



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“SIMULACIÓN DE LA TERMODINÁMICA
DE LA TERMÓLISIS SOLAR DEL AGUA”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

P R E S E N T A:

DIANA MORENO NAVA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ ANTONIO BARRERA GODÍNEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx. 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice general

1. Introducción	5
1.1. Contexto histórico y social de la energía	5
1.1.1. La energía, una visión a través del tiempo	5
1.1.2. Las crisis energéticas de 1973 y 1979	10
1.1.3. Tercera revolución industrial, la era de las energías renovables	12
1.1.4. Descentralización de la energía	13
2. Revisión de la literatura	16
2.1. El Hidrógeno como combustible.	16
2.1.1. Métodos de obtención de hidrógeno	17
2.2. Tecnología para el uso del hidrógeno como combustible en la generación de electricidad	21
2.2.1. Concentrador solar	22
2.2.2. Celdas de combustible de membrana polimérica	24
3. Hipótesis	27
4. Objetivo principal	28
4.1. Objetivos secundarios	28
5. Metodología de trabajo	29
6. Resultados	31
6.1. Consumo de energía eléctrica de una casa	31
6.2. habitación en un bimestre	31
6.2.1. Cálculo del área de la monocelda	32
6.2.2. Cálculo del número de monoceldas	32
6.2.3. Cálculo de la temperatura óptima de descomposición del Cu_2O .	34
6.3. Balances de energía	37
6.3.1. Generación de O_2	38

6.3.2. Generación de H_2	39
6.3.3. Enfriamiento del O_2	39
6.3.4. Enfriamiento del H_2	40
6.3.5. Calentamiento y evaporación del H_2O	41
6.3.6. Balance global de energía del proceso	42
6.4. Estimación de la superficie de captación solar	43
6.5. Recomendaciones de dimensiones y conexión del reactor	44
6.6. Diagrama energético del proceso	49
6.7. Esquema general del proceso	50
7. Discusión de Resultados	51
7.1. Ventajas	53
7.2. Desventajas	54
8. Conclusiones	56
Bibliografía	58

Resumen

El presente trabajo surge en respuesta a la necesidad mundial de la búsqueda de nuevas formas de energía que sustituyan de forma eficiente a los combustibles fósiles, debido a la crisis energética que estamos viviendo y a la contaminación ambiental que ha sido provocada por la quema de estos aunada a la sobreexplotación de los recursos naturales que viene aunado a la producción de los mismos. Se propone la producción sustentable y eficiente de hidrógeno y oxígeno, para competir con los combustibles convencionales, Se analiza el uso del proceso de termólisis del agua para poder regenerarlos y luego alimentarlos a celdas de combustible para producir electricidad. Se estudia el caso de requerir satisfacer la demanda de un hogar común en la Ciudad de México. El diseño del proceso parte en el uso de datos de consumo de energía eléctrica, las propiedades termodinámicas, los balances de energía, los requerimientos energéticos del proceso y las especificaciones técnicas de tecnologías ya existentes de concentradores de energía solar y de producción de electricidad via celdas de combustible. Se demostró la viabilidad termodinámica de la pirolisis solar. A si que se propone un sistema de generación de electricidad para satisfacer las demandas en-

energéticas actuales. Se anticipa como ventajas que es un proceso cerrado, hermético y que se satisfacen las necesidades energéticas térmicas del sistema propuesto únicamente con energía captada de la radiación solar y se podría llevar a cabo todo el proceso en un hogar convencional.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto histórico y social de la energía

"Hay algo más importante para la especie humana que la conquista del pan: Es la conquista de la energía, de la cual el pan es uno de los infinitos resultados"[7]

1.1.1. La energía, una visión a través del tiempo

En tiempos modernos avances científicos y tecnológicos han sido fenómenos que se ha estado ocurriendo increíblemente rápido, pero ningún avance en ningún campo de estudio podría ser posible sin el uso de alguna de las múltiples formas de energía existentes. Esto queda asentado en la evolución del ser humano que se aceleró conforme este encontró la forma de usar la energía de su entorno a su favor para poder sobrevivir, adaptarse al mundo y mejorar física e intelectualmente, Siendo un parteaguas

en la evolución humana el descubrimiento del fuego, el cual fue la primera forma manipulable de energía que conoció el hombre, aproximadamente hace unos 500 mil años[11]. El hecho de controlar el fuego (una combustión), le permitió obtener una fuente de calor y luz que podía ser utilizada en innumerables aplicaciones; por lo tanto surgió la necesidad de conservarlo, generarlo y transportarlo.

La utilización del fuego dio como resultado un aumento en la actividad humana, ya que la noche y el frío no era más un impedimento y las actividades no debían cesar o disminuirse cuando estos llegaban. La cocción de los alimentos proporcionó un mejor aprovechamiento y digestión de los mismos, que provocó que el cerebro de nuestros ancestros creciera, gracias a la mejor obtención de nutrientes y los llevó a ser capaces de realizar procesos mentales más complejos, que dio como resultado el inicio de la evolución tecnológica y social de los seres humanos[19].

Aunado al descubrimiento del fuego, se dio la implementación de la agricultura y fue así que comenzó una nueva forma de vida, en la que el hombre dejó de ser nómada y comenzó a ser un ser sedentario, buscando ya no solo sobrevivir, si no vivir lo más pleno y cómodamente posible.

Otro ejemplo de que el desarrollo cultural, social, económico y tecnológico va de la mano con el consumo de combustibles para generar energía y que entre estos hay una relación simbiótica, es el encuentro entre Europa y América en el año de 1492[22] cuando existió una carestía de madera debido a la sobreexplotación de los bosques, ya que la madera se utilizaba para construir barcos mercantes, causado por el crecimiento

en el transporte marítimo, barcos de guerra y estructura lo que impulsó a su vez el desarrollo de la metalurgia, esto como protección de los barcos mercantes.

Entre los años de 1400 a 1600 el aumento demográfico fue notorio, pasando de 52 a 89 millones de habitantes a nivel mundial[19]. Con la nueva vida que inicio el ser humano, y en su afán de satisfacer su necesidad de conservar su propia energía, comenzó a buscar la manera de inventar nuevas tecnologías para que lo sustituyeran en la labor manual. Todo esto generó a su vez otra clase de necesidades, aumentó la demanda de bienes y servicios y por ende creció el consumo energético, por lo que la madera como combustible dejo de ser suficiente para satisfacer a la población mundial lo que dio cabida a la búsqueda de nuevos combustibles y nuevas herramientas tecnológicas para su aprovechamiento.

La postulación de los principios de conservación, las leyes de la termodinámica, el avance en la comprensión de los fenómenos eléctricos y magnéticos, así como la formulación de las leyes de la electricidad y el magnetismo, sentaron las bases para la comprensión de los fenómenos de transferencia de calor y la posibilidad de producir trabajo mecánico a través de diferentes mecanismos, apareciendo en 1698 la máquina de vapor de Thomas Savery, implementada mayormente en la industria minera y que es el primer registro del uso industrial del carbón como combustible para realizar trabajo mecánico, posteriormente dicha máquina fue mejorada en 1712 por Thomas Newcomen y James Watt. La máquina de vapor de Newcomen generaba únicamente una potencia aproximada de 300 W o 0.40 HP[25].

La sustitución de un combustible por otro, tiene varias motivantes, de las cuales las más importantes en primer instancia son la escasez y/o incremento de precios de otro combustible, la densidad energética de este y el manejo desde el punto de vista técnico de dicho combustible, es decir su transporte y almacenamiento, dejando en términos secundarios los productos de desecho que genera cuando se lleva a cabo la combustión. Todo lo anterior quedó como ejemplo reflejado en la época de 1700 cuando la escasez de madera en Europa provocó el uso del carbón mineral, que paso de 2.5 millones de toneladas de carbón extraído en esa época a 16 millones de toneladas en 1829 y esto marcó el inicio de lo que ahora se denomina como la Primera Revolución Industrial que sentó las bases científicas, tecnológicas y sociales de las sociedades contemporáneas.

Pocos años después de la máquina de vapor en 1859, se da la primer perforación de un pozo de petróleo que contribuye al desarrollo tecnológico de los motores de combustión interna que en un principio funcionaban con gas pero al ser difícil de manipular se comienza a preferir el uso de la gasolina en su lugar, registrándose un aumento en el consumo del petróleo entre los años de 1870 y 1885 donde el desarrollo de la industria automotriz y de la siderurgia comienzan a tomar fuerza gracias a la producción en serie de automóviles y a la construcción de ciudades enteras que requerían de estructuras metálicas que les diesen soporte, logrando que la industria del acero saltara de una producción de 18.000 toneladas en 1740 a 700.000 toneladas en 1830 [25]. Así se fijaron las bases de la industria pesada y se inicia la segunda

revolución industrial la cual fue la carta de presentación de la potente industrialización de Estados Unidos de América del Norte[22].

En este periodo es más evidente la sustitución del combustible por excelencia (madera) gracias al desarrollo e implementación en 1884 de las turbinas de vapor del ingeniero Charles A. Parsons que funcionaban con carbón, las cuales fueron usadas para la generación de electricidad en centrales hidroeléctricas siendo así como se comienza el dominio de este combustible en la producción de energía eléctrica. En 1897 General Electric logró un acuerdo para hacer uso del patente de Charles Curtis quien había desarrollado una turbina de vapor del tipo de impulso donde el vapor de agua se expande a través de toberas para alcanzar una velocidad alta, la cual fue utilizada para la producción de electricidad, después de que se le realizaron varias mejoras comenzó su labor en 1901, dando una potencia de 500 kilowatts, cabe mencionar que hoy en día se entregan 200 a 500 veces esa potencia, permitiendo una veloz industrialización de las ciudades[23].

Pese a que en esta etapa existieron tres grandes reveses: las dos guerras mundiales y la Gran Depresión económica de los años treinta del siglo xx, el avance científico-tecnológico no cesó del todo, ya que también se introdujo nueva maquinaria, nuevas fuentes de energía y nuevas materias primas, como el Zn, Ni, Mn, Cr, importantes por ser elementos auxiliares en la producción de aceros, Cu y Al importantes en la industria eléctrica. Todo esto propició el comienzo de la producción en masa y de bienes estandarizados que requerían grandes desembolsos en capital fijo (instalaciones

y maquinaria), un proceso productivo de flujo continuo, la utilización de maquinaria muy especializada y muy cara y el empleo de una mano de obra semicualificada y barata que motivó un movimiento migratorio de carácter explosivo.

El mundo se volvió más productivo gracias a los efectos combinados de los avances tecnológicos, el aumento de los salarios y el abaratamiento de los precios, lo que permitió que los artículos que en principio estaban reservados para una minoría social, se pudiesen poner al alcance de casi todos los bolsillos, provocando una mayor demanda energética mundial que había que satisfacer.

1.1.2. Las crisis energéticas de 1973 y 1979

A nivel mundial el crecimiento industrial se triplicó entre 1950 y 1970, la economía capitalista de los países desarrollados registró un periodo de crecimiento, certidumbre y estabilidad, propagándose la expansión de las multinacionales. Ésto no duró mucho tiempo ya que hubo un alza de precios debido a que en octubre de 1973 estalló la primera crisis energética del petróleo, como consecuencia de la guerra del Yom Kippur entre israelíes y árabes, en la que vencieron los primeros. Los árabes tomaron represalias contra los países que apoyaron a Israel durante la guerra e hicieron que la organización de países árabes exportadores de petróleo (OPEP) multiplicara por cuatro el precio del barril, que subió de 3 a 12 dólares.

La segunda crisis energética, también del petróleo, sobrevino en 1979, a propósito de la revolución islámica iraní, la guerra Irán-Irak y la caída de la URSS. Esta vez

se triplicó el precio del barril, alcanzando los 32.23 dólares[28], lo que desencadenó la inflación, el encarecimiento de las materias primas, el descenso de las inversiones, el incremento del paro, la reducción del comercio internacional, balanzas de pago deficitarias, creciente endeudamiento de los países del Tercer Mundo y descenso de las tasas de crecimiento económico. Por lo que a partir de 1983 la OPEP se vió obligada a reducir sus tarifas y limitar la extracción, ante la disminución de la demanda mundial y la competencia de los nuevos productores de petróleo.

Dado que la tecnología que se desarrolló en el curso de la Segunda Revolución Industrial, y que era la que se empleaba en la década de los 70's, se fundaba en el empleo del petróleo barato, un incremento de precios tan grande como el habido en el crudo generó una conmoción económica gigantesca, lo que obligó a las potencias industriales a reorientar toda su tecnología, detonando la búsqueda de nuevos combustibles para la producción de energía, motivando a las universidades, centros de investigación y a todo tipo de industrias en todo el mundo a crear e implementar soluciones energéticas sostenibles, que atiendan a la sociedad actual sin comprometer la calidad de vida de generaciones futuras, ya que los estragos ambientales y sociales de la utilización desmedida de los combustibles fósiles comenzaron a pasar factura al planeta entero.

1.1.3. Tercera revolución industrial, la era de las energías renovables

La nueva era viene marcada por el uso de la electrónica e informática para promover la producción automatizada, por tecnología con una elevada productividad que emplee menos materias primas valiosas o tradicionales que sus precedentes, la disponibilidad de materiales no metálicos a escala industrial, el desarrollo de la biotecnología y la entrada en acción de las fuentes de energía diversificadas y renovables.

Pese a que la demanda de energía para la economía mundial se ha incrementado de modo exponencial, a causa de la explosión demográfica y el crecimiento de la renta media disponible, y la maduración en el logro de la eficiencia de los procesos de producción, no se ha encontrado o creado un combustible que pueda solo con todo la carga energética y que satisfaga las necesidades socio-económicas de todo el mundo, como en su momento lo hicieron aparentemente, el carbón en la primera revolución industrial o el petróleo en la segunda [9]. La oferta energética se está integrando con una combinación de fuentes, muchas de las cuales dependen del uso de tecnologías aun en desarrollo.

En el año 2005 se reportó que las reservas de petróleo a nivel mundial susceptibles a ser explotadas eran lo equivalente a 1200 billones de barriles y las reservas de gas natural a 180 trillones de m^3 , siendo la velocidad de producción igual a 80 millones de barriles por día de petróleo y 7.36 billones de m^3 por día de gas natural [28]; por lo tanto, la capacidad mundial de abastecimiento de estos productos seria solamente

viable por 41 y 67 años respectivamente. Por lo que, la implementación de la energía nuclear, mareomotriz, geotérmica, eólica, energía de la biomasa y la solar para generar electricidad y calor, es el reto al que nos enfrentamos en el nuevo siglo, ya que el uso combinado de estas, actualmente solo abarca el 20% de la producción mundial de energía primaria [19], en comparación a la utilización de gas, petróleo y carbón, lo que sigue propiciando la hegemonía de los países que cuentan con estos recursos naturales, la capacidad adquisitiva y el desarrollo tecnológico para proveerse de estos medios y ha fomentado la desigualdad social general.

1.1.4. Descentralización de la energía

Con la tercera revolución industrial viene la propuesta del desarrollo de ciudades inteligentes que pretenden ser descentralizar la energía, dejando de lado la dificultad cerca-lejos que representa una brecha entre el consumidor de energía y el productor de la misma, utilizando las nuevas tecnologías en sus propios hogares para autoabastecerse de la energía eléctrica que requieren, dando cabida a la electrificación de los países o zonas empobrecidas, que por cuestiones de ubicación geográficas, no ha sido posible llevarles electricidad hasta los hogares que la conforman, ya que los costos de instalación y transporte, superan los beneficios económicos que podrían tener las empresas generadoras de electricidad.

El más grande problema al que se enfrenta la descentralización de la energía eléctrica, es a la intermitencia de las fuentes de energía que se pretenden utilizar para

este fin, ya que por excelencia son; la energía solar y eólica, las cuales solo están disponibles de manera eficiente en ciertas horas del día y/o ciertas épocas del año además de que su intensidad depende también de la ubicación geográfica. Una forma para aprovechar la energía generada al momento de que se presenta una intermitencia, es almacenarla para posteriormente usarla cuando se requiera, lo que nos lleva también a la búsqueda de mejores sistemas de almacenamiento que disminuyan las pérdidas energéticas[16].

Ya que el mercado de la energía solo se hace responsable de controlar las fuentes y las redes de distribución pero no se hace responsable del consumo austero o de la reducción de emisiones, de ser alcanzando el cometido anterior, se abriría paso a evitar el autoconsumo irresponsable ya que cada persona sería consiente de la producción y consumo de la energía. Como consecuencia de esto, el consumo de combustibles fósiles se reduciría también; y por ende, todas las actividades que su extracción conlleva se verían frenadas en cierta medida, lo que provocaría que la contaminación ambiental se frenara en cierta medida, puesto que las elevadas concentraciones de gases efecto invernadero han provocado un fuerte impacto ambiental e inclusive ha llevado a los gobiernos a formular leyes más rigurosas que tratan de regular estas emisiones. Cabe señalar que tan solo en México, la producción de estos gases alcanzaron los 430.92 millones de toneladas en el 2014 [2], siendo uno de los objetivos del uso de las fuentes de energía alternas el evitar que estas cifras sigan en aumento. Se tiene previsto que al adoptarse el uso de la tecnología para el aprovechamiento de estos recursos renovables

y mejorar la eficiencia de las mismas, en el año 2050 las emisiones globales de dióxido de carbono se reduzcan en un 75 % y las leyes se modifiquen formando el camino de la constitución de una sociedad más igualitaria.

Capítulo 2

Revisión de la literatura

2.1. El Hidrógeno como combustible.

La decisión del recurso energético que se utilizará en cualquier país, debe estar en función del impacto al medio ambiente, el desarrollo tecnológico, las condiciones sociales, económicas y de seguridad de dicho país, además de la disposición natural del recurso [24].

En el siglo XXI (y desde el S.XX) la amplia búsqueda de fuentes alternativas de energía nos han hecho fijar la vista en el hidrógeno, el cual en condiciones estándar de temperatura y presión (273.15 K y 1 atm) es un gas diatómico, incoloro, inodoro, insípido y altamente flamable, con una masa atómica de $1,00794u$, con una densidad de $0.0899kg/m^3$, un poder calorífico de $23kcal/mol$, dos veces la del gas natural que es $12kcal/mol$ y 2.2 veces el de la gasolina que es de $11kcal/mol$, su temperatura de

combustión espontánea que es de $584.85^{\circ}C$ mientras que para el gas natural es de $539.85^{\circ}C$ [10] y tiene la gran ventaja de que su producto de combustión solo es el agua, además es el elemento más abundante en el universo y posee una gran densidad energética (energía que se puede aprovechar por diversas formas) [19].

La problemática de usar este elemento, es que no lo encontramos libre en la naturaleza en cantidades utilizables, ya que está combinado principalmente con el carbono en todo tipo de compuestos o con oxígeno en el agua, por lo que sintetizarlo y transportarlo implican altos costos. Ciertamente el hidrógeno es un vector energético, un portador de energía que está en forma secundaria y que se debe producir a partir de fuentes primarias, evitando usar en su síntesis al carbono y preferentemente producirlo por el aprovechamiento directo e indirecto de la energía solar. Aquí se desea usarlo como un medio de convertir la energía térmica solar en eléctrica, como se verá más adelante.

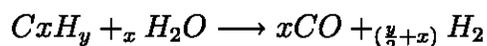
2.1.1. Métodos de obtención de hidrógeno

Actualmente se producen en el mundo aproximadamente 41 millones de toneladas de H_2 , que representan un valor energético de $5000TJ$. La demanda de energía mundial en 2015 fue de 6.07×10^8 Tj [3]. Esto significa que con el hidrógeno producido en el mundo se cubriría apenas el 0.00082% de las necesidades mundiales de energía primaria.

Los procesos para producir hidrógeno pueden ser clasificados en 4 tipos [8][1][12]:

1. Procesos térmicos: aquellos que requieren de energía calorífica para poder ser llevados a cabo.

1.a Reformado de gas natural: Conocida también como descarburización de hidrocarburos ligeros. Mediante este método se produce el 48 % del hidrógeno mundial, es aplicado a gran cantidad de hidrocarburos, pero principalmente se usa gas natural y vapor de agua. La reacción que se lleva a cabo a una temperatura de 1000 K da como residuo dióxido de carbono como se puede ver a continuación

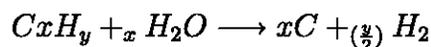


la mezcla gaseosa que así se produce es un combustible que también producirá gases de efecto invernadero y requiere de hidrocarburos.

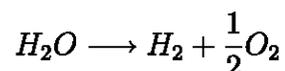
1.b Gasificación: Conocida también como descarburización de hidrocarburos pesados. Usualmente se realiza como una combustión con defecto de oxígeno y puede utilizar como reactivos de biomasa o carbón, se lleva a cabo a una temperatura aproximada a los 1100K y dependiendo del combustible se pueden obtener además de H_2 , CO , CO_2 y/o CH_4 . La reacción principal es estequiométricamente igual de la reacción llevada a cabo en el reformado de gas natural.

1.c Pirólisis (Cracking) : Se basa en la descomposición de un combustible sólido (biomasa) mediante la acción de calor en ausencia de oxígeno a una temperatura de 1000 K obteniéndose aparte de H_2 gaseoso, coque y en algunos casos donde el oxígeno no se puede eliminar completamente, también se obtienen como subproductos

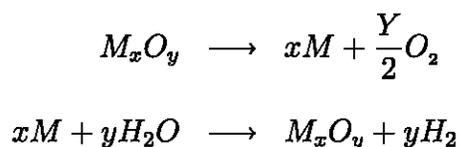
CO y CO₂. La reacción principal de este proceso es:



1.d Termólisis : Este proceso implica la extracción del hidrógeno de la molécula que lo alberga (hidrocarburo o principalmente agua), mediante la aplicación de calor que proceda de una fuente externa a la reacción química. La temperatura de proceso es alrededor de 2500 K siendo su reacción principal la ruptura de la molécula del agua en oxígeno e hidrógeno gaseosos:



1.e Reducción de óxidos metálicos: En las cuales se utiliza como intermediario un metal para romper la molécula de agua, tiene como gran inconveniente que suele llevarse a cabo a temperaturas de 2300 K en adelante y actualmente el mas estudiado es el ciclo Zn/ZnO pero las posibilidades son diversas ya que, este metal podría ser sustituido por algún otro y seguiría el mismo tipo de reacción química, como la siguiente:



2. Procesos electrolíticos: En los cuales se hace pasar una corriente eléctrica de

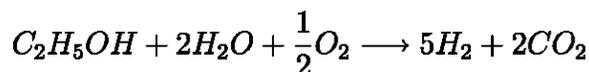
una fuente externa, para descomponer el electrolito que se encuentra en la solución conductora, a través de dos electrodos (cátodo y ánodo).

2.a **Electrólisis del agua:** Es un caso especial de los procesos electrolíticos, se lleva a cabo a temperatura ambiente y con este se genera el 4 % del H_2 mundial, aquí el electrolito no es el que se descompone (generalmente una sal iónica) si no que lo hace el solvente, que es el agua, la reacción general se puede representar como :



3. **Procesos de fermentación:** Usa principalmente biomasa para poder ser llevada a cabo y pueden ser de tipo alcohólica o de tipo anaeróbica

3.a **Fermentación alcohólica:** Se utilizan plantas que pueden almacenar energía solar, la cual la captan en forma de hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón o celulosa), de los cuales se obtiene etanol por fermentación, que posteriormente al ser purificado se le lleva a un tratamiento de reformado con vapor, que provoca una reacción de desplazamiento en la que sus productos son el hidrógeno y dióxido de carbono gaseosos como se observa a continuación:



3.b **Fermentación anaeróbica:** es una fermentación o digestión microbiana en ausencia de oxígeno, en la que se produce una mezcla de gases principalmente metano y dióxido de carbono, la cual es conocida como biogás, se lleva a cabo usando como

materia prima biomasa residual con alto contenido de humedad, ya que el metano obtenido se encuentra en un 50 a 70 % en masa en la mezcla, para obtener el hidrógeno, se pueden llevar a cabo cualquier procesos de reformado.

4. Procesos fotolíticos: En los cuales la utilización de luz solar para producir la hidrólisis del agua es fundamental, y se lleva a cabo por dos medios principalmente:

4.a Procesos fotobiológicos: haciendo uso de microorganismos como catalizadores biológicos y energía de baja intensidad (solar) para producir hidrógeno a partir de la molécula del agua, pero su eficiencia es baja en comparación con otros métodos, alcanzando solo un 6 a un 10 %.

2.2. Tecnología para el uso del hidrógeno como combustible en la generación de electricidad

Debido al hecho de que entre todas las fuentes alternativas para la producción de energía eléctrica existentes, este trabajo se centra en el aprovechamiento de la energía solar como fuente de alimentación energética para poder llevar a cabo un proceso en un sistema cerrado que genere hidrógeno y oxígeno gaseosos para que con estos se alimenten celdas de combustible, la tecnología presentada se limita a la que se planea utilizar en dicho proceso, que tiene como gran ventaja la producción de agua como subproducto en el proceso y esta se podrá recircular en el mismo.

2.2.1. Concentrador solar

La energía solar tiene la versatilidad de que puede ser concentrada para ser utilizada en un sinnúmero de tecnologías, además de no presentar contaminación ni trastornos en su uso adecuado, tiene la gran ventaja de ser ilimitada pero intermitente por algunos periodos de tiempo y debido a que el tiempo de vida del sol es muy largo a escala humana, la energía que podemos obtener de él se denomina renovable en contraste con los combustibles fósiles, no renovables, esto con relación al consumo y a la producción natural de los mismos.

Se considera que la energía solar es aquella energía radiante transmitida por el sol e interceptada en la tierra, la cual se emite por radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia y tiene su origen en procesos de fusión nuclear de elementos químicos ligeros en el núcleo para formar otros más pesados. En esta síntesis nuclear se provoca una reducción de masa y por lo tanto existe una liberación de energía equivalente a dicha pérdida ($E = mc^2$). [6]

México tiene una ubicación geográfica que se puede considerar estratégica para utilizar este tipo de recurso, la cual permite que la radiación solar tenga una incidencia superior en comparación a regiones más alejadas del ecuador[17], siendo la radiación solar máxima efectiva en la Ciudad de México de $2500 \frac{kWh}{m^2}$ al año [5] y es aprovechable por un periodo de entre 4 a 5 horas dependiendo de la época del año en la que se éste. [18].

La recolección y concentración de energía solar se basa en la utilización de sistemas

ya conocidos de arreglos de lentes de Fresnel que son vidrios o plásticos tallados, que provocan que al ser atravesados por los rayos solares, estos se comporten como si atravesarán lentes planos convexos. Los rayos de luz que llegan paralelos al eje óptico tienden a concentrarse en un punto o foco. Su diseño permite la construcción de lentes de gran apertura y una corta distancia focal, sin el peso y volumen del material que debería de usar en una lente de tamaño convencional[18] tienen la característica de que pueden ser montados cerca del suelo sin atenuar su capacidad de captación solar, y que poseen una alta eficiencia óptica y bajo costo de instalación en comparación a las celdas fotovoltaicas, además de que se fabrican actualmente de material polimérico como polimetilmetacrilato (PMMA) que exhibe alta transmisividad de espectro solar, estabilidad térmica y un índice de refracción similar a los dispositivos de vidrio [14][20].

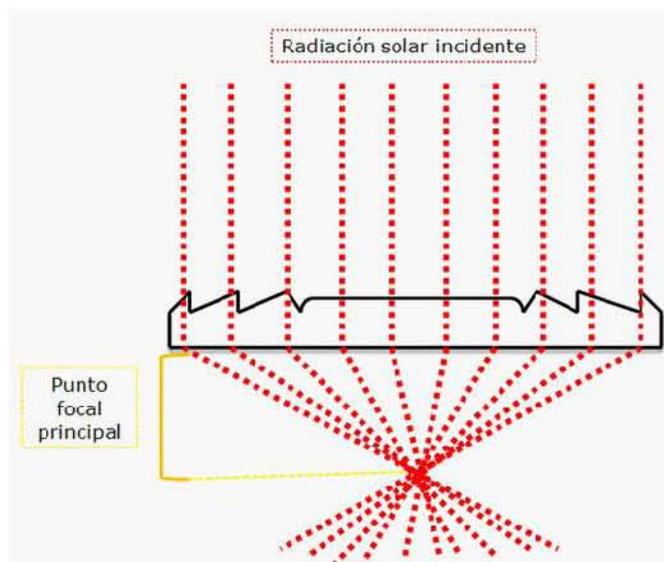


Fig.1 Diagrama de un lente de Fresnel

Este tipo de lentes permiten captar la radiación solar entrante a la tierra y concentrarla en un punto focal lo que permite que se puedan alcanzar temperaturas superiores a los $1200^{\circ}C$ en una hora de exposición solar y ésto es más rápido y con mayor potencia si se le combina con un heliostato que siga la trayectoria solar y redireccione la radiación al lente [15].

2.2.2. Celdas de combustible de membrana polimérica

Para la generación de electricidad se propone usar celdas de combustible de membrana polimérica intercambiadoras de protones (PEM) que consumiría hidrógeno y oxígeno a $90^{\circ}C$ [12]. Una celda de combustible no es más que un sistema de flujo estable, en el cual el combustible y el oxidante se suministran desde una fuente externa que provee un medio de transformación de energía química en eléctrica, es un proceso continuo y directo mediante reacciones de reducción y oxidación debido al intercambio de protones a través de una membrana. La ventaja de las celdas de combustible es que no requieren recargarse de la misma manera que una batería, en teoría producen electricidad mientras el combustible sea constantemente suministrado y están constituidas por un ánodo (terminal negativa), un cátodo (terminal positiva), un electrolito y/o una membrana similar cualquier celda electroquímica [26]. Al absorberse en la membrana semipermeable el hidrógeno se separa en cationes y electrones. Los electrones viajan hacia el cátodo y generan una corriente eléctrica, ya en el cátodo el cation hidrógeno se une al anión oxígeno (que se forma gracias al suministro de gas

oxígeno a la celda y a una capa catalítica que separa la molécula de O_2) para formar agua, la cual sale en estado líquido de un lado de la celda.

El intercambio electrónico provoca una diferencia de potencial teórica de $1.23V$; siendo el potencial real medido menor, debido a las pérdidas que se dan durante el proceso y que se traduce en pérdidas de la potencia final entregada por la celda. Los valores finales entre los que oscila el voltaje que entrega una monocelda son aproximadamente 0.5 y 0.8 volts [4], por lo que si se requieren valores más altos de voltaje o de corriente, sería necesario unir varias monoceldas, ya sea en serie para obtener mayor voltaje o en paralelo para mayor intensidad de corriente la cual se encuentra entre 0.3 y $0.5 \frac{A}{cm^2}$ por monocelda [24][27].

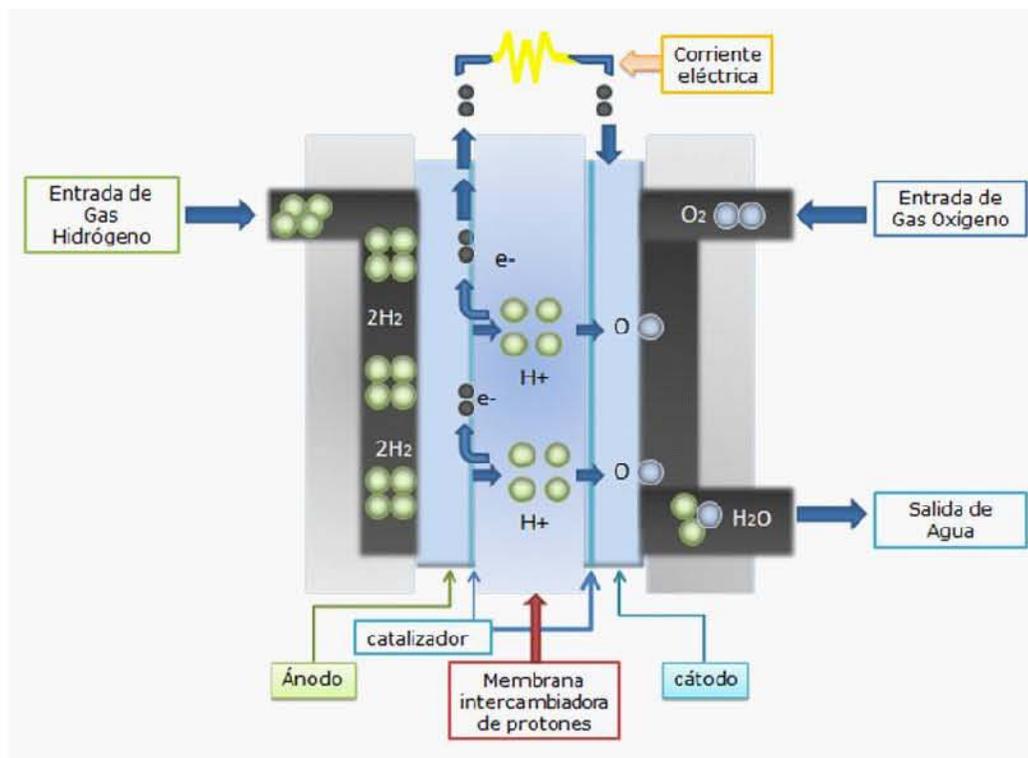


Fig.2 Diagrama de una celda de una combustible tipo PEM

La eficiencia teórica de las celdas de combustible está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en una reacción electroquímica con la cantidad de materia que reacciona [12]. Para una pila de combustible de tipo PEM que emplee hidrógeno entre 90 y 110 °C , el potencial teórico que puede producir tiene una eficiencia del 83 %. Con base en los principios teóricos aquí mencionados, el cálculo de la termodinámica, balances energéticos del sistema y considerando la situación mundial de escasez de recursos, contaminación ambiental y demanda energética se pretende demostrar la factibilidad del proceso propuesto.

Capítulo 3

Hipótesis

Es posible generar la suficiente cantidad de energía eléctrica que cubra parte del suministro requerido en un hogar mexicano compuesto por 4 personas, a través de la implementación de un sistema que combine el uso de lentes de Fresnel, como concentradores de energía térmica, que permitan a un reactor elevar su temperatura lo necesario para llevar a cabo la termólisis del agua y producir de esta forma la cantidad de gases necesarios que alimenten a las celdas de combustible (que son las encargadas de la producción eléctrica) y den como subproducto agua, la cual podrá ser reciclada en el sistema para el aprovechamiento máximo de recurso. Todo lo anterior que dará sustentado en base a los resultados del estudio teórico de la termodinámica y balances de energía térmica del sistema propuesto.

Capítulo 4

Objetivo principal

Demostrar la viabilidad termodinámica de la propuesta de un proceso para descomponer agua mediante una termólisis, usando como catalizador o intermediario al cobre y su óxido, auxiliándonos de balances de energía del sistema.

4.1. Objetivos secundarios

Plantear la necesidad de la humanidad de nuevos combustibles, mediante una revisión teórica de la situación energética mundial.

Mostrar la factibilidad del uso del uso de lentes de Fresnel y celdas de combustible como elementos auxiliares en la producción de energía eléctrica.

Demostrar que el uso de hidrógeno y oxígeno es viable para ser usado como combustible en la generación de electricidad.

Capítulo 5

Metodología de trabajo

1. Revisión de la literatura:
 - 1.a) Situación mundial de la generación de energía eléctrica (Demanda y producción de combustibles y emisiones de CO₂).
 - 1.b) Búsqueda y elección de tecnologías existentes productoras de electricidad (sin necesidad del uso de combustibles fósiles) viables de ser usadas y/o mejoradas en el proceso planteado.
 - 1.c) Búsqueda y análisis de procesos industriales para la producción de hidrógeno y oxígeno gaseosos para alimentación de celdas de combustible.
 - 1.d) Investigación de las condiciones necesarias y óptimas de funcionamiento de lentes de Fresnel y celdas de combustible
 - 1.d) Investigación de las condiciones de radiación solar en México
 - 1.e) Investigación de propiedades termodinámicas de las sustancias a usar en

el proceso

2. Diseño y delimitación de un sistema generador de hidrógeno y oxígeno

2.a) Planteamiento de las ecuaciones químicas gobernantes del sistema

2.b) Identificación de las entradas, salidas y puntos de recirculación de materia

y energía

2.c) Realización de cálculos termodinámicos y balances de energía del proceso propuesto.

2.d) Síntesis de resultados en un diagrama

3. Revisión y análisis de la coherencia de los resultados para afirmar o descartar la hipótesis planteada.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Consumo de energía eléctrica de una casa

6.2. habitación en un bimestre

El consumo de energía eléctrica está calculada en base a las necesidades de un hogar típico de 4 personas en la Ciudad de México [13]. En base a este consumo y el tiempo se puede estimar la potencia consumida promedio.

$$\text{horas} = 1440$$

$$430 \frac{\text{kW h}}{1440 \text{ h}} = 298.61 \text{ W}$$

Sabiendo que la electricidad de una casa se consume a razón de 120 V, se puede

estimar la corriente requerida

$$I = \frac{298.61 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 2.4884 \text{ A}$$

considerando que una celda de energía genera una diferencia de potencial teórico de 1.23 V. No obstante según lo encontrado en la literatura, se reporta experimentalmente un valor que oscila entre 0.5 y 0.8 V, debido a las pérdidas por resistencia eléctrica. La densidad de corriente producida por una celda se encuentra entre 0.3 y $0.5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$. Para este trabajo, conservadoramente se considera una densidad de corriente de $0.4 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ y con una diferencia de voltaje 0.6 V por monocelda.

6.2.1. Cálculo del área de la monocelda

El área requerida de una monocelda será:

$$a = \frac{I}{i} = \frac{2.4884 \text{ A}}{0.4 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}} = 6.221 \text{ cm}^2$$

6.2.2. Cálculo del número de monoceldas

Sabiendo que cada celda produce una diferencia de potencial de 0.6 V y conectándolas en serie se requiere :

$$n = \frac{120 \text{ V}}{0.6 \text{ V}} = 200 \text{ monoceldas}$$

Considerando para operar estas celdas por 1440 h, se calcula la corriente total

$$I = 200 \text{ monoceldas} \times 6.221 \frac{\text{cm}^2}{\text{monoceldas}} \times 0.4 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

$$497.68 \text{ A}$$

Esta cantidad de corriente permite calcular la cantidad de hidrógeno requerida por el sistema. Así haciendo uso de la primera ley de Faraday, donde:

$$m = \text{masa (g)}$$

$$M = \text{peso molecular } \left(\frac{\text{g}}{\text{gmol}} \right)$$

$$I = \text{Corriente (A)}$$

$$z = \text{carga equivalente } \left(\frac{\text{geq}}{\text{gmol}} \right)$$

$$t = \text{tiempo (s)}$$

$$F = \text{constante de Faraday } \left(\frac{\text{C}}{\text{geq}} \right)$$

$$m = \frac{Mit}{zF} = \frac{1.00794 \frac{\text{g}}{\text{gmol}} \times 497.68 \text{ A} \times 1440 \text{ h} \times \frac{3600 \text{ S}}{1 \text{ h}}}{1 \frac{\text{geq}}{\text{gmol}} \times 96500 \frac{\text{C}}{\text{geq}}}$$

$$= 26948 \text{ g}$$

Se requieren 26.948 kg de H_2 para producir la energía necesaria que consumirá en promedio un hogar. Si suponemos un consumo de hidrógeno constante en el bimestre, al día se necesitaría de la generación de 0.449 kg de H_2 o 222.797 gmol de H_2 . Haciendo uso de la estequiometria de la reacción (presentada más adelante), se obtiene la

cantidad necesaria de óxido de cobre que se necesita para la producción de este hidrógeno que alimentan las monoceldas de combustible.

$$222.797 \frac{\text{gmol de } H_2}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ gmol de } Cu_2O}{1 \text{ gmol de } H_2} \times \frac{0.14309 \text{ kg}}{1 \text{ gmol de } Cu_2O}$$

$$= 31.880 \frac{\text{kg de } Cu_2O}{\text{dia}}$$

6.2.3. Cálculo de la temperatura óptima de descomposición del Cu_2O .

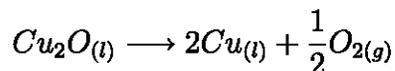
Todas las expresiones utilizadas en este trabajo para el cálculo de las energías libres y entalpías son tomadas de la literatura [21]. Y están en $\frac{\text{kcal}}{\text{gmol}}$

La energía libre de descomposición del Cu_2O entre 1516.7 K y 1800 K está dada por:

$$\Delta G_{fCu_2O}^{\circ} = -36.240 - 4.628 \times 10^{-3} T \ln T +$$

$$0.251 \times 10^{-6} T^2 - \frac{11.300}{T} + 48.624 \times 10^{-3} T$$

Para la reacción



$$\Delta G = -RT \ln K$$

$$K = \frac{(a_{Cu})^2 (p_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{(a_{Cu_2O})}$$

$$\Delta G = -RT \ln \left(\frac{(a_{Cu(l)})^2 (p_{O_2(g)})^{\frac{1}{2}}}{(a_{Cu_2O(l)})} \right)$$

Dado que el Cu y el Cu_2O se pueden considerar puros, sus actividades valen 1. Por lo tanto :

$$\Delta G_{rxn} = -RT \ln (p_{O_2(g)})^{\frac{1}{2}}$$

entonces ΔG_{rxn} es $-\Delta G_{fCu_2O}^\circ$

$$\Delta G_{rxn} = 4.628 \times 10^{-3} T \ln T - 4.8624 \times 10^{-2} T + \frac{11.3}{T} - 2.51 \times 10^{-7} T^2 + 36.24$$

Igualando y despejando la presión parcial de oxígeno

$$\ln \left(p_{O_2(g)} \right) \left(\frac{-RT}{2} \right) =$$

$$= 4.628 \times 10^{-3} T \ln T - 4.8624 \times 10^{-2} T + \frac{11.3}{T} - 2.51 \times 10^{-7} T^2 + 36.24$$

Para encontrar la temperatura a la cual el $O_{2(g)}$ tiene una presión parcial de 1 atm se resuelve la ecuación igualada a 0, dando como resultado :

$$4.628 \times 10^{-3} T \ln T - 4.8624 \times 10^{-2} T + \frac{11.3}{T} - 2.51 \times 10^{-7} T^2 + 36.24 = 0$$

cuya solución es $T = 2914.4 \text{ K}$ o 2641.3°C , la cual es quizá muy elevada. Para verificar el efecto de la temperatura sobre esta presión, repeti el cálculo para distintos valores de temperaturas y procedi a construir una grafica con dichos valores.

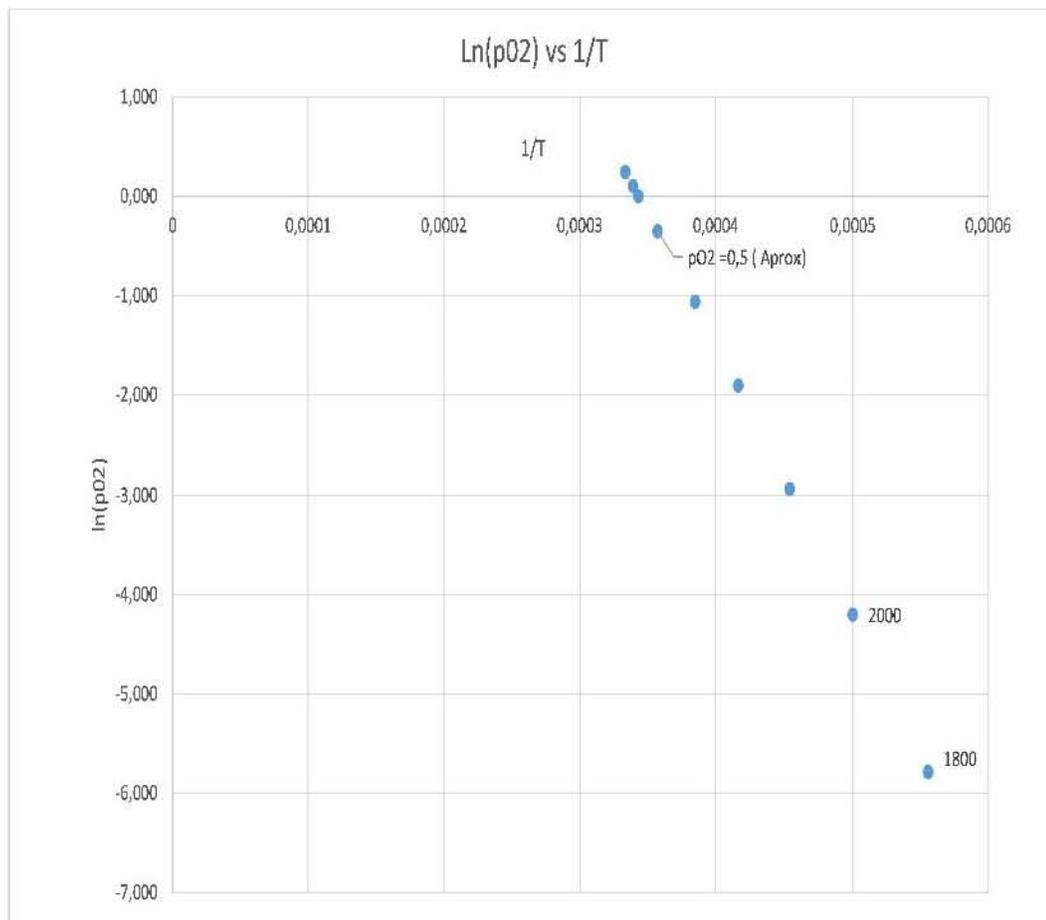


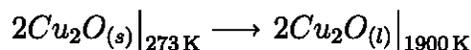
Fig.3 ln(pO₂) como función de $\frac{1}{T}$

6.3. Balances de energía

Todos los datos se han tomado de tablas termodinámicas [21] y las unidades para las entalpías de formación son $\frac{\text{kcal}}{\text{gmol}}$

Calentamiento del Cu_2O

El Cu_2O pasa del estado sólido al líquido a la temperatura de 1516.7 K pero se necesita a la temperatura a 1900 K para hacer favorable la reacción de descomposición y se obtenga la presión parcial de oxígeno óptima.



Extrapolando entre 1700 K y 1800 K para 1900 K

$$\Delta H_{\text{Cu}_2\text{O}_{(l)}} = 45.514 + \frac{(45.514 - (43.129))}{(1800 - 1700)} (1900 - 1800)$$

$$\Delta H_{\text{Cu}_2\text{O}_{(l)}} = 47.899$$

$$\Delta H_{\text{calentamiento}} = 2 \left(\Delta H_{\text{Cu}_2\text{O}_{(l)1900\text{ K}}} - \Delta H_{\text{Cu}_2\text{O}_{(l)273\text{ K}}} \right)$$

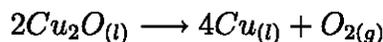
$$\Delta H_{\text{calentamiento}} = 2(47.899 - 0)$$

$$\Delta H_{\text{calentamiento}} = 95.798$$

La cantidad de energía para el calentamiento del óxido $95.798 \frac{\text{kcal}}{2\text{ mol Cu}_2\text{O}}$ deberá ser proporcionada por el sistema de concentración solar y/o por intercambiadores de calor con otra sustancia caliente en el sistema.

6.3.1. Generación de O_2

A continuación se muestra la reacción de generación de oxígeno la cual se desea llevar a cabo a 1900 K para permitir la descomposición del óxido.



Extrapolando las entalpías con datos a 1700 K y 1800 K, para 1900 K

$$\Delta H_{Cu_2O_{(l)}} = -28.753 + \frac{(-28.753 - (-29.134))}{(1800 - 1700)} (1900 - 1800)$$

$$\Delta H_{Cu_2O_{(l)}} = -28.372$$

El óxido de cobre entra a 1900 K y el Cu sale a la misma temperatura, por lo que el balance de energía queda como :

$$\begin{aligned} \Delta H_{rxn} &= \sum \Delta H_{productos} - \sum \Delta H_{reactivos} \\ &= (4\Delta H_{Cu} + \Delta H_{O_2}) - (2\Delta H_{Cu_2O_{(l)}}) \end{aligned}$$

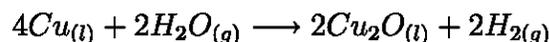
$$\Delta H_{rxn} = (4(0) + (0)) - (2(-28.372))$$

$$\Delta H_{rxn} = 56.744$$

Se observa que para llevar a cabo la reacción de descomposición del $Cu_2O_{(l)}$ se requiere que al reactor se le aporte $56.744 \frac{\text{kcal}}{\text{mol } O_2}$. En esta propuesta el calor provendrá de la energía solar captada por un sistema concentrador de energía.

6.3.2. Generación de H_2

En el reactor de generación de hidrógeno, se utilizará al cobre para romper la molécula del agua, en esta operación ocurre la siguiente reacción a 1900 K

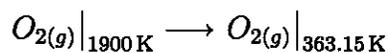


$$\begin{aligned} \Delta H_{rxn} &= \sum \Delta H_{productos} - \sum \Delta H_{reactivos} \\ &= (2\Delta H_{Cu_2O_{(l)}} + 2\Delta H_{H_{2(g)}}) - (2\Delta H_{H_2O_{(g)}} + 4\Delta H_{Cu_{(l)}}) \\ \Delta H_{rxn} &= (2(-28.372) + 2(0)) - (2(-60.099) + 4(0)) \\ \Delta H_{rxn} &= 63.454 \end{aligned}$$

Cabe destacar que el requerimiento energético para la formación del $H_{2(g)}$ es de $63.454 \frac{\text{kcal}}{2 \text{ mol } H_2}$, la cual debe provenir también del sistema de captación de energía solar o del calor de otra sustancia contenida en el proceso.

6.3.3. Enfriamiento del O_2

El oxígeno se alimenta a la celda de energía a $90^\circ C$, por lo cual se propone enfriarse:



para evaluar su entalpia, se hace una interpolación para el ΔH del O_2 a 363.15 K

$$\Delta H_{O_2(g)} = 0.723 + \frac{(0.723 - (0.013))}{(400 - 300)} (363.15 - 400)$$

$$\Delta H_{O_2(g)} = 0.461\ 37$$

$$\Delta H_{enfriamiento} = \Delta H_{O_2(g)363.15\text{ K}} - \Delta H_{O_2(g)1900\text{ K}}$$

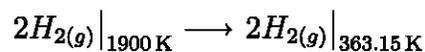
$$\Delta H_{enfriamiento} = 0.461\ 37 - 13.244$$

$$\Delta H_{enfriamiento} = -12.783$$

Este calor liberado también debe ser aprovechado en el proceso. Más adelante se menciona como se aprovecha este calor liberado.

6.3.4. Enfriamiento del H_2

El hidrógeno se alimenta a la celda de energía a 90°C , por lo cual se debe enfriar extrayéndole calor.



haciendo una interpolación para el ΔH del H_2 a 363.15 K

$$\Delta H_{H_2(g)} = 0.707 + \frac{(0.707 - (0.013))}{(400 - 300)} (363.15 - 400)$$

$$\Delta H_{H_2(g)} = 0.451\ 26$$

$$\Delta H_{enfriamiento} = 2 \left(\Delta H_{H_2(g)363.15\text{K}} - \Delta H_{H_2(g)1900\text{K}} \right)$$

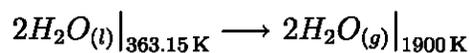
$$\Delta H_{enfriamiento} = 2 (0.45126 - 11.841)$$

$$\Delta H_{enfriamiento} = -22.779$$

Este calor liberado debe ser aprovechado en el proceso para hacerlo más eficiente. Este calor está disponible a 1900 K

6.3.5. Calentamiento y evaporación del H_2O

Esta parte del proceso se presenta como:



Se realiza una interpolación para calcular el ΔH del H_2O a 363.15 K

$$\Delta H_{H_2O} = 11.344 + \frac{(11.344 - (0.033))}{(400 - 300)} (363.15 - 400)$$

$$\Delta H_{H_2O} = 7.1759$$

$$\Delta H_{calentamiento} = 2 \left(\Delta H_{H_2O_{(l)1600\text{K}}} - \Delta H_{H_2O_{(l)363.15\text{K}}} \right)$$

$$\Delta H_{calentamiento} = 2 (26.679 - 7.1759)$$

$$\Delta H_{calentamiento} = 39.006$$

Para el requerimiento energético de esta etapa se propone utilizar los calores de enfriamiento de H_2 y de enfriamiento de O_2 los cuales son 22.779 kcal y 12.783 kcal respectivamente, lo que deja 3.444 kcal que se obtendrán de la energía solar. Esto implica que el sistema requiere de dos intercambiadores de calor. Uno de los cuales servirá para evaporar el agua usando el calor contenido en el H_2 gaseoso. Para llevar el agua gaseosa a una temperatura cercana a 1900 K se utilizaría un segundo intercambiador de calor para aprovechar el calor contenido en el O_2 . En resumen el sistema requiere que el diseño incluya adicionalmente dos intercambiadores de calor liquido-gas.

6.3.6. Balance global de energía del proceso

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{calor requerido por el proceso}} &= \sum \Delta H_{\text{salidas}} - \sum \Delta H_{\text{entradas}} \\ \Delta H_{\text{calor requerido por el proceso}} &= (22.779 + 12.783) \\ &\quad - (95.798 + 39.006 + 56.744 + 63.459) \\ \Delta H_{\text{calor requerido por el proceso}} &= -219.45 \text{ kcal} \end{aligned}$$

El calor requerido por el proceso es mayor del que libera, por lo tanto

$$-219.45 \frac{\text{kcal}}{\text{g mol } O_2} = -918.18 \frac{\text{kJ}}{2\text{g mol } H_2}$$

La cantidad 918.18 kJ es la energía que se requiere capturar mediante energía solar

para generar dos moles de H_2 y 1 mol de O_2 .

6.4. Estimación de la superficie de captación solar

Debido a que se requiere de 222.797 moles de H_2 para la generación de energía eléctrica, que satisfaga la demanda de un hogar en un día, la cantidad de energía que se debe capturar diariamente del sol es:

$$-918.18 \frac{\text{kJ}}{2g \text{ mol } H_2} \times 222.797g \text{ mol } H_2 = -204567 \text{ kJ}$$

Y debido a que lo registrado, en la literatura y diversas bases de datos de estaciones meteorológicas en el mundo, la radiación solar promedio en la ciudad de México es de $2500 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ al año, lo que daría un aproximado de $6.90 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}}$, lo que permite estimar la superficie de captación solar que debería de tener el arreglo de lentes de Fresnel que se planea usar

$$\frac{1 \text{ m}^2}{6.90 \text{ kWh}} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} \times 204567 \text{ kJ} = 8.235 \text{ m}^2$$

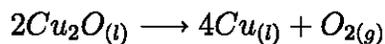
Es decir, se deben utilizar 8.235 m^2 de lentes de Fresnel para coleccionar la energía térmica solar y concentrar en el reactor.

6.5. Recomendaciones de dimensiones y conexión del reactor

En lo que respecta a la conexión al sistema eléctrico por términos de practicidad se opta por no usar un transformador de corriente directa a alterna sino, hacer la conexión directa de las celdas de combustible con el sistema eléctrico de una casa. Esto no es un gran problema debido a que el alumbrado convencional de un hogar solo requiere que pase una corriente por el, no importando la naturaleza de esta (alterna o continua) para poder funcionar, y además muchos de los aparatos que usamos a diario funcionan con corriente continua. El único inconveniente sería que en aquellos aparatos que funcionan con motores y requieren corriente alterna; para lo que se plantea el uso de un inversor de corriente cada aparato.

Después de los cálculos de energía realizados se determinó que se requiere un reactor en el que las pérdidas de energía térmica sean mínimas, por lo que se sugiere una geometría cilíndrica, para evitar las pérdidas de calor en las esquinas. Las dimensiones internas del reactor cilíndrico deben de poder contener en su interior 31.880 kg de Cu_2O , también un tanque para 8.657l de H_2O . El volumen ocupado por el Cu líquido a 1900 K considerando la reacción de descomposición de su óxido se calcula de la siguiente forma:

Cálculo del volumen ocupado por la cantidad del óxido y el cobre :



$$\begin{aligned} V_{Cu_2O} &= 31.880 \text{ kg de } Cu_2O \times \frac{1m^3}{6490 \text{ kg de } Cu_2O} \\ &= 4.9122 \times 10^{-3} m^3 \\ &= 4.912l \text{ de } Cu_2O \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Cu} &= \frac{Mmolar \times n_{Cu}}{\rho} = \frac{445.5936 \text{ gmol} \times 0.063536 \frac{kg}{gmol}}{8960 \frac{kg}{m^3}} \\ &= 0.00316m^3 \\ &= 3.16l \text{ de Cu} \end{aligned}$$

Cálculo del volumen ocupado por el agua introducida en el reactor:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 222.797 \text{ gmol de } H_2O \times \frac{18g}{1 \text{ gmol}} \text{ de } H_2O \times \frac{cm^3}{1g} \times \frac{1 \times 10^{-6} m^3}{1cm^3} \\ &= 0.0040103m^3 \\ &= 4.01l \text{ de } H_2O \end{aligned}$$

Siendo el volumen necesario de la cámara principal de reactor $4.9122 \times 10^{-3} m^3$, ya que se pretende que los gases (O_2 y H_2) salgan por separado del reactor para que no se mezclen hacia tanques contenedores para ser dirigidos posteriormente a

las celdas de combustible. El volumen de dichos tanques, si se quisieran mantener a presión atmosférica, son calculados tomando en cuenta la estequiometría de la reacción de producción de oxígeno en la primera etapa donde se descompone del óxido y la producción de hidrógeno en la etapa de descomposición del agua.

Cálculo del volumen ocupado por el gas oxígeno producido a presión atmosférica y tratado como gas ideal :

$$\begin{aligned} \text{moles de } O_{2(g)} &= 222.5936 \text{ gmol de } Cu_2O \times \frac{1 \text{ gmol de } O_{2(g)}}{2 \text{ gmol de } Cu_2O} \\ &= 111.30 \text{ gmol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{T,O_2} &= \frac{n_{O_2}RT}{P_T} \\ &= \frac{(111.30 \text{ gmol de } O_2) \times 1900 \text{ K} \times 0.082 \frac{\text{l atm}}{\text{gmol K}} \times \frac{0.001 \text{ m}^3}{\text{l}}}{1 \text{ atm}} \\ &= 17.341 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del volumen ocupado por el gas hidrógeno producido a presión atmosférica y tratado como gas ideal :

$$\begin{aligned} V_{T,H_2} &= \frac{n_{H_2}RT}{P_T} \\ &= \frac{(222.797 \text{ gmol de } H_2) \times 1900 \text{ K} \times 0.082 \frac{\text{l atm}}{\text{gmol K}} \times \frac{0.001 \text{ m}^3}{\text{l}}}{1 \text{ atm}} \\ &= 34.712 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Ya que los volúmenes a presión atmosférica de ambos gases no son prácticos, se sugiere el uso de una compresora comercial común que puede mantener la presión a 120 *psi* o 8.16552 atm, lo que lleva a modificar el tamaño de dichos tanques, siendo el volumen de estos de:

Cálculo del volumen ocupado por el gas oxígeno producido a 8.16552 atm y tratado como gas ideal :

$$\begin{aligned}
 V_{T,O_2} &= \frac{n_{O_2}RT}{P_T} \\
 &= \frac{(111.30 \text{ gmol de } O_2) \times 1900 \text{ K} \times 0.082 \frac{\text{l atm}}{\text{gmol K}} \times \frac{0.001 \text{ m}^3}{\text{l}}}{8.16552 \text{ atm}} \\
 &= 2.1236 \text{ m}^3 \text{ para el } O_2
 \end{aligned}$$

Cálculo del volumen ocupado por el gas hidrógeno producido a 8.16552 atm y tratado como gas ideal :

$$\begin{aligned}
 V_{T,H_2} &= \frac{n_{H_2}RT}{P_T} \\
 &= \frac{(222.797 \text{ gmol de } H_2) \times 1900 \text{ K} \times 0.082 \frac{\text{l atm}}{\text{gmol K}} \times \frac{0.001 \text{ m}^3}{\text{l}}}{8.16552 \text{ atm}} \\
 &= 4.251 \text{ m}^3 \text{ para el } H_2
 \end{aligned}$$

El resultado anterior nos muestra que la cámara de combustión del reactor ocupará un volumen que permita un diseño ergonómico, que se adapte a las necesidades del hogar, mientras que los tanques con los gases producidos al necesitar un volumen

considerable podrían ser colocados en una especie de sotano bajo la casa para evitar que utilicen un gran espacio.

6.6. Diagrama energético del proceso

Considerando las entradas y salidas de energía y materia totales dadas como resultado del balance energético del proceso

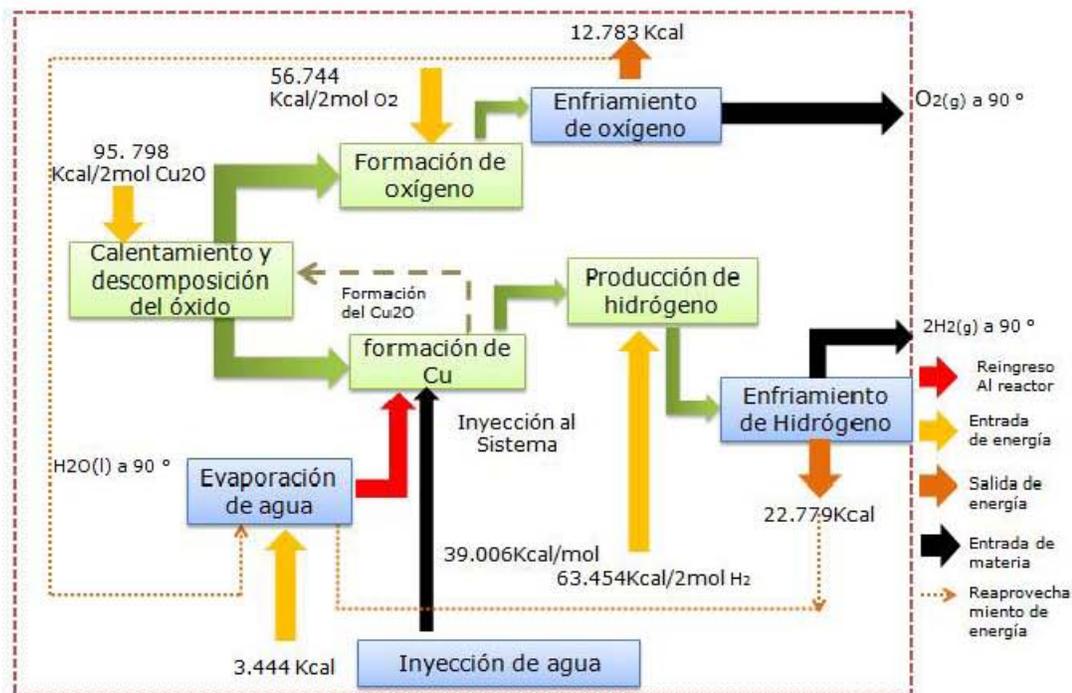


Figura 6.1: Fig4. Diagrama energético del proceso

6.7. Esquema general del proceso

A continuación se muestra el esquema de como se vería armado el sistema considerando todos los componentes de este, mencionados en este trabajo.

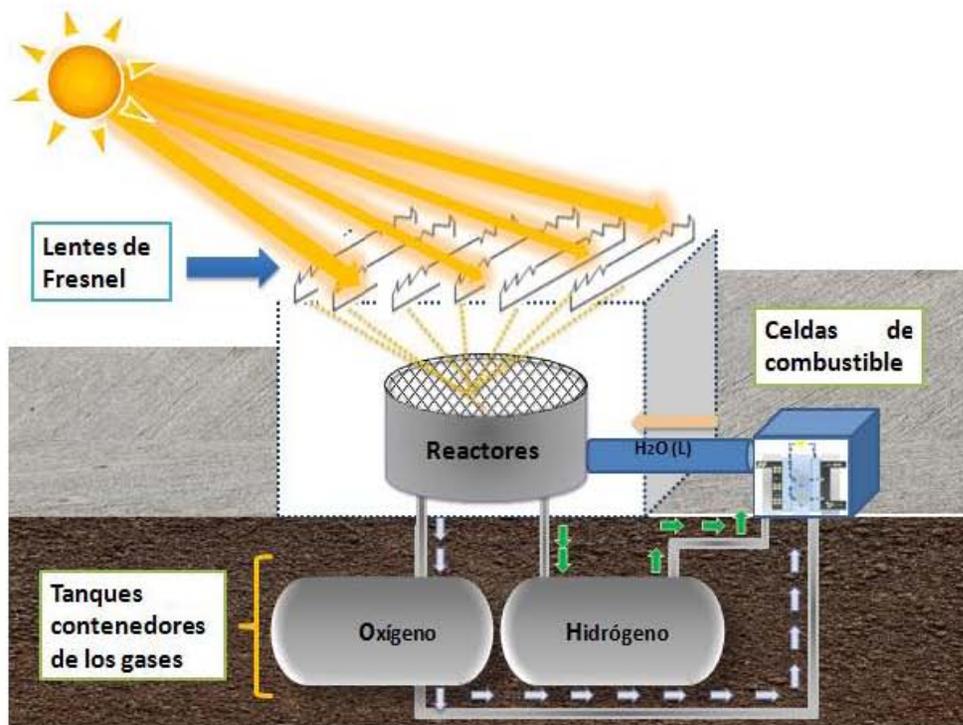


Figura 6.2: Fig.5 Esquema general del proceso

Capítulo 7

Discusión de Resultados

Para iniciar el diseño del proceso, se consideraron datos estadísticos de consumo de energía eléctrica en hogares mexicanos obtenidos de la CFE, con estos se determinó el voltaje, corriente y potencia eléctrica requerida en dichos hogares y que el sistema debía de generar. Estos datos en conjunto con las especificaciones de funcionamiento de celdas de combustibles comerciales (que proporcionan densidad de corriente y voltaje) son usados para determinar el área de la celda y la cantidad de las mismas conectadas en serie para producir una diferencia de potencial de 120 V y que puede ser conectada como suministro de energía de eléctrica. Esta sección ofrece una propuesta de las dimensiones que tendrían la parte productora de energía, y al ser las áreas de las celdas dimensiones en centímetros cuadrados conectar 200 de ellas para formar una pila, no ocuparía un área superior a los $0.13m^2$.

Se establece una temperatura de trabajo a 1900 K con base a los resultados

obtenidos de resolver la función de la energía libre de Gibbs de la descomposición del óxido de cobre en oxígeno y cobre elemental, ya que a esta temperatura la presión parcial de 1 mol de oxígeno es aproximadamente 0.5 atm. Esto se hizo mediante la propuesta de varias temperaturas de trabajo y la sustitución de las mismas en la función para poder extrapolar los resultados en una gráfica en función del inverso de la temperatura y el logaritmo natural de la presión parcial del oxígeno, debido a que la solución numérica convencional no arrojaba las raíces del polinomio en el campo de los reales necesarias para la operación.

La determinación de la cantidad de materia prima (óxido de cobre y agua) que se debe proporcionar al proceso, queda en función de la relación que hay entre la corriente generada por el conjunto de celdas tipo PEM (497.68 A) y las leyes de Faraday. Se obtuvo la cantidad de H_2 que dichas celdas requieren (222.797 gmol) y mediante el establecimiento de las reacciones químicas que gobiernan el proceso y su estequiometría se hizo el cálculo final de insumos que determinó la cantidad de 31.880 kg de Cu_2O y 4,0103l de H_2O .

El análisis general del proceso indica que se trata de un sistema cerrado, el cual requiere de 204567 kJ de energía solar para poder funcionar. Esta se puede obtener de la radiación solar y ser concentrada en el reactor como fuente de energía térmica para alcanzar las temperaturas de trabajo mediante un arreglo de lentes de Fresnel. Esto es posible ya que la radiación incidente promedio en la Ciudad de México es de $\frac{6.90kWh}{1m^2}$, y solo se requiere de una superficie no mayor a los 8.235 m². Además se destaca que el

proceso consta únicamente de 6 etapas clave, en las cuales se pueden aprovechar las energías térmicas liberadas en 2 de ellas, en los enfriamientos de O_2 y H_2 , mediante el uso de 2 intercambiadores de calor gas-gas. También, el calor sería aprovechado en el calentamiento del agua recirculante que se obtiene de las celdas de combustibles, antes de entrar al reactor, para proporcionar un mayor aprovechamiento energético.

Comparando el proceso con los existentes actualmente para la producción de hidrógeno se resaltan sus ventajas y desventajas a continuación:

7.1. Ventajas

1. El uso de la energía solar y la no generación de gases efecto invernadero sitúan al proceso como una de las posibles opciones para disminuir la crisis energética mundial por escasez de combustibles fósiles.

2. La materia prima necesaria para que se lleve a cabo la generación de los gases hidrógeno y oxígeno, son solo dos sustancias (H_2O y Cu_2O) en cantidades relativamente pequeñas y no representan gran costo

3. Al ser un proceso cerrado y hermético el usuario no tendría contacto alguno con las sustancias que se utilizan y que genera, tampoco tiene necesidad de encenderlo o apagarlo ni darle mantenimiento.

4. Con respecto al uso del Cu_2O en lugar del Zn_2O como intermediario, representa un ahorro energético, ya que en la termólisis con Zn_2O el proceso se lleva a cabo a 2300 K y con Cu_2O sería solamente a 1900 K.

5. En referencia al aprovechamiento de la radiación solar como fuente térmica, en lugar de generación directa de energía eléctrica mediante paneles solares se ve un aumento de eficiencia, ya que los lentes de Fresnel pueden concentrar un 60-85 % de la radiación incidente sobre el, mientras que los paneles solares pueden convertir solo entre el 10 % y 20 % de la radiación incidente en energía eléctrica además las celdas de combustibles generan eficiencias del 83 %.

6. Se da una alternativa de solución de el problema cerca-lejos que evita que la energía eléctrica llegue a lugares remotos por el costo que implica el transporte de la misma, ya que este sistema generador de electricidad podría permanecer en un hogar, aislado y con acceso a la luz del sol.

7. La electricidad queda almacenada como H_2 y O_2 , los cuales generar electricidad aun cuando no brille el sol.

7.2. Desventajas

1. La infraestructura del reactor lo vuelve considerablemente propenso a ser costoso por los materiales que se requieren para su fabricación y por la cantidad de especialistas que se necesitan para su instalación.

2. El tamaño de la superficie ocupada por el sistema de captación de la radiación solar provoca que se deba tener un espacio amplio ($9m^2$) y despejado en un hogar (preferentemente una azotea) y un espacio subterráneo para la colocación de los dos tanques contenedores de los gases, del tamaño de una cisterna cada uno, provocando

que sea viable solo en hogares con superficies adecuadas.

3. La intermitencia de la energía solar, lo vuelven propenso a ser ineficiente en épocas del año en las cuales la radiación incidente sea menor. Se deberá proponer un diseño de correadores que permitan un arranque automático y que no sea un impedimento la solidificación de los líquidos

4. La necesidad de un alto flujo de radiación solar ocasionan que el proceso solo pueda ser desarrollado en países con un alto índice de este, descartando a lugares que no están situados geográficamente en un punto estratégico de alta incidencia de dicha radiación. Esto lo que lo pone en desventaja frente a procesos que no dependen de las condiciones ambientales para poder ser llevado a cabo.

Capítulo 8

Conclusiones

1. La situación del mundo actual, según el contexto social en el que se está, muestra la necesidad de comenzar a utilizar más tecnologías que no sean dependientes de combustibles fósiles y que puedan ser llevadas a los lugares más remotos, para iniciar a hacer más corta la brecha social que la centralización energética ha ocasionado.

2. El hidrógeno junto con el oxígeno pueden ser utilizados como combustibles generadores de energía eléctrica debido a su gran densidad energética que supera por mucho a los combustibles de origen fósil.

3. La termodinámica del proceso planteado en conjunto con los datos de especificaciones técnicas de tecnologías existentes (Lentes de Fresnel y celdas de combustible) y las condiciones meteorológicas de la ciudad de México, son suficientes para mostrar que la posibilidad de producir hidrógeno usando como intermediario al H_2O y el Cu_2O en hogares comunes, con una alta eficiencia energética y un amplio aprovechamiento

de recursos.

4. El inconveniente más grande del diseño del proceso es que la energía térmica que necesita para funcionar depende por completo del flux de radiación solar, por lo que está sujeto a ser utilizado únicamente en zonas situadas estratégicamente en el globo terráqueo y su eficiencia en la generación del hidrógeno variara dependiendo de las condiciones climáticas y la época del años, esto hasta que el desarrollo de tecnología concentradora de radiación solar aumente su eficiencia de captación. Sin embargo, usando lentes más grandes que los requeridos, tanques de H₂O más grandes y una mayor cantidad de intermediarios, se podría producir electricidad aun en periodos prolongados de ausencia de brillo solar.

5. Las reacciones que se llevan a cabo dentro del sistema dan subproductos reutilizables y recirculables en el proceso, lo que da como resultado una fuente de energía alternativa de carácter ecológico y sustentable, ya que se evita la producción de gases de efecto invernadero.

6. Las cantidades necesarias para que el proceso cumpla con su finalidad de producción de gases alimentadores de celdas de combustible son relativamente pequeñas que dan paso a realizar un diseño ergonómico y que quizá pueda ser utilizado en hogares comunes.

Bibliografía

- [1] aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno. (2013). [ebook] España, pp.14-18. Available at: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Cap%C3%ADtulo+2++Producci%C3%B3n+de+Hidr%C3%B3geno.pdf> [Accessed 10 Oct. 2017].
- [2] International energy agency. (2014). <https://www.iea.org/statistics/statisticsssearch/report/?year=2014&country=MEXICO&product=Indicators> [Acceso 14 Apr. 2017].
- [3] international energy outlook 2017. (2017). [ebook] United states, pp.5-9. Available at: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) [Accessed 12 Oct. 2017].
- [4] National Renewable Energy Laboratory (2005). Cost Anlisy of PEM fuel cell System for Transportation. [online] Cambridge Massachusetts, pp.25-33. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39104.pdf> [Accessed 1 Sep. 2017].

- [5] https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Energy_Perspectives2016.pdf[Acceso 12 Apr. 2017].
- [6] La energía y el sol. (2017). 1st ed. [ebook] pp.6-10. Available at: http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/aulaenergia.pdf [Accessed 15 May 2017]
- [7] Abad de Santillán, D. (1938). El organismo económico de la revolución. Barcelona: Tierra y Libertad, pp.52.
- [8] Anguera, E. and Mendoza, B. (2010). Hidrógeno como combustible alterno. Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, pp.63.
- [9] Cazadero, M. (2000). energía y tercera revolución industrial. maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, pp.345-347.
- [10] Chang, R., College, W., Ramírez Medeles, M. and Zugazagoitia Herranz, R. (2005). Química. 7th ed. México: McGraw-Hill, pp.3,153-158, 558-571.
- [11] Cook, M. (2005). A brief history of the human race. London: Granta, pp.21-25,143-155.
- [12] Flores Suarez, E. (2016). Estado actual del hidrógeno aplicado a celdas de combustible. Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [13] Gordo Flores, J. (2014). Evaluación del uso de escorias vanádíferas para la fabricación de pilas de vanadio. licenciatura. UNAM.

- [14] Herranz, G., Romero, A., De Castro, V., & Rodríguez, G. P. (2013). Development of high speed steel sintered using concentrated solar energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2065-2073.
- [15] Jaramillo Mora, A. (2014). Diseño de un concentrador solar con lentes de Fresnel para propósitos académicos y de experimentación. Licenciatura. UNAM.
- [16] Lorenzo, E. (2014). Electricidad solar fotovoltaica. Mairena de Aljarafe (Sevilla): PROGENSA, pp.18-29,50-68.
- [17] Matsumoto, Y., Valdés, M., Urbano, J., Kobayashi, T., López, G. and Peña, R. (2014). Global Solar Irradiation in North Mexico City and Some Comparisons with the South. *Energy Procedia*, 57, pp.1179-1188.
- [18] Méndez, A. (2011). Diseño mecánico y construcción de la estructura de un concentrador solar de lentes de Fresnel. Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México , pp 22-28.
- [19] Mendoza, A. (2016). Energía: Pasado , presente y futuro.
- [20] Padilla, I., López-Delgado, A., López-Andrés, S., Álvarez, M., Galindo, R. and Vazquez-Vaamonde, A. (2014). The Application of Thermal Solar Energy to High Temperature Processes: Case Study of the Synthesis of Alumina from Boehmite. *The Scientific World Journal*, 2014, pp.1-7.
- [21] Pankratz, L. B. (1982). *Thermodynamic Properties of the Elements and Oxides*

US Dept. of the Interior Bureau of Mines Bulletin 672 , US Gov't. Printing Office, Washington, DC.

- [22] Rey Pastor, J. (2011). La ciencia y la técnica en el descubrimiento de América. Barcelona: Planeta DeAgostini, pp.12-33,56,59.
- [23] Roel Pineda, V. (1998). La tercera revolución industrial y la era del conocimiento. Lima: Fondo Editorial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, pp.26,27,39-56.
- [24] Salgado Baltazar, M. (2017). calentamiento de los metales por medio de inducción electromagnética y concentración solar. licenciatura. UNAM.
- [25] Salort i Vives, S. (2012). Revoluciones industriales, trabajo y estado del bienestar. Madrid: Sílex, pp.25-38, 127-142,305-320.
- [26] University of Notre Dame (2003). Introduction to fuel cell technology. 1st ed. U.S.A: Department of aerospace and mechanical engineering, pp.11,49-55.
- [27] Williams, E. and Johnson, A. (2012). Fuel Cell Efficiency (Energy Science, Engineering and Technology). New York: Nova Science Publishers Incorporated, pp.14-18,65,73,141,162.
- [28] Zavala, Y. (2008). la crisis energética en Estados Unidos de América , hacia la formación de un bloque energético en el hemisferio occidental y los beneficios para México. Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, pp.9-18