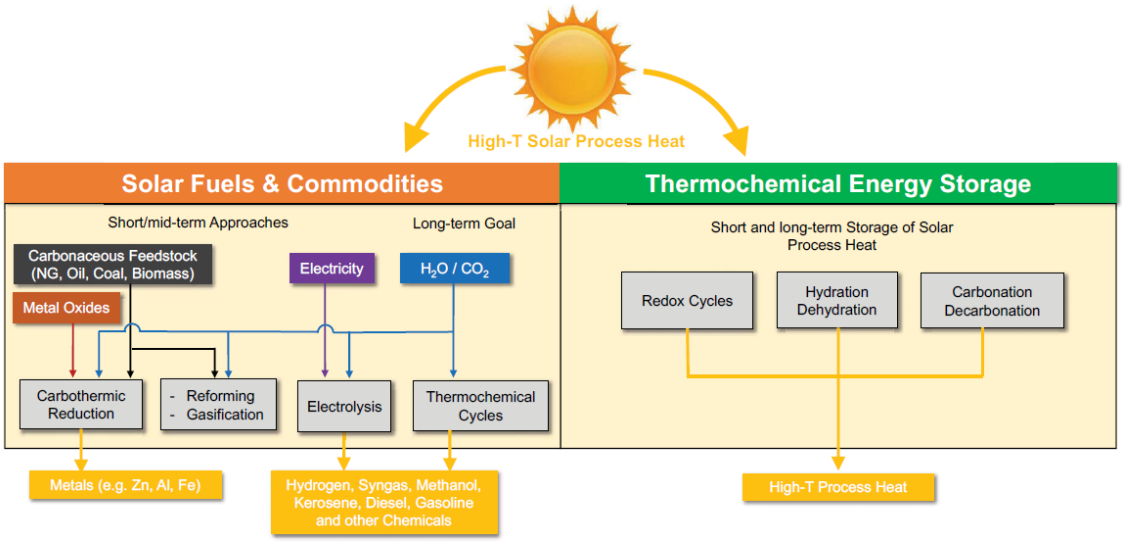


***Figura 1-1**: Procesos de obtención del hidrógeno. Fuente: Solarpaces: Solar chemistry research [18].*

Como se mencionó anteriormente existen variados métodos de obtención del hidrógeno, en la Figura 1-1 se observa una clasificación de sus formas de obtención. Los procesos se pueden separar en dos grandes grupos, por una parte, aquellos que necesitan una fuente directa de energía y por otro lado, procesos termoquímicos con almacenamiento de energía. En el primero se encuentran los procesos más tradicionales como es el hidrógeno gris y la electrólisis, igualmente, dentro de este mismo conjunto se encuentran otros procesos como lo son la obtención electroquímica y fotoquímica, procesos que aún se encuentran en investigación [17]. En el segundo grupo, se

encuentra el proceso termoquímico, el cual se encuentra en investigación desde 1977 [18] y sobre él se hará una investigación a fondo en este trabajo.

1.6.1 Métodos tradicionales de obtención de hidrógeno

La forma más común de obtener el hidrógeno es a través de la ruptura de hidrocarburos, donde se obtiene como resultado gas de síntesis. Dentro de los procesos de ruptura de hidrocarburos se puede mencionar:

a) Cracking u oxidación parcial de hidrocarburos: corresponde a una reacción exotérmica donde el hidrocarburo se oxida con una cantidad limitada de oxígeno. El proceso ocurre a temperaturas entre 1423 - 1588 K y a presiones de 60-80 bar(a). Esto se observa en la siguiente ecuación:

$$C_nH_m + \left(\frac{n}{2}\right) O_2 \rightarrow nCO + \left(\frac{m}{2}\right) H_2 \qquad \text{R 1.1}$$

b) Reformado de hidrocarburos: Es el proceso más utilizado y por ende el más desarrollado, corresponde a reacciones de hidrocarburos (gas natural entre ellos) y vapor de agua a temperaturas de 773-1173 K a presiones entre 3 y 25 bar(a). Existe una variante que es el reformado de autotérmico, donde la reacción actúa entre metano e hidrocarburos con vapor de agua y oxidación parcial. Ambos procesos pueden utilizar católicos para disminuir las temperaturas de operación. La reacción es la siguiente:

$$2C_nH_m + \left(\frac{n}{2}\right) O_2 + nH_2O \rightarrow 2nCO + (n+m)H_2. \qquad \text{R 1.2}$$

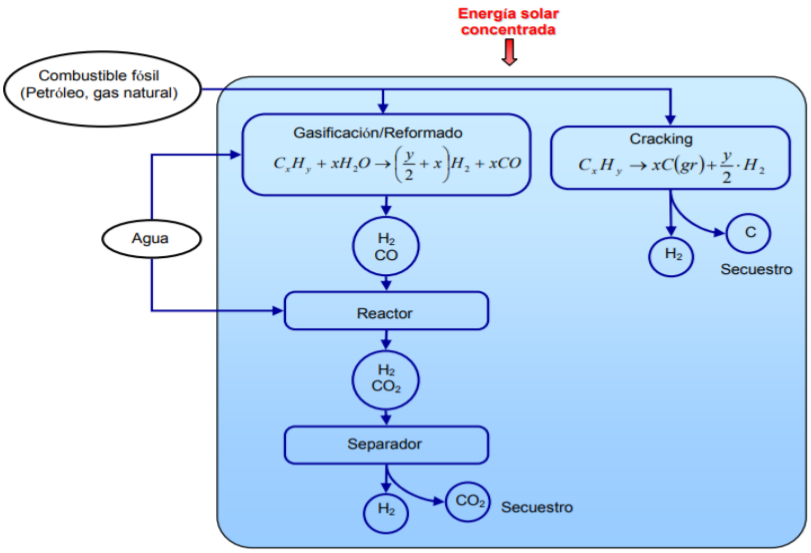


Figura 1-2*:Esquema de los 3 procesos de descarbonización de combustibles fósiles. Fuente: Montes & Abánades, 2011*[19].

Estas combinaciones se reflejan en la Figura 1-2. Nótese que la temperatura de los ciclos es baja, alrededor de los 1100 K [19]. Debido a esto es posible encontrarlos en escala industrial, utilizando el mismo combustible fósil como fuente térmica a través de su combustión completa.

La electrólisis por su parte corresponde a un proceso de disociación de la molécula de agua mediante corriente eléctrica que circula entre ánodo y cátodo sumergido en agua. En el ánodo se produce la oxidación y producción de O_2 mientras que en el cátodo ocurre la reducción y producción de H_2.

$$H_2O + electriccidad \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}\,O_2 \qquad \text{R 1.3}$$

Para este último proceso la conversión de electricidad a hidrógeno tiene una eficiencia de 50-80%, sin embargo, la eficiencia global con paneles fotovoltaicos fluctúa entre 10-15%. Existe una variante donde la electrólisis se produce a temperaturas mayores a 373 K con un rendimiento global de 14-19% y donde se espera llegar a eficiencias mayor al 30%.

1.6.2 Métodos de obtención termo-solar.

Las investigaciones que se estudiarán a fondo serán los procesos termoquímicos aplicados al "Water splitting". Estos procesos han demostrado tener una eficiencia teórica notable [20], siendo además atractivos en algunos casos para proyectos a gran escala. La clasificación de los anteriores es bajo su naturaleza de trabajo, los cuales son los siguientes:

1. Termólisis directa: consiste en un proceso de un único paso donde las temperaturas para la obtención de una fracción considerable de hidrógeno son sobre los 2500 K, siendo esto un gran problema en cuanto a la materialidad del reactor [8], la pérdida producto de las altas temperaturas y la posible recombinación de ambos elementos debido a que la separación se produce dentro del mismo paso. Además de esto el proceso debe realizarse con tecnología de membrana de un alto costo [21] razón por la cual este proceso no se realiza comúnmente, sin embargo, sirve como punto de partida en el estudio de la separación térmica.

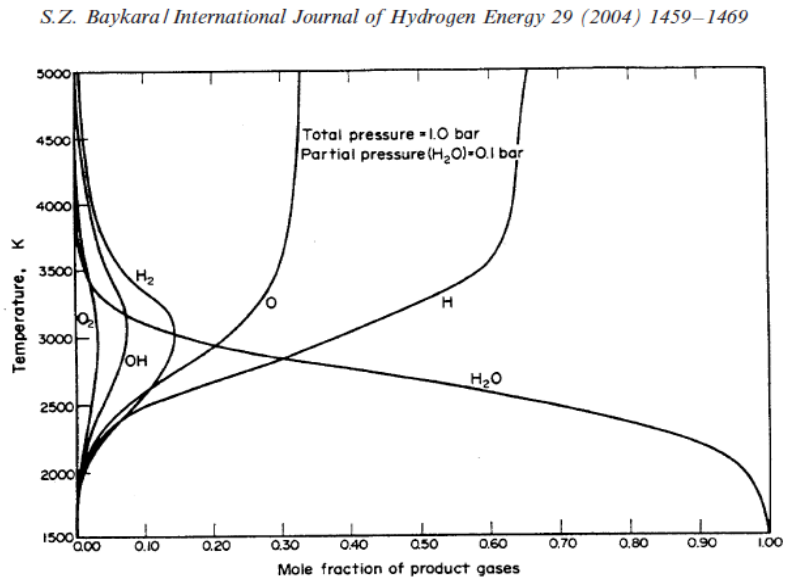


***Figura 1-3**: Diagrama de descomposición del agua en el proceso de termólisis. Fuente: Baycara, 2004* [21].

Este proceso genera seis especies de gases, H_2O, OH, H, O, H_2 y O_2 por sobre los 2000 K como muestra el diagrama. Es de lo anterior, que nace la necesidad de un catalizador para disminuir temperatura, además de obtener el oxígeno y el hidrógeno en pasos diferentes.

2. Ciclos termoquímicos: Con el fin de favorecer la separación de la molécula de agua se utilizan catalizadores. Estos elementos propician la catálisis, lo cual corresponde a un fenómeno esencialmente químico que facilita (catalizador positivo) o retarda (inhibidor) una reacción química, permaneciendo el catalizador inalterado en el tiempo, es decir, no se consume en el proceso de catálisis (proceso ideal). En las reacciones por describir se utilizan catalizadores positivos con catálisis heterogénea (distinta fase catalizador y reactivo).

   Este tipo de ciclos se comenzó a investigar en 1960, desde entonces se han investigado distintos procesos termoquímicos, donde se busca el rendimiento térmico y de reacción, baja toxicidad y factibilidad para llevarlo a una escala industrial [22]. Estas reacciones se pueden separar en dos categorías, los multipasos o de baja temperatura y los de dos paso o alta temperatura. A continuación, se describe más detalladamente en qué consiste cada uno de ellos y las variantes dentro de estos mismos:

2.1 Ciclos multipasos: Se utiliza, al igual que el de dos pasos, óxido de metales como catalizador principalmente. Posee la ventaja de menores temperaturas lo que disminuye las pérdidas por radiación y facilita la construcción del reactor dada las menores temperaturas a la que se expone. Sin embargo, al tener más de un paso en ciclo se vuelve más irreversible (aumento de entropía) a medida que se agregan etapas de reacción. Otra causa no deseada es la generación de sulfuros, estos crean problemas medio ambientales y deterioran el reactor. Los catalizadores utilizados para estos ciclos son muchos, entre los que destacan el uso de más de un óxido de metal y las ferritas. Como ejemplo se entrega el esquema de un ciclo óxido de magnesio, el cual utiliza Mn_3O_4, Na_2CO_3 y MnO, donde la temperatura más alta en

el ciclo (obtención de hidrógeno) llega a los 750°C, utilizando el catalizador nanopartículas y una eficiencia del ciclo del 74% con recuperación de calor del 100% [8].

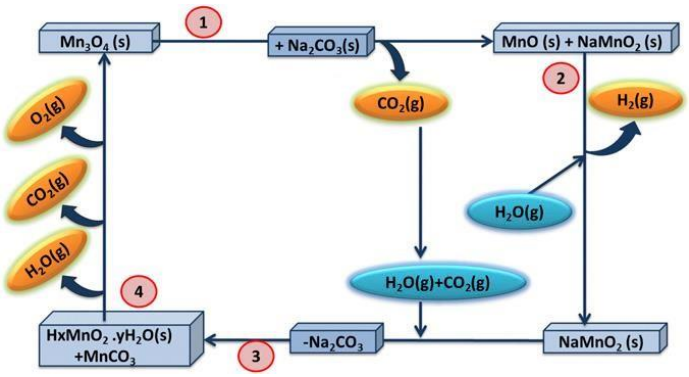


Figura 1-4*: Procesos de obtención del hidrógeno. Fuente: Solarpaces: Solar chemistry research [18].*

2.2 Ciclos de dos pasos: Este es el proceso más estudiado dentro de la obtención térmica del hidrógeno, a pesar de que requiere mayores temperaturas para la reducción del catalizador posee la ventaja de ser más sencillo y tener menores pérdidas por irreversibilidad. Dentro de los catalizadores ocupados destacan los óxidos de metal, las ferritas y los que poseen estructura de perovskita. La gran variedad que existe entre los ciclos se debe a la búsqueda de ciclos de menor temperatura, mayor ciclicidad y la no necesidad del proceso de quenching [22] (disminuir su fluorescencia en la etapa de reducción).

Los ciclos de óxido de metal corresponden a los ciclos con mayor temperatura en el paso de reducción acompañado de un mayor tiempo en reaccionar, sin embargo, son los catalizadores más sencillos de conseguir y de reacciones más sencillas. La fórmula que siguen estos procesos es la siguiente:

$$M_xO_y \quad = \quad xM + \frac{y}{2}O_2 \qquad \text{R 1.3}$$

$$xM + yH_2O \quad = \; M_xO_y + \; yH_2$$

R 1.3

Donde M corresponde metal y M_xO_y corresponde al metal oxidado. El primer paso consiste en la reducción y disociación del óxido metálico, este paso tiene una alta temperatura y es un proceso endotérmico. El segundo paso es la oxidación del catalizador donde se libera la molécula de hidrógeno, siendo un proceso exotérmico y de menor temperatura que el primero. Importante mencionar que estos procesos deben ser llevados a cabo en un ambiente de gas inerte, generalmente se utiliza argón o nitrógeno.

1.7 Catalizadores usados para procesos de dos pasos

En los últimos años las investigaciones para la separación térmica de la molécula de agua se han centrado en procesos termoquímicos basados en óxidos metálicos, que a pesar de tener temperaturas de trabajo más elevadas poseen una elevada eficiencia, son relativamente sencillos y escalables. Dentro de los trabajos más notables en este campo se encuentran los que describe la figura 1-5.

Para sintetizar el catalizador existen varios procesos, dentro de los que destacan tres: Síntesis de fase sólida, síntesis de alta propagación y síntesis de spray de pirólisis. El primero es un proceso de atmósfera controlada donde además se interviene la presión parcial de oxígeno al enfriar el metal. El segundo corresponde a una combustión entre sólido-sólido-gas, siendo una reacción exotérmica controlada de bajo consumo energético en el proceso de síntesis. Por último, el tercero consiste en la mezcla de metal, ácido cítrico y amoniaco. Pulverizado y calentado en un horno de tubo, entregando una estructura cristalina isométrica.

Authors	Source	Process	Performance analysis type	Efficiency		H_2 production	Year	Country	Ref.
				η (%)	ψ (%)				
Ozcan and Dincer	Solar energy	Thermochemical (Mg–Cl)	Energy and exergy	18.8	19.9	–	2014	Canada	[26]
Ngoh et al.	Solar Photovoltaic/ thermal energy	Electrolysis	Exergy	–	75	0.064 (kg/s)	2014	Cameroon	[72]
Steinfeld et al.	Solar energy	Thermochemical	Energy	20.4		–	1999	U.S.A	[73]
Dagdougu et al.	Solar and Wind	Electrolysis	–	–	–	26–19 (kWh/m^2 yr)	2011	Italy	[74]
Boudries R.	Solar energy	Electrolyzer-concentrating photovoltaic system	–	–	–	0.14–0.17 (kg H_2/day)	2013	Algeria	[75]
Raissi A.T.	Solar energy	Thermochemical	–	–	–	–	2003	U.S.A	[76]
Zamfirescu and Dincer	Solar energy	Photocatalysis, photovoltaics, thermal engine	Energy	56.20 ∓ 16	–	27.80 t/day	2014	Canada	[77]
Ratlamwala and Dincer	Solar energy	Thermochemical (Cu–Cl), photocatalytic	Energy and exergy	46.60– 56.41	47.98–59.64	366.74– 328.1 (kg/day) 2195–2156.2 (kg/day),	2014	Canada	[27]
Wang et al.	Solar energy	Thermochemical, electrolytic, photo electrolytic and photochemical	Energy	30 <	–	–	2012	Canada	[78]
Liberatore et al.	Solar energy	Thermochemical (H_2SO4)	Energy	34	–	–	2012	Italy	[79]
Joshi et al.	Solar energy	Photovoltaic, Photoelectrolysis, biophotolysis	Exergy	–	48.40	–	2010	Canada	[20]
Shamim et al.	Solar energy	Photocatalytic	Energy and exergy	0.085	0.074	0.1–0.21 (mmol/h)	2014	Canada	[80]
Öztürk et al.	Solar energy	Solar thermal, photovoltaic, photoelectrochemical, photobiological	Examination	–	–	–	2011	Turkey	[81]
Villasmil and Steinfeld	Solar energy	Solar process hybrid process Claus process	Energy	29–36	–	81–138 (million-kW h/yr)	2010	Switzerland	[82]
Mallapragada and Agrawal	Solar energy	Thermochemical Electrolysis	Energy	79	–	–	2014	U.S.A	[83]
Scamman et al.	Solar energy	Electrolyte membrane (PEM) electrolyzer	Energy	80.81	–	–	2014	UK	[84]
Hong et al.	Solar energy	Thermochemical	Energy	20–28	–	–	2012	China	[85]
Balta et al.	Solar energy	Thermochemical (Mg–Cl)	Energy and exergy	18.18	19.15	–	2014	Turkey	[7]
Kelly and Gibson	Solar energy	Photoelectrochemical	Energy	7–14	–	–	2008	U.S.A	[86]
Joshi et al.	Solar energy	Solar thermal photovoltaic	Energy and exergy	10.42–12.92	30.60–63.10	–	2011	Canada	[87]
Bhosale et al.	Solar energy	Thermochemical (IO–IS)	Exergy	–	39.56	–	2015	Qatar	[88]
Ghandehariun et al.	Solar energy	Thermochemical (Cu–Cl)	Energy	49	–	–	2010	Canada	[21]
Ghribi et al.	Solar energy	PV/PV/proton exchange membrane (PEM)	–	–	–	20–29 (m^3/year)	2013	Algeria	[89]
Bozoglan et al.	Solar energy	PV-Electrolyzer	Exergy	–	86.70	17 kg/h	2012	Turkey	[38]
Ozturk and Dincer	Solar energy	Power Cycles/polymer exchange membrane	Energy/exergy	52.92	57.84	–	2013	Canada	[25]
Shamim et al.	Solar energy	Photocatalytic (H2S)	Energy–exergy	39	28	–	2014	Canada	[90]

E. Yilmaz et al. / Renewable and Sustainable Energy Reviews 56 (2016) 171–178

***Figura 1-5**: Estudios realizados sobre la obtención de hidrogeno con fuente solar. Fuente: F. Yilmaz 2016* [17].

1.7.1 Óxidos metálicos

El ciclo de dos pasos fue propuesto en 1977 por Nakamura con el uso de Fe_3O_4/FeO con temperaturas de 2300 K [18], posteriormente fue experimentado por Tofighi en 1982 y por Sibieude en 1982. El análisis de este ciclo ha sido ampliamente documentado e investigado llegando a conversiones químicas del 98% a temperaturas de 2373 K a 1 atmósfera, la relación que tiene la presión en el proceso es notable, con 0.01 bar a los 1770°C se logra un 92% de reducción del catalizador[23]. No obstante, bajo estas nuevas condiciones llevarlo a un ensayo empírico se complejiza. A continuación, se observa en la figura 1-10 el funcionamiento de este ciclo.

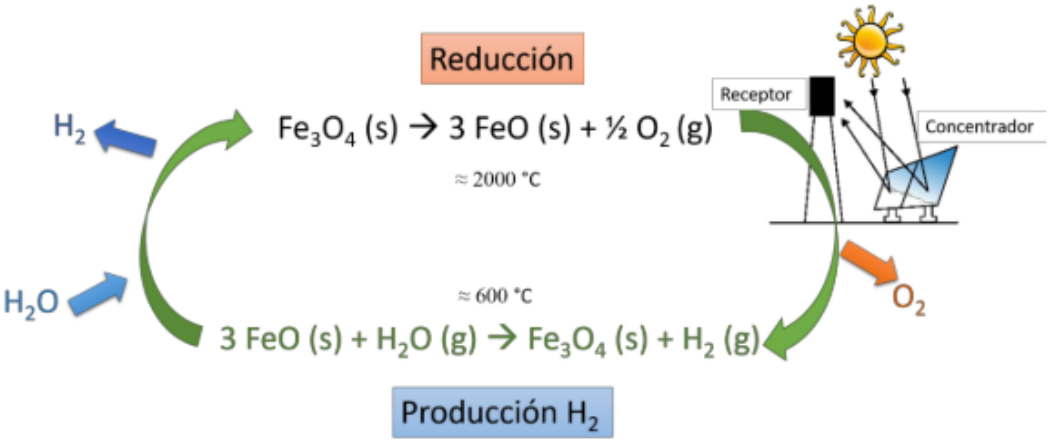


Figura 1-6*: Esquema general del ciclo termoquímico de dos etapas basado en* Fe_3O_4/FeO.
Fuente: Sattler y Roeb, 2009 [14].

Un ciclo ampliamente estudiado y que se levantó como un buen candidato para estos procesos es el ZnO/Zn, el cual comienza su estudio con Palumbo en 1999 [24]. Sin bien posee temperaturas de trabajo elevadas, 2300 K, se ha determinado eficiencias de 82% con recuperación en la etapa de quenching e hidrólisis. Este ciclo se destaca por su sencillez en su descomposición química a diferencia del anterior. Otra forma de utilizar este catalizador es con la reducción del metal con carbón, gas natural y otros hidrocarburos, obteniendo gas de síntesis a temperatura de 1300 K.

Por último, el catalizador donde se centran los últimos estudios es el óxido de cerio CeO_2/Ce_2O_3, el cual da inicio en el 2006 por Abanades y Flamant [25], dónde se obtienen variadas características detalladas, descritas y a su vez destacables en [14]:

- Elevada movilidad de los átomos de oxígeno en la estructura.
- Alta capacidad de almacenamiento/cesión de oxígeno.
- No experimenta cambios de fase durante los ciclos termoquímicos.
- Su actividad es independiente del tamaño de partícula por lo que no es necesario realizar ningún tratamiento antes de ser utilizado.

Sin embargo, aún tiene la limitación de las altas temperaturas de reducción total (2273 K), aunque al ser reducidos a un óxido no estequiométrico se necesitan temperaturas

de 1300 K para reaccionar con vapor de agua. Existen variantes en este ciclo que se encuentran en estudio, las cuales consisten en reemplazar algunos cationes por otros metales [26].

Cabe señalar la existencia de ciclos que utilizan el mismo principio, como lo son por ejemplo el magnesio, cobre, níquel y cobalto entre otros. Por otra parte, dichos compuestos puedes ser utilizados mediante ferritas mixtas, con cobre, níquel magnesio y fierro ($MeFe_2O_4$ (Me = Cu, Ni, Mn)) donde se ha demostrado que pueden reducirse a 1200 °C y Re oxidarse en presencia de agua a 800 °C produciendo hidrógeno [27]. Sin embargo, el problema viene dado por la ciclicidad de estos catalizados, como también por su sinterización en estructuras para estos procesos, además de la baja producción de hidrógeno por ciclo.

1.7.2 Perovskitas (estroncio y lantano)

Los últimos estudios en esta materia están enfocados a ensayos de laboratorio para ciclos con catalizadores de estructura perovskita, estas estructuras consisten en un cambio en los cationes del óxido por un metal de transición. Gracias a esto es que el proceso endotérmico es a menor temperatura y menor reoxidabilidad, llegando a una temperatura de oxidación de 1773 K para el lantano manganita, pero con una baja eficiencia en la obtención de O_2 [28]. Estos últimos procesos no han sido llevados a reactores de concentración solar para la separación de la molécula de agua, por lo que su implementación en un trabajo empírico resulta atractiva para el avance en esta materia.

1.8 Tipos de reactores para water splitting:

Los reactores que se han utilizado para los óxidos de metal consisten básicamente en un concentrador, un receptor y un reactor, el cual puede ser de lecho fluidizado o bien de estructura monolítica [29, 30]. El primero corresponde a un lecho de gas inerte, como por ejemplo argón o nitrógeno, donde es fluidizado el catalizador como nanopartículas. Posee la ventaja de ser más fácil el recambio del catalizador, en caso de que este se consuma en el proceso. El segundo corresponde a estructuras con forma de panal de abejas, el cual posee mayor superficie de contacto, además de soportar altas temperaturas [29], sin embargo, son poco prácticas cuando el catalizador se consume.

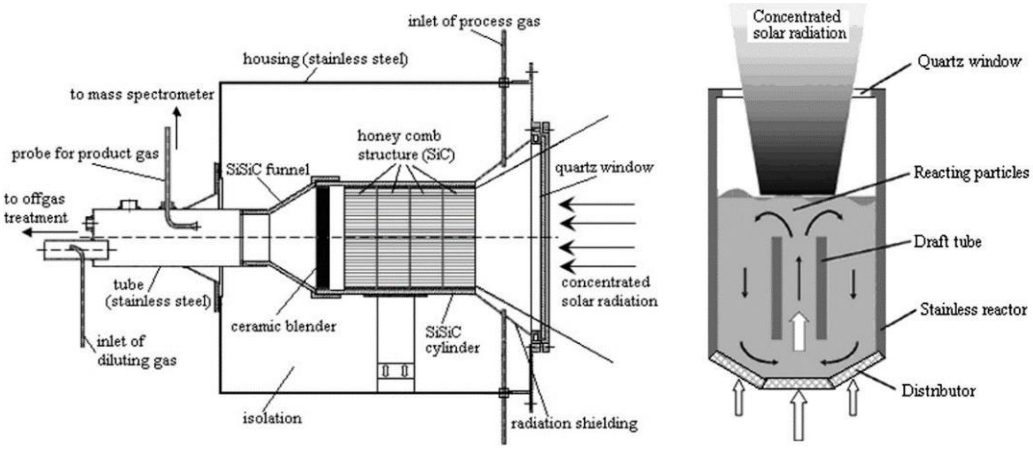


***Figura 1-7**: Esquema reactor de estructura monolítica (izquierda) y lecho fluidizado (derecha). Fuente: Xiao, Wu and Liu, 2012* [30].

En el diseño del reactor se debe tener en consideración varios factores, el principal de ellos es eficiencia de absorción, el cual se verá disminuido mientras mayor sea la radiación que se pierda de este. La eficiencia de la cavidad vendrá dada por:

$$\eta_{absorcion} = 1 - \left(\frac{\sigma T^4}{IC}\right) \qquad \text{E 1.1}$$

A su vez el proceso tiene una máxima de eficiencia determinada por Carnot, cuya fórmula es la siguiente:

$$\eta_{carnot} = 1 - \left(\frac{T_L}{T}\right) \qquad \text{E 1.2}$$

Por lo que la eficiencia máxima del proceso queda determinada por la siguiente ecuación:

$$\eta_{exergia\ ideal} = \left(1 - \left(\frac{\sigma T^4}{IC}\right)\right) * \left(1 - \left(\frac{T_L}{T}\right)\right) \qquad \text{E 1.3}$$

Se puede obtener también una temperatura de estancamiento en el reactor dada por la geometría del concentrado, la cual se obtiene al igualar a cero la eficiencia de la absorción:

$$T_{estancamieno} = \left(\frac{IC}{\sigma}\right) \qquad \text{E 1.3}$$

Por último, la temperatura optima del reactor se obtiene al buscar el máximo de la eficiencia del proceso.

$$T_{optima}^5 - (0.75 * T_L) * T_{optima}^4 - \left(\frac{T_L IC}{4\sigma}\right) = 0 \qquad \text{E 1.3}$$

Bajo estas fórmulas podemos adecuar la necesidad del concentrador, materialidad del reactor y geometría de mismo.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de una prueba de concepto se abordaron distintos desafíos para la puesta en marcha. Comenzado por el diseño, la recopilación de accesorios disponibles y un marco teórico solido de los procesos que se espera que ocurran. A continuación, se describe cada uno de estos pasos para conformar el escenario de experimentación deseado.

2.1 Catalizador

Para los ensayos se eligió como catalizador, el óxido fierro (III) debido a su buena documentación en los procesos de reducción en ambiente inerte, su fácil obtención como materia prima y la posibilidad de sintetizarlo dentro de las instalaciones de la universidad.

Para el catalizador de fierro se utiliza lana de acero comercial, cuya ventaja es su estructura que dejará fluir tanto el ambiente inerte como el vapor de agua en él, siendo su área de contacto en relación con su volumen y su fácil acceso de adquisición. Si bien su composición no es precisa, corresponde a un porcentaje mayor al 99% de hierro. Esta lana de acero fue oxidada de manera controlada por el Departamento de Metalurgia de la Universidad Técnica Federico Santa María y la masa que corresponde a 94.7 [g]. La descomposición esperada de este catalizador para una atmósfera inerte a 1 [bar_a] se puede observar en el diagrama de descomposición del Fe_2O_3 en la Figura 2-1.

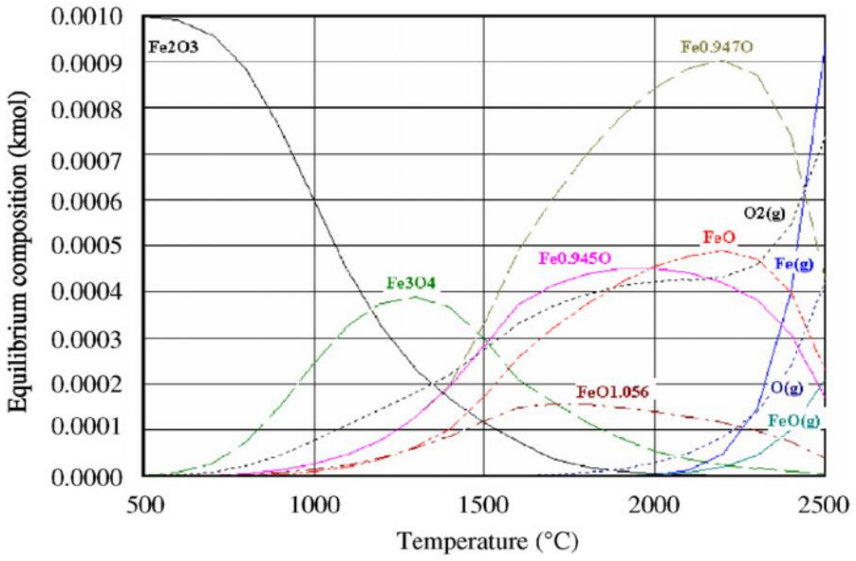


Figura 2-1*: Descomposición de 1 mol de Fe_2O_3 en un ambiente de 100 mol de N_2 a 1 bar. Fuente: P. Charvin, 2007* [23].

Los valores energéticos teóricos más relevantes de comportamiento se describen en Metallurgical Thermochemistry de Kubaschewski, Oswald. Las fórmulas son la siguientes:

Fe_2O_3:

Calor especifico:

Temperaturas 298 K a 950 K:

$$11.71 + 1.22 * 10^{-3} * T - 2.18 * 10^{5} * T^{-2} \text{ [cal/K*mol]} \qquad \text{E 2.1}$$

Temperaturas 951 K a 1050 K:

$$36 \text{ [cal/K*mol]} \qquad \text{E 2.2}$$

Temperaturas 1051K a 1750 K:

$$31.7 + 1.76 * T * 10^{-3} \text{ [cal/K*mol]} \qquad \text{E 2.3}$$

Reacción $3(Fe_2O_3) \rightarrow 2(Fe_3O_4) + 0.5O_2$:

$$(84.1 + 6.9 * T \log(T) - 44.14 * T) * 10^{-3} \text{ [kcal/mol]} \quad \text{E 2.4}$$

Fe_3O_4:

Calor especifico:

Temperaturas 297 K a 900 K:

$$21.88 + 48.2 * T * 10^{-3} \text{ [cal/K*mol]} \quad \text{E 2.5}$$

Temperaturas 901 K a 1800 K:

$$48 \text{ [cal/K*mol]} \quad \text{E 2.6}$$

Reacción $Fe_3O_4 \rightarrow 3(FeO) + 0.5O_2$:

$$84.1 + 6.9 * T * \text{Log}(T) - 44.14 * T * 10^{-3} \text{ [kcal/mol]} \quad \text{E 2.6}$$

FeO:

Calor especifico:

Temperaturas 298 K a 1300 K:

$$12.38 + 1.62 * T * 10^{-3} – 0.38 * T^{-2} * 10^{5} \text{ [cal/K*mol]} \quad \text{E 2.7}$$

Reacción $FeO \rightarrow Fe + O_2$:

$$84.1+6.9 * T * \text{Log}(T) – 44.14 * T * 10^{-3} \text{ [Kcal/mol]} \quad \text{E 2.8}$$

Además de esta información, se puede tener como referencia los valores obtenidos por Sadia National Laboratories [31]con un reactor de anillo giratorio como se observa en la figura 2-2. Proceso desarrollado en un lecho fluidizado y que entrega valores en un ciclo ideal para un mol de magnetita.

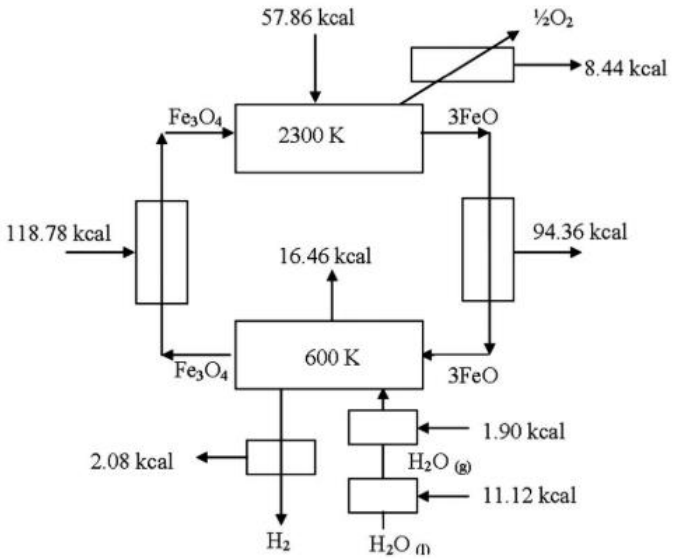


Figura 2-2*: Esquema de flujo de calor de un ciclo ideal de óxido de hierro(III). Fuente: R. B. Diver, 2008* [31].

Si bien estos estudios permiten tener una nocion del comportamiento y requerimientos energeticos del óxido metalico en su reducción y posterior oxidación, se debe tener en cuenta su geometria, tiempo de reacción, presión y flujo de calor. La modelacion computacional en trabajos futuros permitirá obtener un comportamiento presiso de las reacciones.

2.2 Concentrador solar.

La energía solar a utilizar se debe concentrar antes de entrar al reactor por la mirilla. Para ello se utilizará un concentrador de disco parabólico (PDR) de alta temperatura C. A. Parsons de 900 mm, un foco ubicado a 350 mm desde el centro del mismo y una potencia nominal de concentración aproximada de 636 Watts. Este posee una estructura ya desarrollada por un memorista anterior y que será utilizada para el desarrollo de la presente investigación. La estructura posee un eje de giro, un tornillo sin fin que conecta la parte superior del disco con una placa metálica perforada junto a una tuerca, lo que permite regular la elevación. Por último, la estructura contempla fijaciones removibles para el desmontaje del disco parabólico.

Figura 2-3*: Concentrador solar y su estructura. Fuente: elaboración propia.*

La estructura del concentrador solar se modeló en programa en Autodesk Inventor para tener un correcto desarrollo en los implementos que se acoplarían a este, así como también de una eventual simulación de los esfuerzos o posteriores modificaciones que se le realizarán.

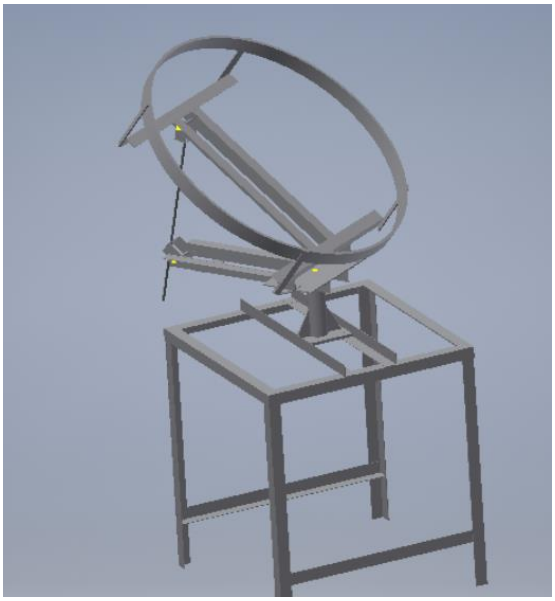


Figura 2-4*: Esquema de la estructura del concentrador. Fuente: elaboración Propia.*

2.3 Reactor

El correcto diseño del reactor es esencial para el proceso, por lo que en primera instancia se deben identificar cuáles serán las características críticas de éste. La materialidad del reactor no debe reaccionar con los elementos que se encuentran en el interior, la relación de la mirilla con el reactor determinará la temperatura de estancamiento del reactor, dónde se debe conservar un flujo libre de estancamiento y con las menores pérdidas de carga entre entrada-salida de los gases inertes, vapor de agua y gases de reacción. La estructura debe ser capaz de soportar cualquier falla de bloqueo que se produzca en la salida y debido a las altas temperaturas que trabaja, dónde la presión al interior podría aumentar rápidamente. Por último, el diseño debe ser el adecuado para montar la espuma catalizadora, realizar las mediciones de la etapa

de entrada, oxidación-reducción, gases de salida y posterior acumulación de estos últimos.

Dicho lo anterior, se diseñó un reactor con 3 cámaras unidas por agujeros, una mirilla frontal, una reducción concéntrica Sch10 de 1[in] a 0.5 [in] desde la mirilla al eje de la segunda cámara, un acumulador central para la radicación, cuatro entradas hacia la primera cámara, una salida en la tercera cámara y cuatro entradas para instalación de termocuplas. Esto está dispuesto en 3 piezas con sus respectivos canales para instalación de empaquetaduras en sus uniones, las tres piezas son unidas por ocho espárragos de 8 [mm]. El volumen donde se dispone en catalizador corresponde a 1,131 [cm^3].

El acumulador central corresponde a un tubo de ensayo de cuarzo de 40 [mm] de diámetro y 90 [mm] de alto, donde se concentrará la radiación captada. La materialidad de cuarzo se utiliza por su capacidad de tolerar altas diferencia de temperatura (bajo coeficiente de dilatación), soportar valores extremos de temperatura (1100 °C en tiempos mayores a 60 [min]), tener un buen porcentaje de transmisibilidad en un amplio rango de longitud de onda y un bajo coeficiente de refracción. Esta se ubica en el centro del reactor, tiene contacto directo con el catalizador utilizado y con la reducción concéntrica.

Algunas consideraciones especiales que tiene el diseño son los siguientes:

- Relación de flujo de gases en entrada y salida: El flujo de vapor necesario dependerá de la masa y geometría del catalizador y debe mantenerse en un rango donde no se genere condensación por perdidas de carga o estancamiento. Para el ingreso del flujo se disponen 4 entradas con hilo de ¼ [in] NPT. Posteriormente ingresa a la segunda cámara por 20 orificios de 6 [mm] de diámetro, se retira del mismo por la misma cantidad de orificios con el mismo diámetro. Por último, ingresa al canal de salida por 4 orificios de 10 [mm] de diámetro para ser tomada la muestra por el canal de 20 [mm] de diámetro que

termina en un hilo de ½ [in] NPT. Bajo esta relación se deben considerar las limitantes del flujo de vapor y gas inerte.

- El diámetro de la mirilla se calculó en relación con la distancia que tiene reducción convexa, de manera que la radiación ingrese en el cuarzo y no en la reducción. También se toma en consideración la temperatura de estancamiento, entendiendo que este valor es mucho mayor al que utilizaremos. Por último, si bien se desea que la mirilla sea lo más pequeña posible, debido a que el seguimiento del sol será de manera manual inicialmente, se debe considerar que este será discreto y debe existir un lapso de tiempo entre su regulación.
- Debido a las altas temperaturas, el ambiente húmedo al que se expondrá el reactor y con el fin de que la reacción de este mismo no distorsione los datos a obtener se utilizará acero inoxidable 310 en las estructuras de los cuatro discos, 316 para manto y reducción convexa que reduce la proporción de la mirilla.

El diseño se elaboro en Autodesk Inventor donde se obtuvieron los planos de fabricación (ver figura 2-5).

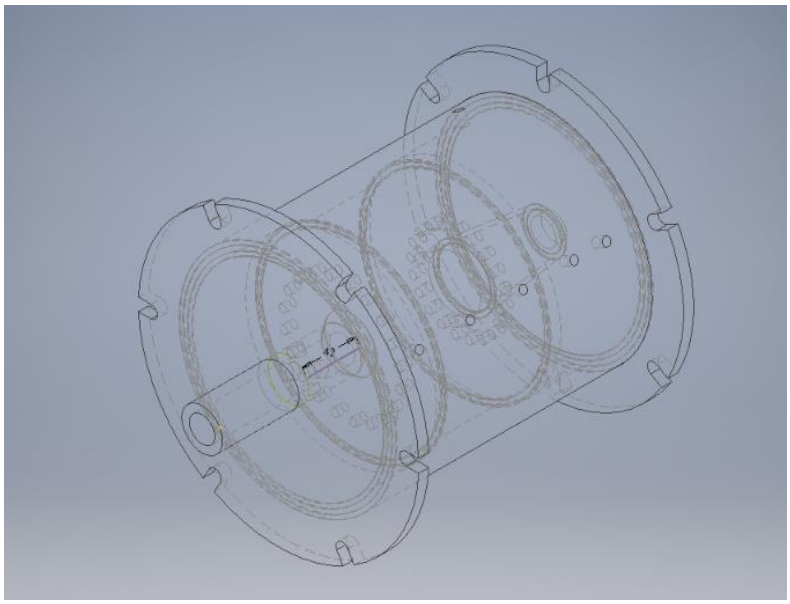


Figura 2-5*: Esquema del reactor. Fuente: elaboración propia.*

2.4 Equipos utilizados

A continuación, se describen los elementos anexos, la calibración y lo que se desea de estos.

2.4.1 Generador de vapor

Para suministrar vapor se utilizó un equipo fabricado y usado previamente en el desarrollo experimental del trabajo de titulación de Rodrigo Urzua [32] y modificado con posterioridad en el trabajo de titulación Lorena Espinoza [33]

La unidad corresponde a cuerpo de acero de forma horizontal, fabricado a partir de un cilindro de gas licuado de 5 [kg], una presión máxima de funcionamiento de 4 [bar_m] con un flange dispuesto en un extremo lateral, en él se ubica dos resistencias de 32.268 [ohm], un indicador de temperatura y una válvula de alivio de 3 [bar_m] (Apollo) de accionamiento automático. Ver figura 2-6.

Figura 2-6*: Generador de vapor. Fuente: elaboración propia.*

El funcionamiento de las resistencias eléctricas es de forma independiente y se utilizan con la conexión a un variador de voltaje (Variac) para regular la potencia suministrada.

Para la utilización del generador de vapor se comenzó con la limpieza interior, cambio de aislación a 40 [mm] de poliestireno de alta densidad en flange y aislación de fibra de cerámica de 25 [mm] camisa y conexiones. Por último, se realizaron nuevas mediciones del flujo de vapor generado para determinar si es posible utilizar las curvas antes propuestas.

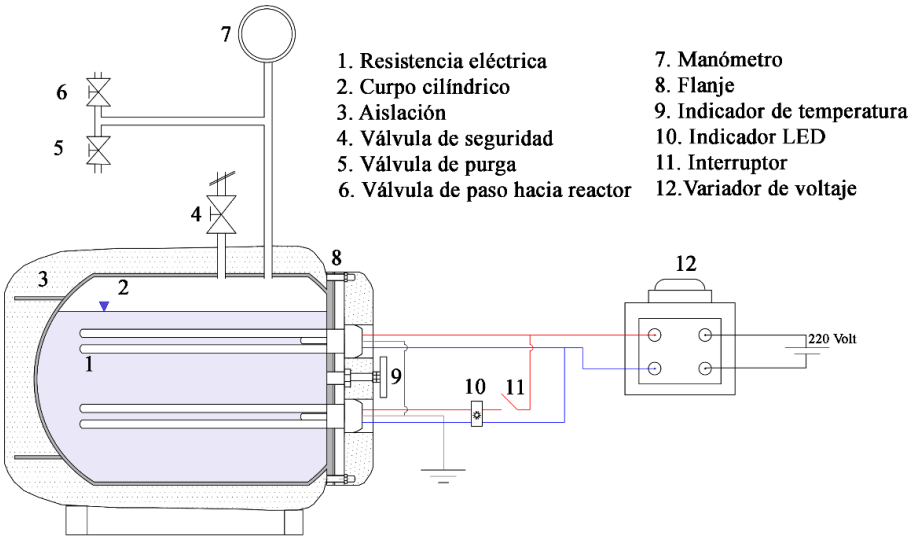


Figura 2-7*: Esquema de dispositivo generador de vapor. Fuente: L. Paz, 2018* [33].

Para lo anterior se siguió el mismo diagrama propuesto en el trabajo de título de Lorena Espinoza[33]. El ensayo se realizó con una única resistencia a 100 [V], 150 [V] y 210 [V] obteniendo como resultado los valores que luego se compararon junto a los obtenidos previamente. Ver gráfico 2-1.

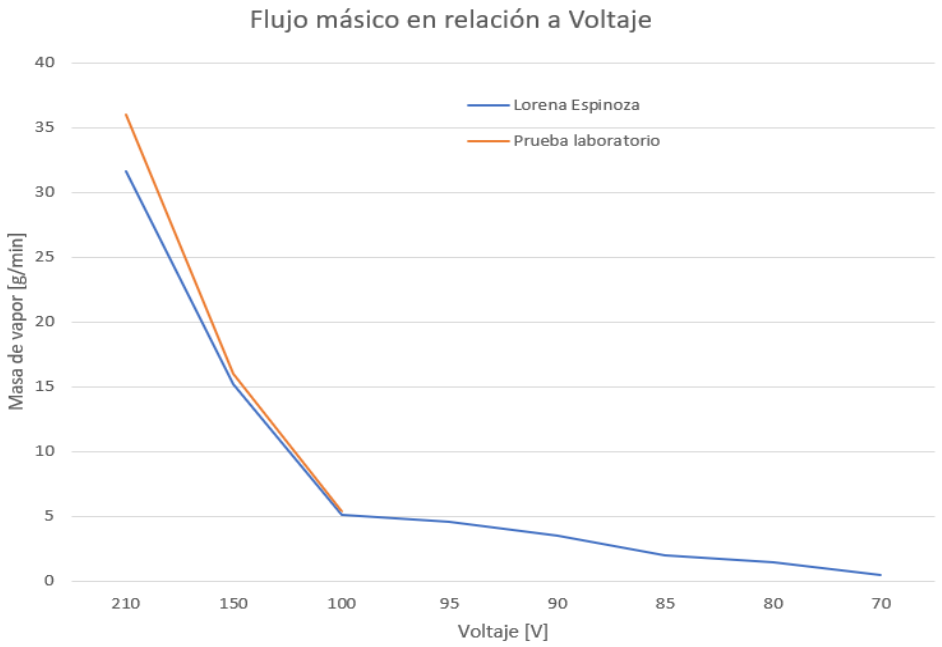


***Gráfico 2-1**: Relación flujo masico del generador de vapor vs voltaje en Variac. Fuente: elaboración propia.*

Debido a la baja diferencia existente a valores menores a 150 [V] y los valores bajos de flujo de vapor necesarios en el ensayo se decidió utilizar la curva propuesta.

$$\dot{V}_{H_2O}(1[bar_a]) = (0.416 * Voltaje - 31.105)\left[\frac{L}{min}\right] \qquad \text{E 2.9}$$

2.4.2 Camisa eléctrica con Variac.

Tomando en cuenta la masa del reactor y con el fin de disminuir los tiempos de ensayos se decidió utilizar una camisa eléctrica compuesta por una resistencia de Kanthal (FeCrAl) en forma helicoidal sobre el manto del reactor, conectada a un Variac para regular la potencia entregada al reactor. Es esquema de trabajo se observa en la figura 2-8 y la ecuación que sigue la potencia entregada es la siguiente:

$$P_{efectiva} = V^2 * 60.5^{-1}\ [W] \qquad \text{E 2.10}$$

La energía eléctrica utilizada para el Kanthal se obtiene de la instalación fotovoltaica dispuesta en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Figura 2-8*: Camisa eléctrica instalada a camisa del reactor. Fuente: elaboración propia.*

2.5 Resultados esperados

El principal estudio consistirá en la energía necesaria para la reducción de catalizador, ya que se espera poder obtenerla completamente de forma solar (térmica y eléctricamente). Para determinar estos valores se utilizaron los valores entregados en las tablas de energía de reacción estándar de Gibbs obtenidas en el libro Metallurgical Thermochemistry de Oswald Kubaschewski y presentadas anteriormente, valores que además han sido obtenidos de manera empírica para el óxido de fierro (III) [24].

Se busca elevar la temperatura exterior del reactor a 773 K con la camisa eléctrica a manera de existir una menor tasa de transferencia de calor desde el interior del reactor. Para ello se calcula la energía necesaria según la masa del reactor. Para modelar el tiempo que será necesario mantener el reactor bajo la radiación solar, se estima realizar un balance energético, considerando aislación, potencia térmica de la camisa, potencia térmica del concentrador parabólico, masas del reactor y óxidos metálicos.

2.6 Montaje de experimento.

2.6.1 Diagrama de operación.

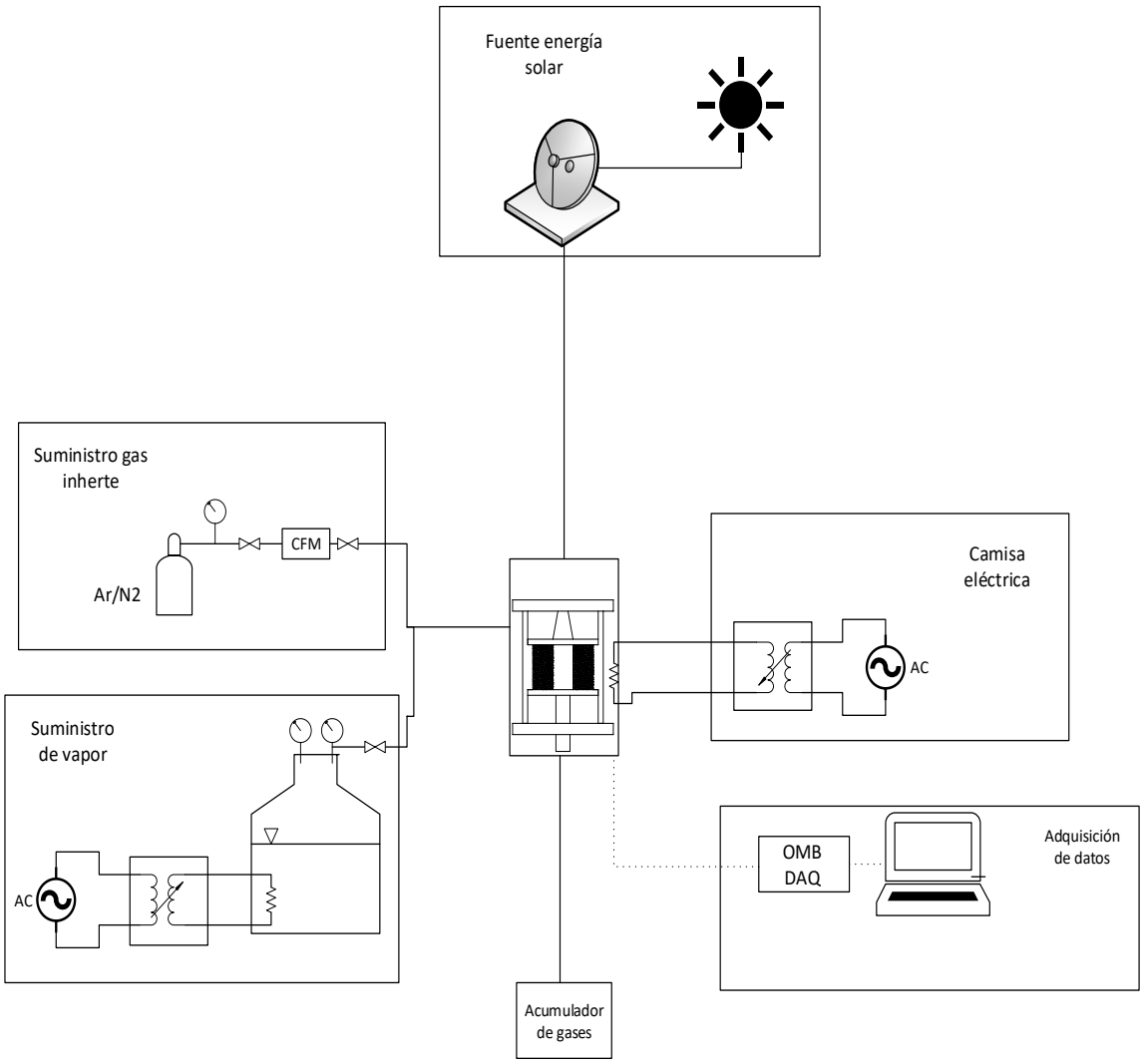


Figura 2-9*: Esquema de operación. Fuente: elaboración propia.*

2.6.2 Parámetros operacionales del modelo.

El desarrollo del experimento se hizo en la localidad de Quilpué, el 29 y 30 de mayo del año 2020. Los parámetros de azimut y elevación se obtuvieron Sunearthtool y quedan registrados en el anexo A.

Las mediciones de la radiación horizontal en las fechas son medidas con el piranómetro Kipp y Zonen CMP10 el cual entrega mediciones en mV, para traspasar estos datos a Watts se ocupa la fórmula E 2.11. Las mediciones de temperatura ambiente, camisa térmica y las cuatro internas del reactor son realizadas con termocuplas tipo K. Para la adquisición de datos de la instrumentación se utiliza el DAQ Omega OM-DAQ-USB-2401.

$$P_{Solar\ piranometro} = (\frac{V}{9.5}) * 10^6\ [W] \qquad \text{E 2.10}$$

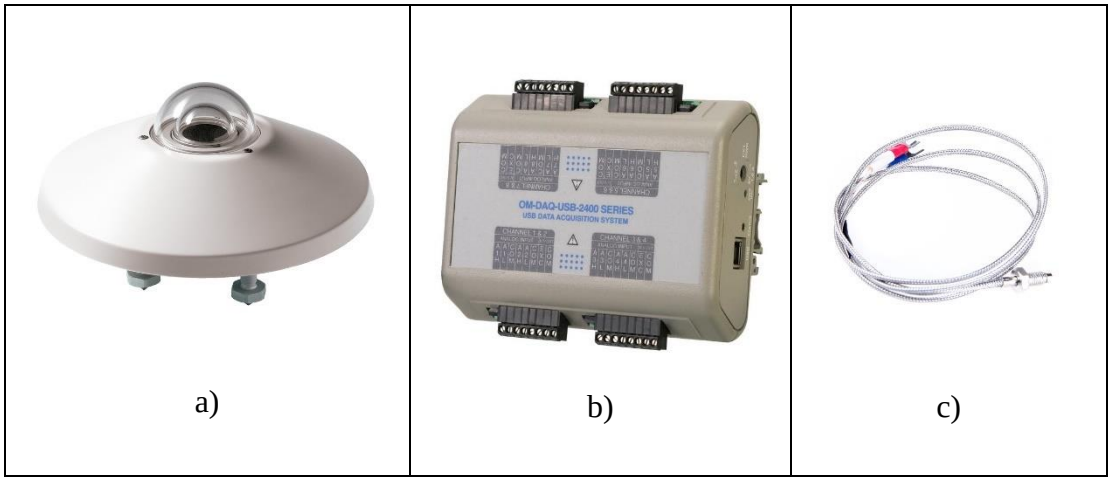


Figura 2-10: *a) Piranómetro Kipp y Zonen CMP10 b) DAQ Omega OM-2401 c) Termocupla tipo K.*

2.6.3 Acumulador de gases.

La acumulación de gases se realizará a través de un diseño ya propuesto en el trabajo de título de Jonathan san Martín [34]. Corresponde a un recipiente de 10 litros que se encuentra sumergido a su vez en otro recipiente de 50 litros de forma invertida, de manera de poder remover los gases dentro del recipiente de 10 litros. La entrada de los gases se realiza con una manguera que ingresa al recipiente de menor volumen por el sector ya hundido, de tal manera que a medida de ingresar los gases este comienza paulatinamente a subir sobre el nivel de recipiente de mayo volumen. La extracción de gases se realiza por la parte superior del acumulador por una válvula de paso con un niple de espiga.

Figura 2-11*: Sistema de acumulación de gases con trampa de agua. Fuente: trabajo de titulación de Jonathan San Martin* [34].

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de octubre del año 2019 el contexto nacional se ha visto con una serie de cambios tanto producto del estillado social como por la posterior pandemia. Dichos cambios y restricciones en la movilización, asistencia a espacios de la universidad, adquisición de materiales, entre otros, provocaron el que se acotaran los alcances de la presente investigación, dónde parte de los procesos y objetivos no pudieron ser abordados, entre los que se encuentran:

- Inhabilidad para obtención de análisis de laboratorio para el catalizador de óxido de fierro (III).
- Para el catalizador de óxido de zinc se imposibilita la realización del óxido de la materia prima y el análisis de laboratorio.
- Inaccesibilidad al análisis de gases a través del cromatógrafo.

Por lo anterior se decide no utilizar el catalizado obtenido, sino el priorizar el obtener un perfil térmico del comportamiento del reactor con aire en su interior. Así adquirir su caracterización, ejecutar las mejoras posibles en el diseño y recomendaciones respectivas para su posterior uso a modo de dar continuidad al proceso de investigación iniciado.

3.1 Fabricación

Con los diseños antes propuestos en el desarrollo experimental, se realizó la fabricación y montaje de los elementos que abarcan esta puesta marcha.

3.1.1 Reactor

La mecanización del reactor se realizó en una maestranza externa bajo los diseños desarrollados quedando con un peso total de 16,295 [g]. Para el sello del reactor se utilizó sellador para tubo de escape en base a sílice marca Permatex, el cual soporta temperaturas de 1,100 °C. La instalación del tubo de ensayo al interior del reactor requirió un buje de acero y sellado posterior con el mismo sellador de tubos de escape. En la salida del reactor se instaló una tee de acero galvanizado para la instalación de un manómetro y llave de bola para la salida de gases. La entrada de gas y vapor se realizó con fitting cónico NPT conectado a tubería de cobre que pasa sobre el manto térmico para aportar temperatura y evitar condensaciones entre la salida del generador de vapor y la entrada a la primera cámara.

Se realizó una prueba de estanqueidad de 2 [$bar_{(m)}$], la cual se repitió hasta tener correctamente sellado el reactor para su posterior montaje.

Una vez superada la prueba de estanqueidad se montó la camisa eléctrica en papel cerámico de 3 [mm] Isoter y Sobre la camisa la aislación, la cual corresponde a fibra cerámica ½ [in] Durablanket de Fiberfrax.

3.1.2 Brazo para el concentrador

Para fijar el foco al concentrador se debió diseñar y construir una estructura capaz de soportar el reactor. Para ello fué necesaria la consideración respecto a la masa del reactor, el tiempo de desarrollo del experimento y el porcentaje de bloqueo del sol que afectará al concentrador. En base a lo anterior se decidió construir un brazo tipo L sujeta al eje de la estructura del concentrador, las fijaciones son del tipo H con tornillo sin fin y tuercas para inmovilizarlo en su movimiento horizontal, dónde se le incorporó una regla de medición para calibrar. Para el movimiento vertical se cuenta con una gata la que moviliza el eje vertical en relación con el horizontal, de igual manera se incorpora una regla de medición para calibrar. Por último, para el movimiento angular del reactor, el cual debe quedar paralelo al concentrador para conservar el punto el foco,

se decidió usar una fijación en el eje vertical, un tensor ojo gancho 5/16 [in], una rueda de portón con placa cerrada 50 [mm] y una placa acero que se une al eje vertical a través de la soladura bisagra 3 [in] x 3 [in]. A la placa además se le realizan los mecanizados necesarios para la sujeción y la instrumentación del reactor que fue fijado en esta. El diseño se desarrolla en Autodesk Inventor.

Figura 3-1*: Imagen de brazo que soporta el reactor montado en el soporte del concentrador. Fuente: elaboración propia.*

Figura 3-2*: Imagen del diseño del soporte del reactor. Fuente: elaboración propia.*

3.2 Validación del modelo

Ensayos:

- 29 de mayo del 2020:
    - 13:33 – 16:22
    - Temperatura ambiente: 22°C – 27°C
        - Promedio de 24.16 °C
- 30 de mayo del 2020:
    - 11:15 – 20:31
    - Temperatura ambiente 20°C – 40°C
        - Promedio de 29.78°C

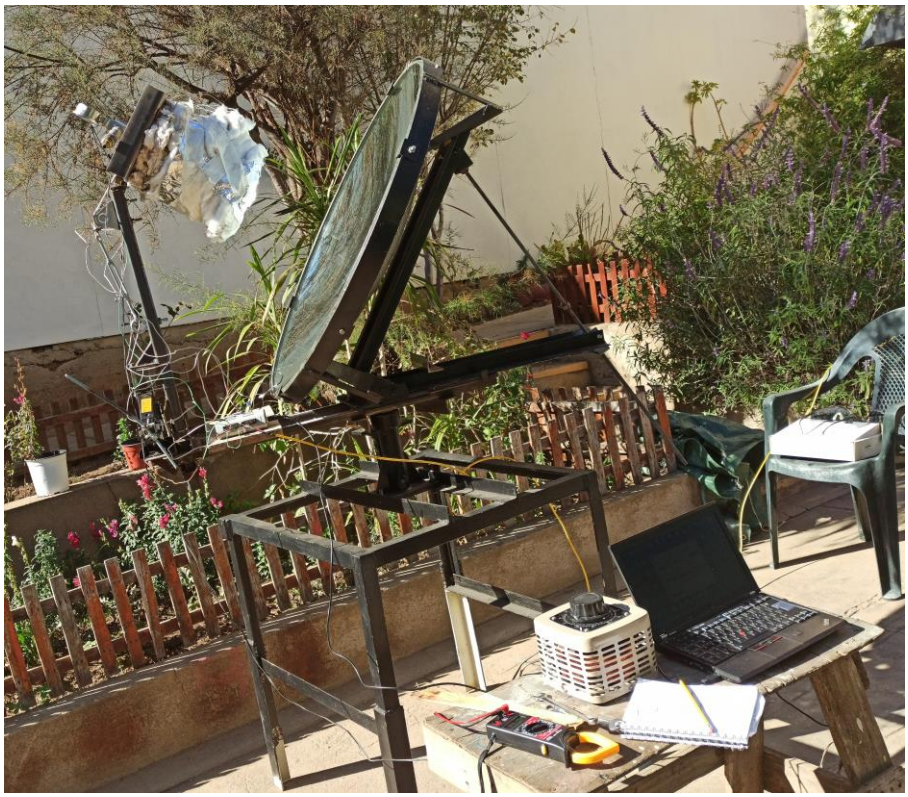


Figura 3-3*: Fotografía del ensayo realizado el día 29 y 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.*

3.2.1 Energía entregada por camisa eléctrica

Dentro de los dos días que se realizaron las pruebas, el suministro de energía entregado por la camisa eléctrica fue el siguiente:

- 29 de mayo del 2020 entre 13:14 y 14:34
    - 477.69 [W]
- 30 de mayo del 2020 entre 11:18 y 12:24
    - 477.69 [W]

3.2.2 Energía solar disponible

Para obtener la radiación máxima que puede entregar el concentrador al reactor se utiliza la ley Lambert (ver ecuación E 3.1). La cual queda expresada en la formula E 3.1. Además de esto se consideró una eficiencia del concentrador de 0.9 [-] debido al desgaste notorio por manchas en el lente.

$$I_0 = I_\alpha / \cos \alpha \qquad \text{E 3.1}$$

Durante el desarrollo del experimento se midió la radiación disponible en plano horizontal con el piranómetro. Los resultados se observan en el gráfico 3-1 para el 29 de mayo del 2020 y gráfico 3-2 para el 30 de mayo del 2020.

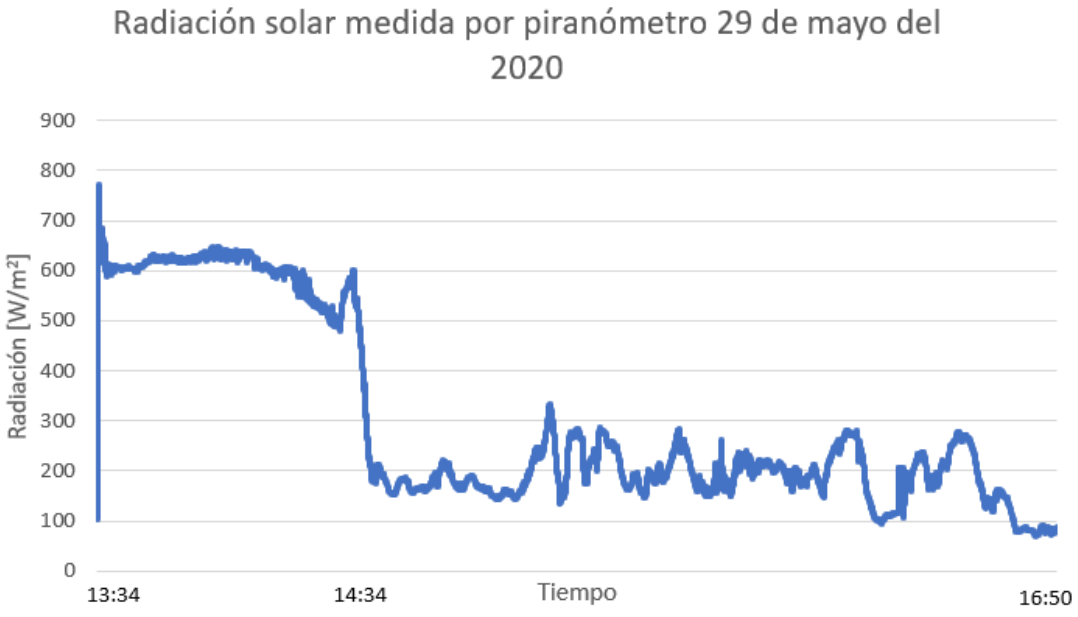


***Gráfico 3-1**: radiación solar 29 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.*

***Gráfico 3-2**: radiación solar 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.*

El día 29 de mayo se inició la toma de muestras a las 13:34 horas, a las 14:34 horas se desenfoco el reactor y se esperó la disipación de calor hasta las 16:50 horas.

El día 30 de mayo se inició la toma de muestras a las 11:15 horas, a las 16:00 horas se crea sombra producto de un árbol a las 16:20 horas se desenfoca el reactor y se espera la disipación de calor hasta las 20:31 horas.

3.2.3 Aislación utilizada

Para el cálculo de comportamiento térmico del reactor se considera una capa de aislación de 25 [mm] en todo el reactor de fibra cerámica. Un espacio libre en la mirilla de 80 [mm] de diámetro y una distancia sin aislar en la salida de los gases de 20[mm]. La fijación de esta al reactor fue con cinta de aluminio.

Para el modelo de pérdidas de calor se considera conducción y convección para los sectores aislados, convección y radiación para los sectores sin aislación. No se considera flujo dentro del reactor, con periodo de enfriamiento con el cual se obtienen las pérdidas del reactor. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$Q_{cilindro} = (T_1-T_\infty)/((l_n(r_2/r_1)/(2*\pi*L*k))+(1/(h*2*\pi*r_2*L))) \text{ [W]} \quad \text{E 3.2}$$

$$Q_{rad} = A*\xi*\sigma*(T^4_s-T^4_\infty)\text{[W]} \quad \text{E 3.3}$$

$$Q_{conv} = h*A*(T_s-T_\infty) \text{ [W]} \quad \text{E 3.4}$$

3.2.4 Set de ensayos

Como se menciona con anterioridad (en base a factores externos por contingencia y climáticos) se decide realizar dos ensayos en días consecutivos. Ambos consistieron en las siguientes etapas:

- Camisa eléctrica y radiación al foco.
- Solo radiación al foco.
- Sin ingreso de energía (solo enfriamiento).

Con esto se determina las pérdidas de calor, energía ingresada por concentrador parabólico y temperaturas dentro del reactor.

3.3 Perfil térmico en el reactor

Los perfiles térmicos obtenidos en las 5 termocuplas dispuestas son los siguientes:

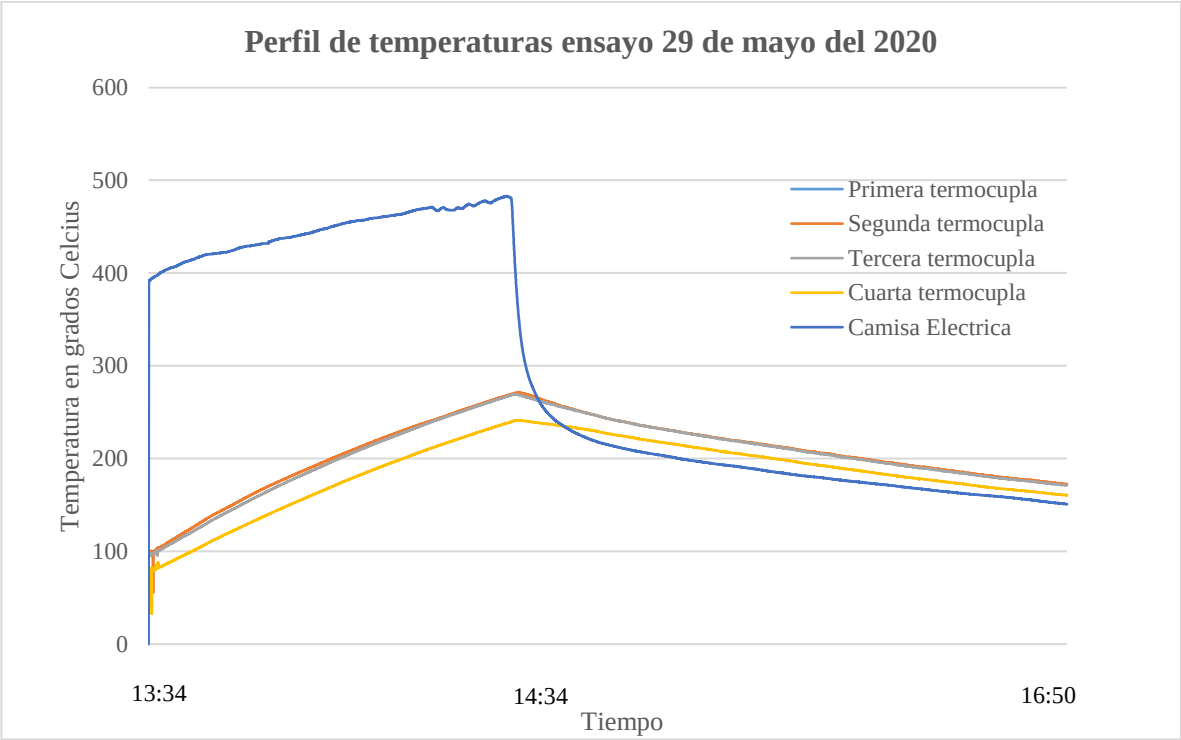


***Gráfico 3-3**: Perfil térmico 29 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.*

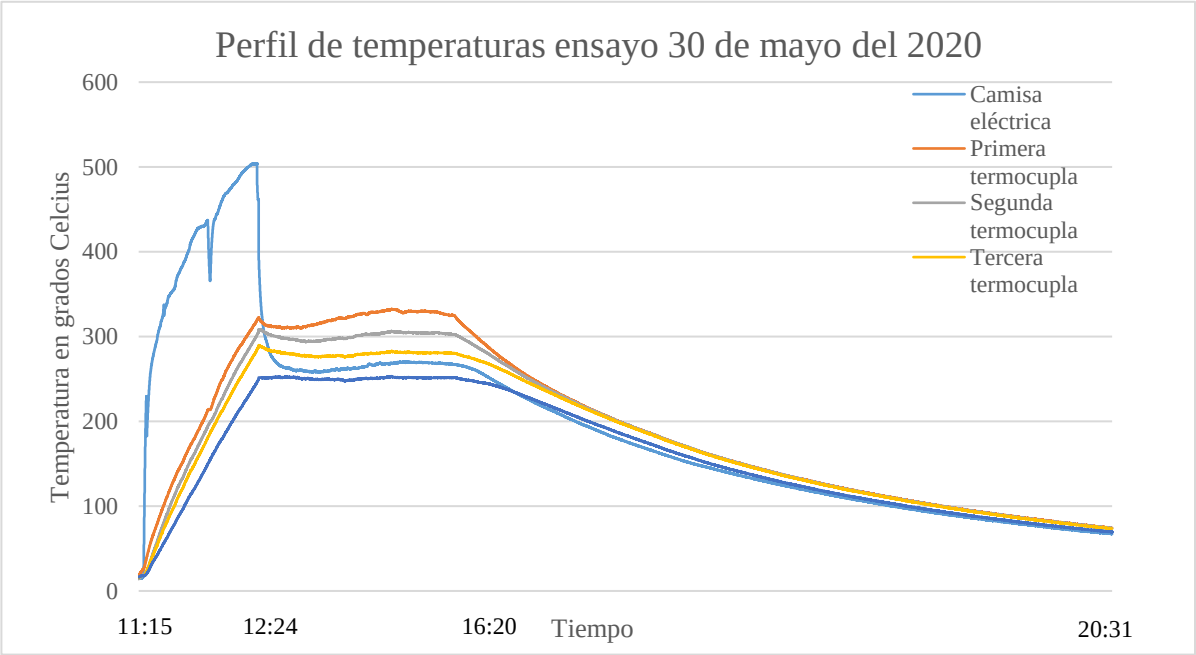


***Gráfico 3-4**: Perfil térmico 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.*

3.4 Balance térmico

Para determinar los perfiles térmicos se iteraron los resultados obtenidos en la etapa de enfriamiento. Con esto se logro dar con valores que modelen de mejor forma las pérdidas de calor. El coeficiente de convección se fijo en 13 [W/m^{2}K] y una emisividad del acero inoxidable 310 de 0.20 [-].

Con los perfiles térmicos obtenidos y las fórmulas antes planteas se modela el balance térmico de ambos ensayos.

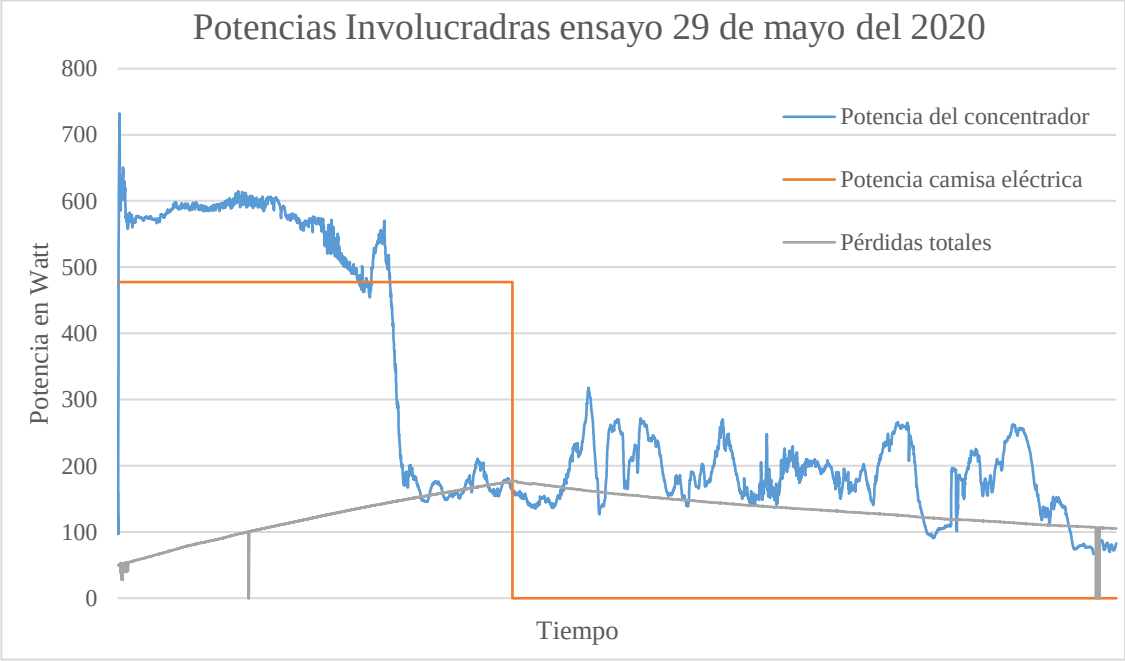


Gráfico 3-5: Balance energético 29 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.

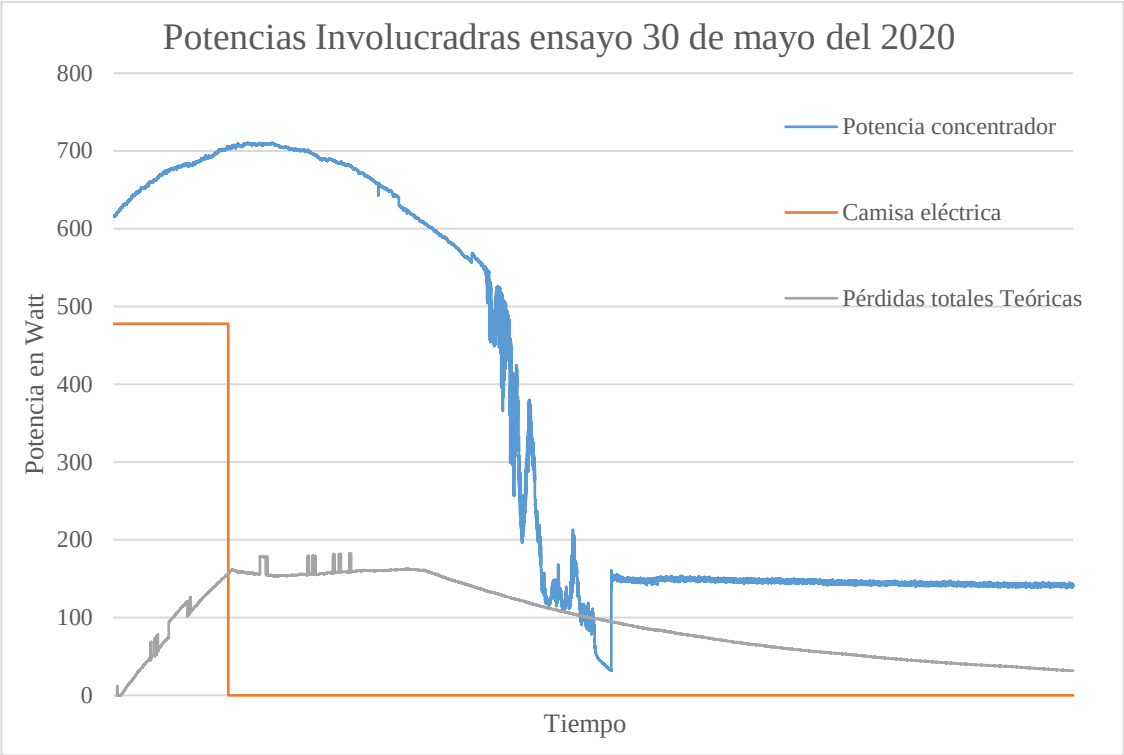


***Gráfico 3-6**: Balance energético 30 de mayo del 2020. Fuente: elaboración propia.*

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logro definir el estado del arte de procesos de separación térmica de la molécula de agua, tanto con óxidos metálicos como otros procesos que han tenido auge en este último tiempo. Esto abre un campo de investigación, donde se deben seguir una serie de pasos para lograr el desarrollo de esta tecnología.

Para llevar a cabo los ensayos se tuvo que determinar las fuentes energéticas disponibles y realizables para un ensayo conceptual. Gracias a esto los equipos quedaron operativos para seguir el desarrollo de nuevos ensayos. Dado el buen comportamiento de la manta eléctrica, se determinó que es una solución viable como energía complementaria.

El diseño del reactor y complementos utilizados quedaron documentos en el presente trabajo para que trabajos futuros puedan trabajar bajo en una base sólida. Se espera que en futuros desarrollos la versatilidad de estos diseños sirva para adaptarse a nuevos procesos. La estructura catalítica por su parte queda disponible para su caracterización y posterior uso en el reactor.

La alimentación de vapor de agua al reactor quedo operativa, refaccionada y calibrada. El acumulador de gases para el proceso no se construyó, pero se deja documentado su funcionamiento para su construcción.

El brazo que soporta el reactor quedo operativo en soporte de concentrador. Ademas de ello, la modelación en Autodesk Inventor sirve como base para hacer las mejoras correspondientes, ya sea por peso del reactor como para ajustarse a un nuevo concentrador.

Las pruebas realizadas permitieron caracterizar al reactor. Esto permite tener datos empíricos para modelar su funcionamiento en condiciones no ideales.

Luego de ser desarrollados los ensayos y una vez decantadas las ideas, se determinan las siguientes recomendaciones para los futuros investigadores.

En cuanto al diseño del reactor se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se debe modificar el diseño en las uniones de las piezas para empaquetaduras más idóneas al montaje y desmontaje del reactor. Esto simplemente modificado los terminales de la camisa del reactor.
- Para la medición de temperatura se sugiere utilizar bulbos mecanizados según hilo ¼'' NPT. Esto aumentara significativamente su tiempo de sellado.
- El sello del tubo de cuarzo debido a la potencia que ingresa por la mirilla tuvo deterioro, por lo que se sugiere buscar otro sellante para este sector del reactor.

En cuanto a la estructura que soporta el reactor al concentrador parabólico se realizan las siguientes recomendaciones:

- Si bien el principio que utilizo para el brazo es correcto, la materialidad debe ser más robusta para el peso del reactor y la calibración de este respecto al concentrador.
- Se sugiere realizar un soporte con ajuste mecánico, escalable a ser automatizable. Debido a que el ajuste manual obtuvo errores en el seguimiento del foco del concentrado. Ver figura 4-1

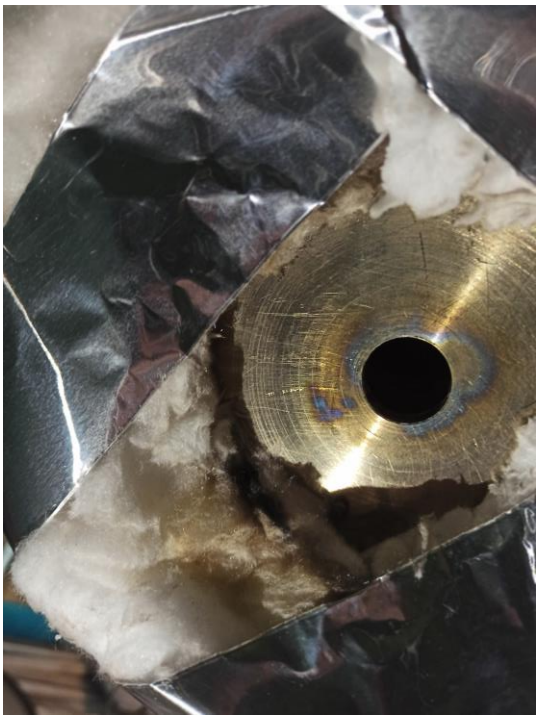


Figura 4-1*: Fotografía del reactor posterior a los ensayos. Fuente: elaboración propia.*

En relación con los catalizadores a utilizar:

- Se debe obtener la caracterización de los catalizadores antes de utilizarse en el reactor. De esta forma se podrá llegar a conclusiones respecto a los resultados que se obtienen.
- Si bien la estructura en forma de espuma se puede utilizar para pruebas de concepto, es recomendable llegar a ocupar estructura tipo panal de abeja. Las estructuras de panal de abeja permiten identificar el área de contacto que tendrá el catalizador además de poder determinar el deterioro, por ende, la ciclicidad del catalizador.

CAPÍTULO 5

5. REFERENCIAS

[1] J. Botas et al.:, *La Econ. Del Hidrógeno–Una Visión …*, (2005) 1–12 http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Producci?n+y+almacenamiento+de+hidr?geno#1

[2] BP:, (2020) 66 https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf

[3] Grupo Saesa:, *Grup. Saesa*, (2019) https://www.gruposaesa.cl/inversionistas/memoria-anual/

[4] R. Electricidad:, (2020) https://www.revistaei.cl/2020/07/27/costos-marginales-de-mantuvieron-en-cero-durante-7-horas-en-el-sistema-electrico-naciiona/#

[5] E. Nacional et al.:, (n.d.)

[6] CNN:, (2020) https://cnnespanol.cnn.com/2020/04/20/el-peor-dia-el-petroleo-de-ee-uu-termina-a-us-37-si-eso-es-un-numero-negativo/

[7] Ministerio de Energía:, *Minist. Energía Gob. Chile*, (2014) 1–154

[8] C.N.R. Rao et al.:, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 114 (2017) 13385–93 “10.1073/pnas.1700104114”,

[9] CNE et al.:, (2008)

[10] B.C.R. Ewan et al.:, *Int. J. Hydrogen Energy*, 30 (2005) 809–19 “10.1016/j.ijhydene.2005.02.003”,

[11] *Futur. Hydrog.*, (2019) “10.1787/1e0514c4-en”,

[12] F. Zhang et al.:, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41 (2016) 14535–52 “10.1016/j.ijhydene.2016.05.293”,

[13] J.A. Villajos et al.:, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41 (2016) 19439–46 “10.1016/j.ijhydene.2016.05.143”,

[14] E.I. De Doctorado:, (2018)

[15] S. Giovannini:, (2020) https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen/

[16] (n.d.)

[17] F. Yilmaz et al.:, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 56 (2016) 171–78 “10.1016/j.rser.2015.11.060”,

[18] T. Nakumura:, *Sol. Energy*, 19 (1977) 467–75

[19] M.J. Montes et al.:, *Prod. Hidrógeno a Partir Energía Sol.*, (2011) 1–14

[20] A. Weidenkaff et al.:, *Thermochim. Acta*, 359 (2000) 69–75 “10.1016/S0040-6031(00)00508-6”,

[21] S.Z. Baykara:, *Int. J. Hydrogen Energy*, 29 (2004) 1459–69 “10.1016/j.ijhydene.2004.02.011”,

[22] P.D.H. Solar:, (2007)

[23] P. Charvin et al.:, 32 (2007) 1124–33 “10.1016/j.energy.2006.07.023”,

[24] A. Steinfeld et al.:, *Sol. Energy*, 65 (1999) 43–53 “10.1016/S0038-092X(98)00092-9”,

[25] S. Abanades et al.:, *Sol. Energy*, 80 (2006) 1611–23

“10.1016/j.solener.2005.12.005”,

[26] A. Haeussler et al.:, *AIMS Mater. Sci.*, 6 (2019) 657–84 “10.3934/matersci.2019.5.657”,

[27] S.B. Han et al.:, *Sol. Energy*, 81 (2007) 623–28 “10.1016/j.solener.2006.08.012”,

[28] C.L. Muhich et al.:, *Int. J. Hydrogen Energy*, 43 (2018) 18814–31 “10.1016/j.ijhydene.2018.08.137”,

[29] C. Agrafiotis et al.:, *Sol. Energy*, 79 (2005) 409–21 “10.1016/j.solener.2005.02.026”,

[30] L. Xiao et al.:, *Renew. Energy*, 41 (2012) 1–12 “10.1016/j.renene.2011.11.023”,

[31] R.B. Diver et al.:, *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, 130 (2008) 0410011–18 “10.1115/1.2969781”,

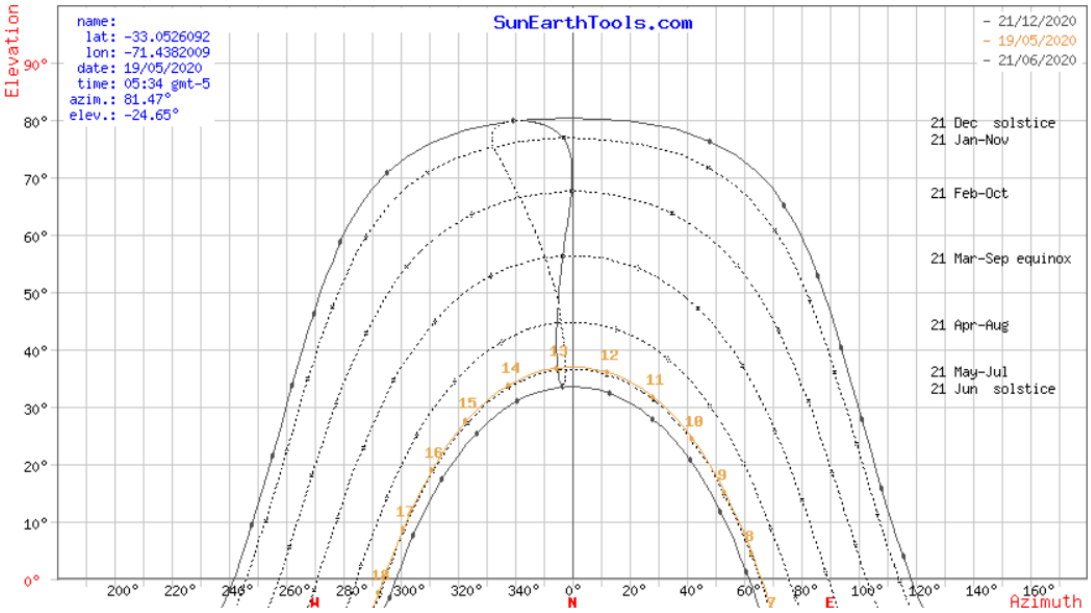
[32] R.E. Urzúa Bobadilla:, Diseño e implementación de un sistema de generación de gas de síntesis a partir de carbón y vapor de agua producido con aporte solar, UTFSM, 2016

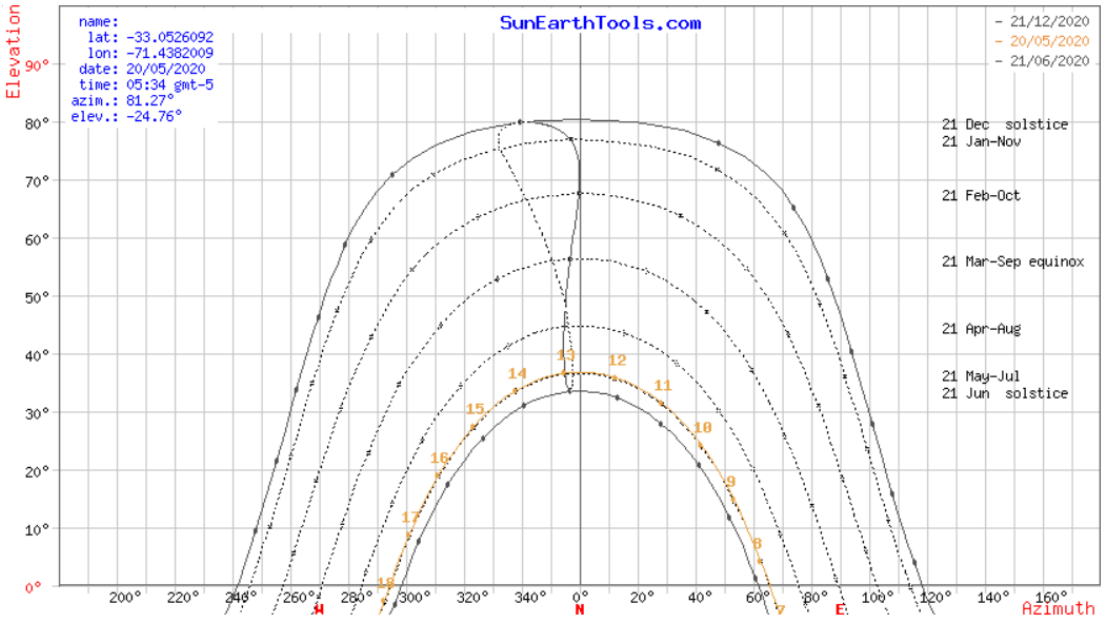
[33] L. Paz et al.:, (2018) 150

[34] J. San et al.:, (2017)

ANEXOS

Anexo A: Azimut y elevación (-33.0526092, -71.4382009)





Anexo B: Parámetros operacionales de modelo

Dimensiones del reactor

Largo	:	0.220	[m]
Diámetro	:	0.202	[m]
Masa	:	16.295	[kg]

Características del acero 316

Coeficiente de expansión térmica @20-100°C	:	40	[%]
Densidad	:	7.96	[g/cm^3]
Calor especifico a 23°C	:	502	[J/kg K]
Emisividad	:	0.2	[-]
Punto de fusión	:	1370-1400	[°C]

Características Kanthal

Resistencia eléctrica	:	1.45	[Ω mm^2/m]
Coeficiente de expansión térmica @20-500°C	:	$1.2*10^{-5}$	[K^{-1}]
Temperatura máxima de operación	:	1400	[°C]

Características Fibra cerámica Durablanket de Fiberfrax

Temperatura máxima de funcionamiento	:	1250	[°C]
Conductividad térmica a 600°C	:	0.18	[W/mK]
Espesor	:	0.5	[in]

Constantes de Stefan-Boltzmann	:	$5.67 * 10^{-8}$	[W/m^{2}K^4]