

INTRODUCCIÓN

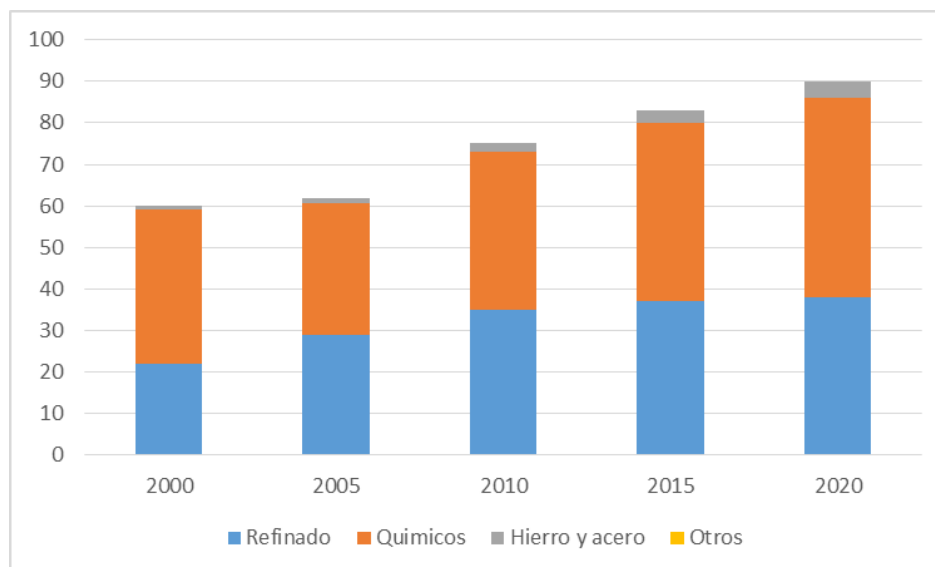
Antecedentes

El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante del universo. Está naturalmente presente en muchos compuestos químicos, incluido el agua y combustibles fósiles. No es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético, o sea, un portador de energía. Se debe producir a partir de fuentes energéticas y contiene una cierta cantidad de energía una vez producido.

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), al 2020 alrededor de 120 Mt (millones de toneladas) de hidrógeno se producen en todo el mundo (IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021), dos tercios de los cuales es hidrógeno puro y un tercio es una mezcla con otros gases.

Según datos de la IEA (IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021), en los últimos 20 años la demanda anual de hidrógeno ha crecido un 50% (Ver Figura 1). La demanda en 2020, fue aproximadamente 90 Mt (millones de toneladas), que no incluye 30 Mt adicionales presentes en gases residuales de procesos industriales utilizados como calor y electricidad.

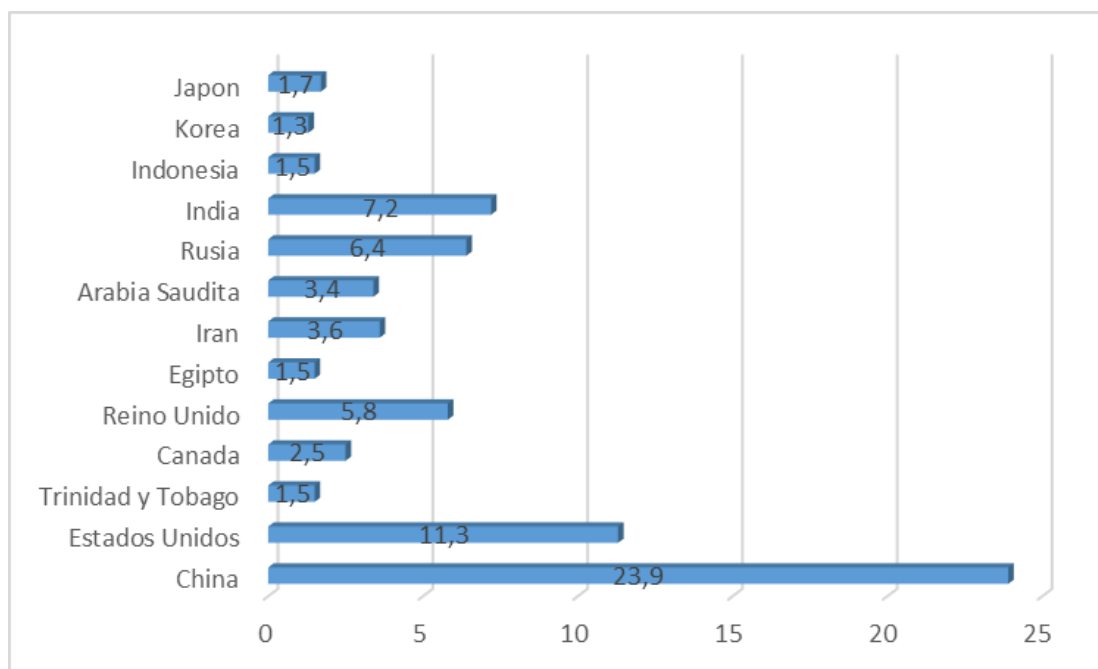
Figura 1: Demanda anual de hidrógeno por sector 2000 - 2020



Fuente: IEA, Global Hydrogen Review , 2021

Por otro lado, según datos de IRENA (IRENA, 2022), de los 120 Mt de hidrógeno producidas en 2021. China es el principal productor y consumidor con unos 24 Mt, seguido de Estados Unidos con 11.3. En la Figura 2 se muestra el consumo de hidrógeno en 2020 según país y/o región.

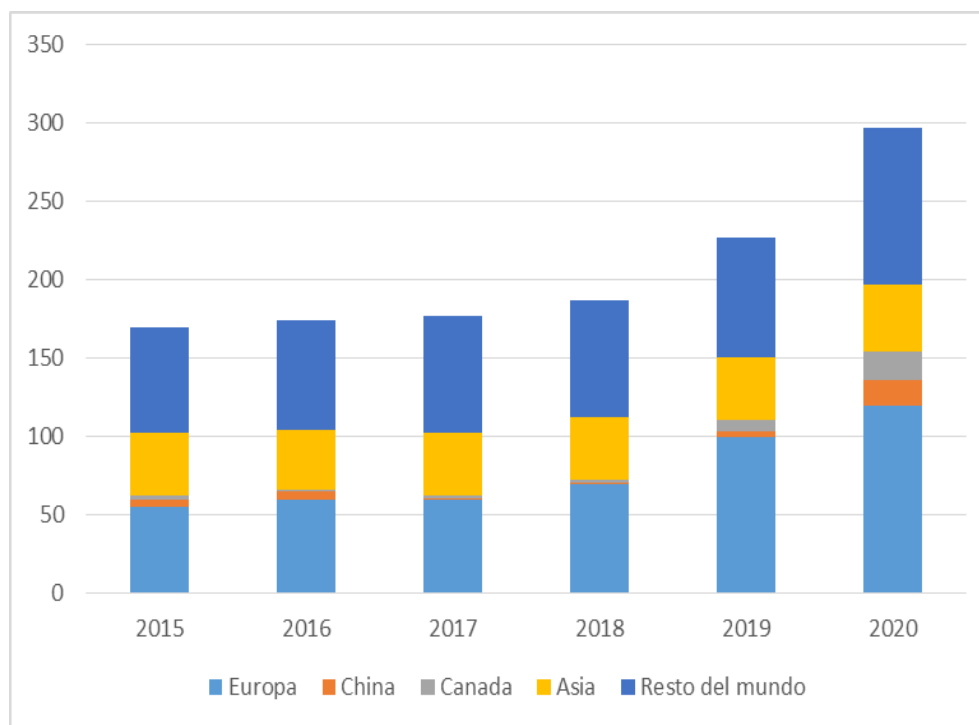
Figura 2: Consumo de hidrógeno en 2020 (Mt por año).



Fuente: IRENA, 2022

Según la IEA (IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021), en el período 2015 a 2020 la capacidad instalada de electrolizadores aumentó aproximadamente 70% (Ver Figura 3), el aumento de la capacidad principalmente ha sido en Europa. En 2020, China y Canadá comienzan a posicionarse como líderes mundiales en esta área. Por otro lado, se puede apreciar que la electrólisis alcalina es la líder en capacidad instalada, pero la PEM al ser más versátil en su respuesta a las fluctuaciones de las ERV y la baja en sus costos, comienza a ser cada vez más atractiva y tener una mayor participación.

Figura 3: Capacidad total instalada de electrolizadores por región en 2015 – 2020 (MW)



Fuente: (IEA, Global Hydrogen Review , 2021)

Las tecnologías ya disponibles hoy permiten que el hidrógeno produzca, almacene, mueva y utilice energía de diferentes maneras. Una amplia variedad de combustibles puede producir hidrógeno, incluidas las energías renovables, la nuclear, el gas natural, el carbón y el petróleo. Puede transportarse como gas por tuberías o en forma líquida por barcos, de forma muy similar al gas natural licuado (GNL). Puede transformarse en electricidad y metano para alimentar hogares y alimentar a la industria, y en combustibles para automóviles, camiones, barcos y aviones.

Objetivos

Objetivo general

Obtener hidrogeno a partir de la electrolisis del agua para la producción de energía verde a nivel de laboratorio

Objetivo específico

- Seleccionar la mejor alternativa para la producción de hidrogeno por electrolisis a nivel laboratorio
- Determinar las variables de operación para la obtención de hidrogeno por electrolisis del agua a nivel laboratorio
- Determinar los rangos de operación de las variables del proceso de electrolisis a nivel laboratorio
- Ejecutar la parte experimental del proceso de obtención de hidrogeno a nivel laboratorio
- Verificar la calidad del producto obtenido
- Realizar el estudio de costos del proyecto de investigación

Justificación

Justificación tecnológica

Con el presente trabajo de investigación se pretende dar importancia a nuevas alternativas de energía limpia y así evitar la sobre explotación de los recursos no renovables.

El hidrogeno a obtener puede ser usado no solo en cocinas familiares, sino también para la generación de energía eléctrica, térmica y mecánica de acuerdo a la necesidad que se requiera. El uso potencial de esta energía se debe a que es un proceso tecnológico simple de usar, con bajos requerimientos.

Justificación Social

El presente trabajo de investigación se realiza con el propósito de aumentar la oferta de energías limpias que promuevan el estilo de vida amigable de la sociedad con el medio ambiente.

El gas domiciliario es un servicio básico (Artículo 20 de la Constitución Política del Estado, servicios básicos), sin embargo varias familias del área rural no cuentan con este servicio básico. El presente proyecto pretende hacer un estudio para obtención de hidrogeno, que puede ser usado como gas de cocina, beneficiando de esta manera a las familias del área rural que no cuenten con el servicio.

Justificación ambiental

En lo que se refiere al uso de fuentes energéticas, los combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón, etc.) producen un enorme impacto sobre el planeta en diferentes formas, incluyendo la seguridad y el aspecto ambiental, debido a que producen enormes cantidades de sustancias tóxicas, tales como SO_x , NO_x , y principalmente CO_2 .

El H_2 es considerado como un combustible limpio, ya que en la combustión sólo se genera agua. Por lo tanto puede ser utilizado en diversas aplicaciones: como combustible no contaminante en los vehículos, o combustible doméstico.

Justificación económica

Es importante tomar en cuenta que la producción de hidrogeno permitiría crear un nuevo ecosistema industrial que funcione a base de este combustible. Aparte de las pilas de combustible, el hidrógeno se puede utilizar en otras formas de vehículos, como transporte comercial, trenes, barcos, maquinaria de construcción y drones, dando así el paso a nuevas economías como se ha visto en los países de Europa, Asia y Estados Unidos.

Justificación personal

La producción de hidrogeno como nueva fuente de energía versátil es un paso hacia el futuro que hoy en día se está implementando de forma gradual con buen desempeño,

no solo podría ayudarnos al cambio climático el cual está siendo afectado debido al uso excesivo de combustibles fósiles, si no que su implementación puede llevar a nuevas tecnología debido al potencial que almacena como vector energético.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1. Producción de Hidrogeno

Aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, sin embargo en nuestro planeta no se encuentra en estado libre, sino que se presenta formando compuestos orgánicos unidos al carbono o formando agua unida con el oxígeno. Por tanto, el hidrógeno no es un recurso natural o una fuente de energía primaria, sino un portador de energía, también llamado “vector energético”. Dado que no podemos tomarlo directamente de la naturaleza, el hidrógeno, al igual que ocurre con la electricidad, es necesario producirlo. Para ello hay que conseguir su separación de los compuestos de los que forma parte, pero para que este proceso de separación tenga lugar será preciso aportar energía (fundamentalmente en forma de calor o de electricidad) que necesariamente deberá proceder de alguna de las fuentes primarias: fósil, renovable o nuclear.

Afortunadamente, el hidrógeno puede obtenerse a partir de múltiples materias primas, siguiendo toda una variedad de tecnologías de proceso (química, electrolítica, biológica, fotolítica, termoquímica), en las que se puede utilizar diversas fuentes de energía primaria. Cada tecnología se encuentra en un grado de desarrollo y cada una ofrece oportunidades únicas, beneficios y desafíos. La elección de una u otra materia prima, técnica de producción y fuente de energía dependerá de la disponibilidad del recurso, de la madurez de la tecnología de proceso, del tipo de demanda y aplicación de mercado, de la política energética y de los costes para la obtención del hidrógeno.

Teniendo en consideración que la energía primaria necesaria para el proceso de producción unas veces procede de la misma materia prima que estamos procesando y otras procede de una fuente de energía primaria distinta, a la hora de planificar una futura economía del hidrógeno en la que sería necesario producir cantidades masivas de hidrógeno para atender a la demanda, no solo es básico hacerse la pregunta: ¿a partir de qué recursos produciremos el hidrógeno?, sino que también será fundamental formularse la siguiente: ¿de dónde obtendremos la energía necesaria para producir el hidrógeno?.

Entre las materias a partir de las que puede producirse el hidrógeno están las siguientes:

- Recursos fósiles: Derivados del petróleo, Gas natural, Carbón.
- Recursos renovables: Agua, biomasa.

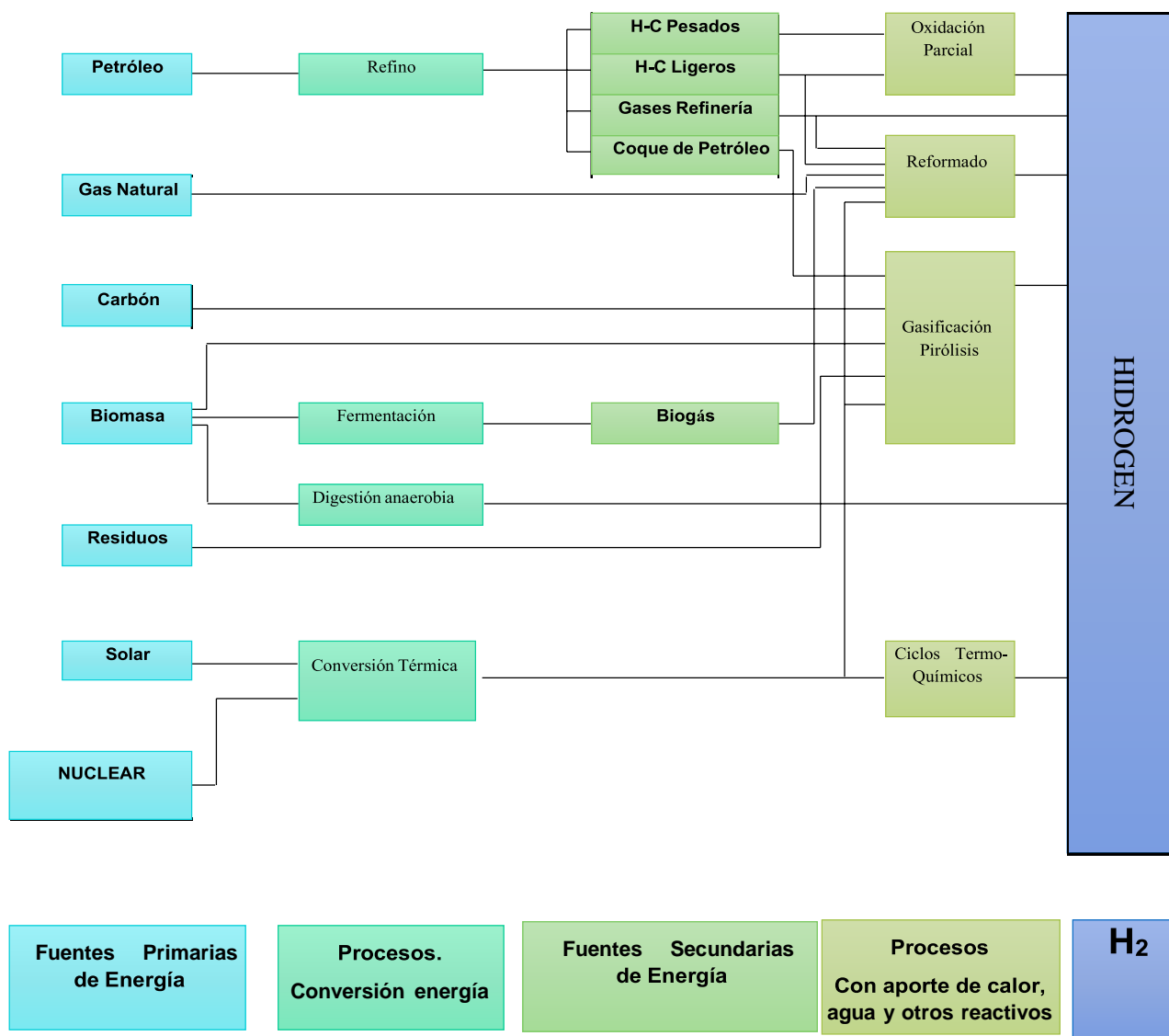
Las técnicas para producción del hidrógeno admiten la siguiente clasificación:

- Procesos de conversión química: Reformado, Gasificación y Pirólisis
- Procesos termolíticos: Termólisis directa y por Ciclos Termoquímicos.
- Procesos electrolíticos: Electrólisis.
- Procesos biológicos: Fermentación, Digestión anaerobia
- Procesos fotónicos: Foelectrólisis, Fotobiólisis y Fotocatálisis.

Los dos primeros tipos de procesos requieren de un aporte de energía térmica, bien procedente de la combustión del propio recurso que se procesa (conversión química), bien procedente de una fuente externa (termólisis). En este caso es necesario indicar que los procesos reformados, gasificación y pirolisis de combustibles fósiles, realizados con un aporte de energía térmica externa al recurso fósil, reciben también el nombre genérico de procesos de descarbonización. En cuanto a los procesos electrolíticos necesitan que se proporcione electricidad (sea cual sea su origen) y en los fotónicos simplemente se necesita la incidencia directa de radiación solar.

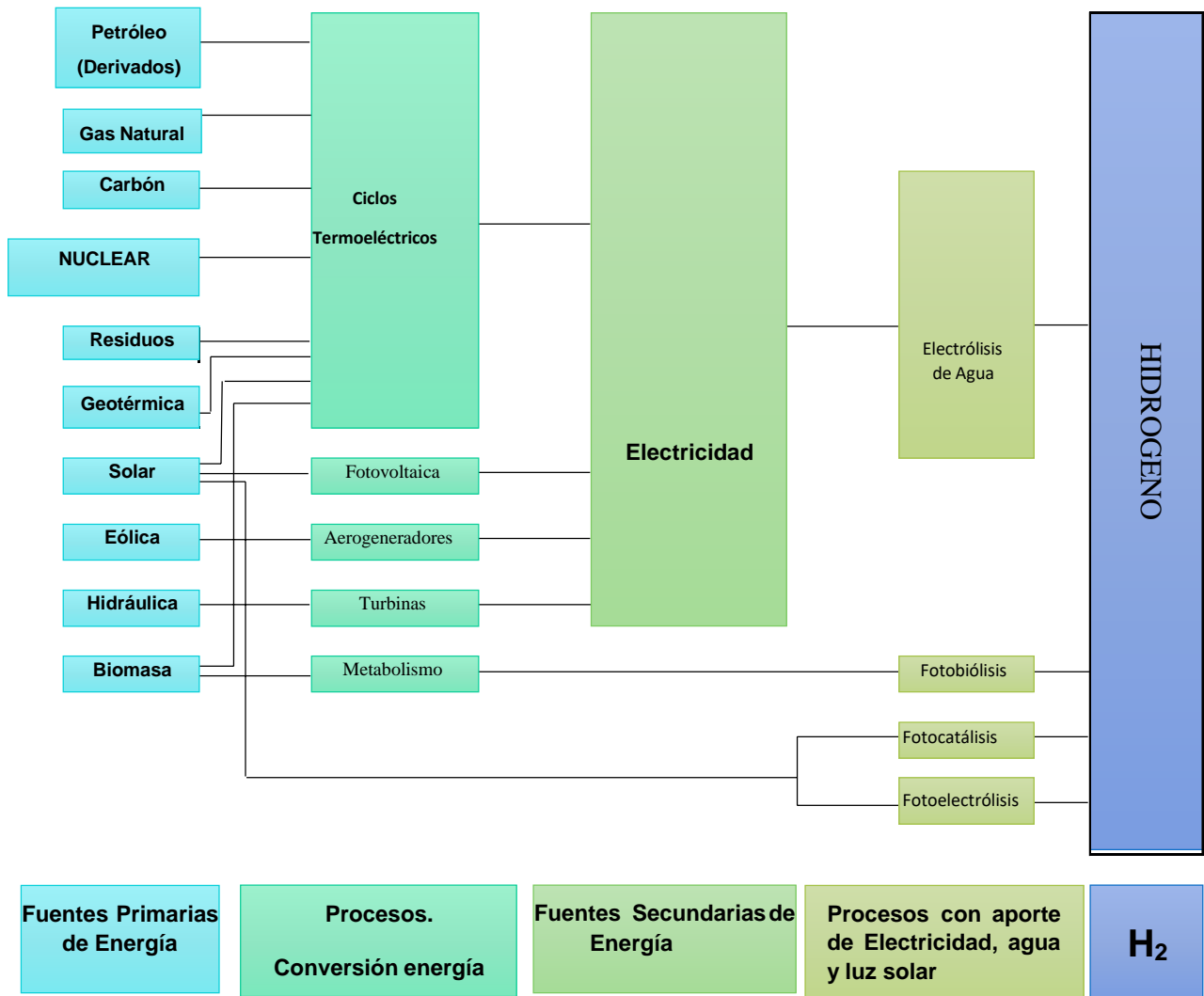
En las siguientes figuras se indican esquemáticamente las cadenas de producción de hidrógeno a partir de recursos fósiles y renovables siguiendo procesos que requieren aporte de energía térmica (Figura I - 1) y de electricidad o luz solar (Figura I - 2). (Antonio González García-Conde)

Figura I- 1: Procesos de producción de hidrógeno que requieren aporte de energía térmica



Fuente: Antonio González García-Conde

Figura I- 2 : Procesos de producción de hidrógeno que requieren aporte de electricidad o luz solar



Fuente: Antonio González García-Conde

1.1.1. Hidrógeno a partir de combustibles fósiles

El hidrógeno se puede producir a partir de la mayor parte de los combustibles fósiles pero, dado que en estos procesos se produce dióxido de carbono como subproducto, este CO₂ debería de ser capturado y almacenado, siempre que pretendamos asegurar una producción sostenible (cero contaminaciones). Sin embargo, la factibilidad de esta captura y almacenamiento del CO₂ varía dependiendo del tamaño de la planta de producción, centralizada (gran escala) o distribuida. En la actualidad se están utilizando reformadores de gas natural de pequeña escala como proyectos de demostración para estaciones de llenado de hidrógeno en aplicaciones de automoción. A medio plazo, la producción combinada de hidrógeno y electricidad a partir de carbón en plantas de gasificación integrada en ciclo combinado (GICC), presenta muy buenas expectativas dado que, aunque los costes de inversión en estas plantas de gran escala son grandes, sin embargo, la cogeneración hidrógeno-electricidad puede ser muy eficiente y la separación y captura de CO₂ puede realizarse con extra costes bajos (en torno al 5%).

(Antonio González García-Conde)

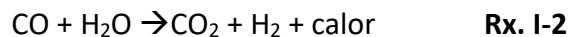
1.1.2. Hidrógeno desde Gas Natural

Al día de hoy, la fuente principal de producción de hidrógeno industrial es el gas natural y el método más barato el reformado con vapor de agua (SMR – “steam methane reforming”), aunque también existen los procesos de oxidación parcial (POX) y reformado autotérmico (ATR).

El reformado de gas natural con vapor de agua es una reacción endotérmica, que opera en unas temperaturas entre 700 y 850 °C y presiones de 3 a 25 bar, por la que se convierten estos reactantes en hidrógeno y monóxido de carbono.

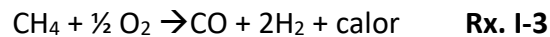


Normalmente se hace reaccionar el CO con vapor de agua (reacción de desplazamiento) para convertirlo en CO₂ y obtener una producción adicional de hidrógeno.



El reformado con vapor de agua, en plantas centralizadas, puede alcanzar eficiencias del 85% (sin considerar la compresión del H₂), ofreciendo bajos niveles de emisión y bajos costes del hidrógeno producido.

La oxidación parcial es un proceso exotérmico, en el que el gas natural se oxida solamente hasta CO al entrar en reacción con oxígeno gas, del que se obtiene una producción menor de hidrógeno por cada mol de metano que reacciona.



El calor se libera a una temperatura entre 800 y 1100 °C. El carácter exotérmico del proceso permite diseños de la planta más compactos que con el (SMR – “steam methane reforming”).

El reformado autotérmico es una combinación de los anteriores que se diseña de forma que el calor excedentario de la oxidación parcial se utiliza para abastecer las necesidades del reformado con vapor. La planta se dimensiona de modo que el proceso global sea ligeramente exotérmico. La temperatura de salida del reactor se sitúa entre 950 y 1100 °C, y la presión del gas puede alcanzar 100 bar. Aunque el diseño del reactor es más complejo que en los casos anteriores, en el futuro esta tecnología puede ofrecer altas eficiencias en unidades pequeñas. (Antonio González García-Conde)

1.1.3. Hidrógeno desde el Carbón

La producción de hidrógeno por gasificación de carbón es una tecnología madura establecida comercialmente. El proceso es más complejo que el reformado de gas natural y, en general, el coste del hidrógeno producido por gasificación de carbón es más alto que el obtenido por SMR, sin embargo, puede convertirse en un procedimiento de producción competitivo conforme los precios del gas natural aumenten. El fundamento de la gasificación del carbón es su oxidación parcial en presencia de oxígeno y vapor de agua. Cuando este proceso se realiza a temperaturas superiores a 1000°C, se produce fundamentalmente CO y de H₂, el CO se desplaza a CO₂ y, por último, la mezcla resultante de H₂ y CO₂ e impurezas se separa utilizando procesos de absorción física. Esta técnica no es adecuada para plantas de producción

descentralizada debido a que presenta una gran economía de escala y a que la captura y almacenamiento de CO₂ en sistemas pequeños sería difícil y cara. Sin embargo, la producción de hidrógeno centralizada en plantas tipo GICC es una opción particularmente atractiva tanto por la mayor eficiencia obtenida en la coproducción de electricidad e hidrógeno, como por las posibilidades de captura del CO₂. En los últimos años se está prestando una especial atención a la coproducción de electricidad y combustibles sintéticos (metanol, Fischer-Tropsch diesel e hidrógeno) a partir de carbón en plantas GICC, dada la preocupación por asegurar el suministro energético y disminuir las emisiones. El programa norteamericano FutureGen, por el que se pretende tener una planta de generación de electricidad y combustible cero contaminaciones, se centra en esta tecnología. (Antonio González García-Conde)

1.1.4. Hidrógeno a partir de biomasa

El interés de la biomasa como materia prima para la obtención del hidrógeno radica, por un lado, en que aporta un balance de CO₂ neutro, de manera que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento el CO₂ que se libera durante la producción de hidrógeno, y por otro, en que la biomasa es un recurso renovable y sostenible, siempre que su consumo no sea mayor que la capacidad de regeneración natural.

Es posible obtener hidrógeno de la biomasa a partir de un gran número de procesos de tipo biológico y termoquímico. Los procesos biológicos son en general más lentos y costosos que los termoquímicos y en el futuro pueden llegar a jugar un papel de sistemas de producción de hidrógeno descentralizados, mientras que la producción centralizada, a partir de biomasa, se basará fundamentalmente en procesos termoquímicos, entre los que destacan la gasificación y la pirolisis. (Antonio González García-Conde)

1.1.5. Gasificación de biomasa

La gasificación es el proceso que implica la transformación termoquímica de la biomasa, a temperaturas superiores a 700°C y con aporte controlado de oxígeno o vapor, obteniendo gas sintético o syngas.

Este gas sintético contiene hidrógeno que puede separarse y purificarse.

El proceso general de gasificación se divide en tres etapas:

- 1) Secado: la humedad contenida en el sólido orgánico se evapora.
- 2) Pirólisis: descomposición térmica en ausencia de oxígeno.
- 3) Gasificación: oxidación parcial de los productos de la pirólisis.

La proporción de hidrógeno que puede obtenerse a partir del gas de síntesis generado es de aproximadamente el 40%, en un proceso que resulta menos intensivo en emisión de carbono que en la producción de hidrógeno gris o azul (a partir de gas natural).

Además, este proceso resulta menos costoso que la electrólisis empleada para el hidrógeno verde, por el momento, y permite la producción continua de energía gracias a la disponibilidad de la biomasa.

No obstante, no deja de ser un proceso complejo en el que intervienen gran número de reacciones y se generan productos no deseados, como el monóxido de carbono (CO) y el coque.

A esto se suma que, el proceso requiere de unas condiciones severas de reacción, seguido de los pasos adicionales de separación y purificación del hidrógeno producido para que sea de alta calidad. Algo que complica su implantación en industrias de pequeño tamaño. (Antonio González García-Conde)

1.1.6. Fotobiólisis

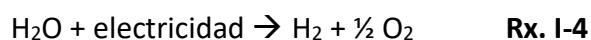
La producción de hidrógeno por vía fotobiológica se basa en dos etapas: fotosíntesis y producción de hidrógeno catalizada por hidrogenasas en algas verdes y en cianobacterias. El metabolismo de los microorganismos, por el que se produce hidrógeno, tiene que ser modificado por ingeniería genética para que se alcancen niveles significativos de producción de hidrógeno. Esta técnica requiere todavía de investigación básica y aplicada a largo plazo, sin embargo, si tiene éxito, algún gran avance en esta técnica puede preparar el camino para una producción de hidrógeno sostenible. (Antonio González García-Conde)

1.1.7. Hidrógeno a partir de Agua

Se puede conseguir la separación de la molécula de agua para obtener el hidrógeno siguiendo diversos procesos (ver figuras I- 1 y I- 2): electrólisis, fotoelectrólisis y descomposición mediante ciclos termoquímicos a alta temperatura.

1.1.7.1. Electrólisis

La electrólisis es un proceso bien conocido por el cual se logra que el agua se separe en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de electricidad.



La participación de la electricidad en el proceso ofrece como ventaja la posibilidad de utilizar cualquier fuente primaria de energía para la producción de hidrógeno (figura I-3). No obstante, el principal inconveniente que presenta este proceso consiste en que, como la molécula del agua es muy estable, la energía que hay que poner en juego para lograr su separación también es grande (286,45 kJ/mol a 25 °C). Una forma de paliar esta situación se centra en elevar la temperatura de trabajo. A temperaturas bajas, con agua en estado líquido, prácticamente toda la energía que es necesario aportar para la separación debe realizarse en forma de electricidad, pero conforme se eleva la temperatura, aunque la energía total necesaria también aumente ligeramente, sin embargo, es posible sustituir parte de la electricidad por calor (ver tabla I-1). Será por tanto interesante realizar la electrólisis a alta temperatura cuando se disponga de una fuente de calor residual procedente de otro proceso. En general se pretende siempre reducir el aporte eléctrico para la electrólisis porque el coste del hidrógeno producido está claramente dominado por el coste de la electricidad utilizada (con independencia del tamaño del electrolizador).

Tabla I- 1: Valores teóricos de energía necesaria y eficiencia de la electrólisis de agua en función de la presión y la temperatura de operación

P (ba)	T (°C)	Valores teóricos de:			
		Electricidad necesaria (GJ/GJ H ₂)	Calor necesario (GJ/GJ H ₂)	Energía total necesaria (GJ/GJ H ₂)	Eficiencia Global (%)
1	25	0.98	0.20	1.18	84.6
1	1000	0.74	0.63	1.37	73.1
400	25	1.07	0.20	1.27	78.6

Fuente: Prince-Richard, 2004

Observando los valores de la tabla, en principio puede parecer inadecuado operar a altas presiones dado que energía eléctrica necesaria aumenta, sin embargo, si la presión de suministro del electrolizador es elevada, se evitan costes adicionales de compresión del hidrógeno en los que es necesario incurrir para su almacenamiento. Por otro lado, la operación a alta presión y baja temperatura resulta más eficiente que a baja presión y alta temperatura. Estos aspectos resultan de especial relevancia a la hora del diseño de sistemas de suministro de hidrógeno, en los que se debe tener en consideración no solo el coste del electrolizador y de la electricidad, sino también los costes del compresor y del almacenamiento para el hidrógeno, a parte de los de operación y mantenimiento.

1.1.7.2. Foelectrólisis

La utilización de sistemas de energía fotovoltaica conectados con electrolizadores es una tecnología conocida y disponible comercialmente que, fundamentalmente en aplicaciones remotas o en funcionamiento aislado de la red eléctrica, ofrece la ventaja de suministrar electricidad y un combustible (hidrógeno), con la flexibilidad que

supone utilizar el hidrógeno como almacenamiento de la electricidad producida pero no demandada por la carga. A la técnica de producción por la cual se combinan ambos procesos (generación de electricidad fotovoltaica y producción de hidrógeno) en un único dispositivo, se le denomina fotoelectrólisis y se consigue utilizando células fotoelectroquímicas, formadas uniendo diversos materiales semiconductores. Estos dispositivos se encuentran en estado de investigación fundamental, pero en el ámbito del laboratorio ya han ofrecido eficiencias de conversión solar-hidrógeno del 16% (según datos de la Agencia Internacional de la Energía) y presentan una gran potencia de reducción de costes comparado con los sistemas de la tecnología convencional de dos pasos mencionada al principio. (Antonio González García-Conde)

1.1.7.3. Descomposición del agua por ciclos termo-químicos

El uso directo de energía térmica a alta temperatura para disociar el agua tiene la ventaja de que se evita una buena parte del consumo de electricidad necesario para la producción de hidrógeno a partir de agua. Como la descomposición directa de la molécula de agua por vía térmica es un proceso inviable en la práctica dado que se produce a temperaturas superiores a 2500 °C, se recurre a todo un conjunto de técnicas con el objetivo de reducir la temperatura que requiere el proceso. Entre ellas se encuentran los ciclos termoquímicos que están basados en la combinación de una serie de reacciones químicas operando en un ciclo cerrado en las que el hidrógeno se obtiene del agua y los reactivos se recuperan y reciclan. Como fuente de energía calorífica se puede utilizar o bien energía nuclear o bien energía solar térmica de alta temperatura dependiendo de los niveles de temperatura que exija cada ciclo.

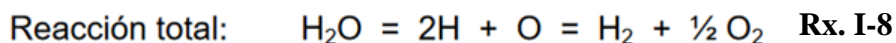
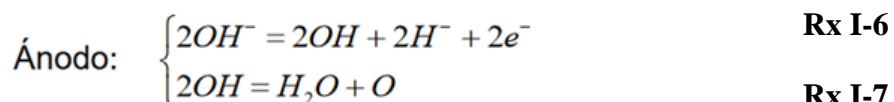
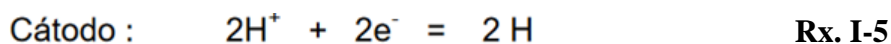
Desde hace años se vienen desarrollando multitud de estos ciclos, aunque los más utilizados son: Ciclos SI (basados en la familia del azufre y del yodo), ciclo UT-3 (basados en bromuros de calcio y de hierro) y ciclos de óxidos sólidos (reacciones redox metal/óxido entre las que destacan las del zinc y el hierro). Los primeros dos primeros comenzaron a desarrollarse pensando en el uso de la energía nuclear utilizando reactores VHTR (very-high temperature reactor), hoy en día en desarrollo dado que los reactores actuales de fisión no alcanzan la temperatura necesaria y, el

último, se orienta al uso de la energía solar térmica de alta temperatura utilizando de centrales de concentración solar. (Antonio González García-Conde)

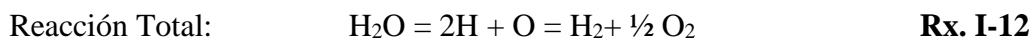
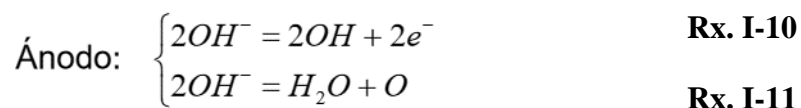
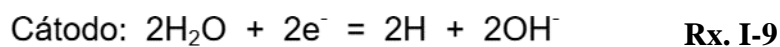
1.2. Electrolización del agua para obtener hidrógeno

1.2.1. Condiciones para que ocurra la electrólisis

Si se examina la Reacción Electroquímica primaria para la obtención de Hidrógeno y Oxígeno, el compuesto que se electroliza es el agua. Sin embargo, agua pura no se puede utilizar como fuente electrolítica, debido a su muy pequeña conductividad. Por lo cual se adiciona a ésta, determinadas cantidades de un Ácido Oxácido o de una base. La Tensión de Descomposición de la mayoría de los Ácidos Oxácidos y de las Bases, colocadas entre dos electrodos de platino, es alrededor de 1.69 Voltios. Esto indica que la reacción total debe ser la misma, cual quiera que sea el soluto. Las pequeñas diferencias observadas son atribuidas a pequeñas diferencias en las sobretensiones de las semirreacciones, las cuales si dependen del soluto. En una solución acuosa de un Ácido Oxácido o de una Base, siempre estarán presentes tres especies iónicas: Hidrógenos y Oxhidrilos en ambos casos, y en el anión del Ácido o el Cation de la base en cada uno. Las reacciones en una solución ácida serán las siguientes (Mendoza, 2004):



Las reacciones en una solución alcalina son las siguientes (Mendoza, 2004):



En consecuencia, los productos finales de la reacción son los mismos, independientemente del pH de esta. El único electrólito que es considerado en la producción electrolítica industrial de Hidrógeno y Oxígeno es el Hidróxido de Sodio; en menor escala se considera el Hidróxido de Potasio. La tendencia a usar soluciones básicas se debe sobre todo a que su ataque sobre los materiales de construcción de las celdas, (recipientes, electrodos y diafragmas), es menor que el ataque ácido. Lo anterior se prefiere, a pesar de que la conductividad obtenida con un electrólito alcalino es considerablemente menor que la obtenida con un electrólito ácido, (Ácido Sulfúrico, por ejemplo). A pesar también de que la soda cáustica, cuando se usa en celdas abiertas, tiende a reaccionar con el Dióxido de Carbono de la Atmósfera acumulando Carbonato de Sodio en el electrólito, el cual disminuye aún más la conductividad del baño y ocasiona condiciones de corrosividad sobre los materiales de construcción (Mendoza, 2004).

1.2.2. Condiciones para que operen las celdas

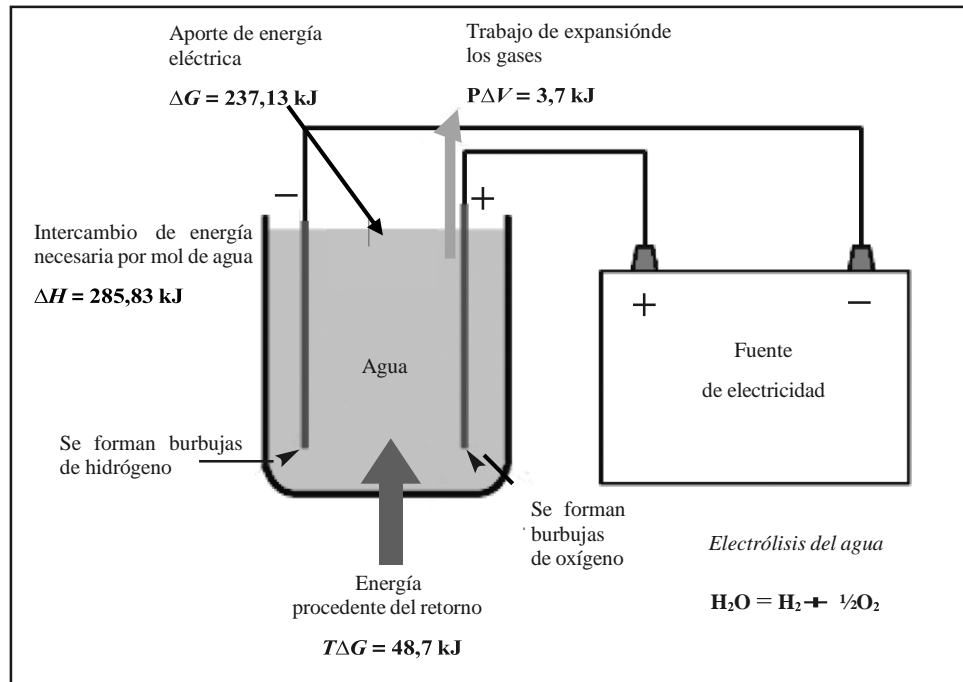
Se pueden resumir en las siguientes, las condiciones de operación de las celdas, que deben ser cuidadosamente definidas a efecto de mantener lo más bajo posible el voltaje de la celda para tratar de tener el menor consumo de energía posible:

- a) La elección de los materiales de electrodos. Estos deben ser seleccionados de tal manera que tengan buena resistencia a la acción del electrólito y a la acción del gas. Lo anterior se traduce en disminución de pérdidas de energía debidas a sobretensión.
- b) A mayor temperatura de operación, la sobretensión y la resistencia específica del electrólito se hace menor.
- c) Se debe determinar correctamente la concentración del electrólito. Se deben determinar las concentraciones y las temperaturas de los electrólitos de tal manera que, a concentración y temperatura determinadas, se obtenga la máxima conductividad específica. Las temperaturas normales de operación oscilan entre 70 y 85°C. Para estas temperaturas, las conductividades de los

Hidróxidos de Sodio y Potasio muestran un máximo a concentraciones de 20 % y 27-50 % respectivamente. A esta temperatura y en las concentraciones citadas, la resistencia es la misma para ambos electrolitos. Los problemas de corrosión son también aproximadamente iguales. Lo anterior quiere decir que las ventajas de utilizar Soda o Potasa son iguales. Sin embargo, a pesar de que su precio es mayor, la Potasa presenta la ventaja de que su presión de vapor en las concentraciones indicadas es menor que la presión de vapor de la Soda a 23% ambas a la misma temperatura de operación. Esta ventaja se manifiesta en que usando potasa se reducen los problemas de recuperación de condensados en las corrientes gaseosas, disminuyendo los costos del agua destilada o desmineralizada utilizadas en la electrólisis, pues se disminuyen las pérdidas de agua.

- d)** Se debe tratar de que el desprendimiento de gases y burbujas de vapor sea rápido.
- e)** La distancia entre electrodos debe ser elegida convenientemente para disminuir la resistencia interna de la celda. Este está en conexión con la condición anterior de desprendimiento de gases en los electrodos (Mendoza, 2004).

Figura I- 3: Balance de energía de la electrólisis del agua (1 atm, 298 K)



Fuente: Mendoza, 2004.

1.2.3. Potencial estándar y ecuación de Nernst

El potencial estándar para la electrólisis del agua lo obtenemos de los potenciales estándar de las semirreacciones (Kelly, 2014). Estos voltajes se dan en condiciones estándar, es decir, 298 K y 1 bar.

El potencial estándar E^0 representa el voltaje mínimo para que comience la reacción (en condiciones de presión y temperatura constantes). Se relaciona con la energía libre de Gibbs mediante la ecuación:

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{n \cdot F} \quad \text{Ec. I-1}$$

La ecuación que relaciona el potencial de reducción en un electrodo cuando las condiciones no son estándar (descubierta en 1889 por Walther Nernst) es la siguiente:

$$E = E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} * \text{Ln} (Q) \quad \text{Ec. I-2}$$

Siendo:

E: Potencial del electrodo corregido.

E^0 : Potencial en condiciones estándar (se encuentran tabulados en una tabla Anexo A).

R: Constante de los gases.

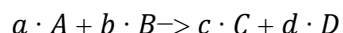
T: Temperatura de operación (Kelvin).

n: mol de electrones que intervienen en la reacción por mol de compuesto disociado.

F: Constante de Faraday (96500 C/mol).

Q: Constante de equilibrio termodinámico.

Ejemplo: Para la reacción



La constante sería: $Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$

[A] y [B] indicarían la presión parcial o la concentración molar de los reactivos, [C] y [D] corresponderían a los productos. Al ser una reacción, las concentraciones cambiarán a medida que avanza la misma, por lo que Q tenderá hacia el valor de la constante de equilibrio, K

$$K = \frac{[a_C]^c \cdot [a_D]^d}{[a_A]^a \cdot [a_B]^b} \quad [a_j: \text{coeficiente de actividad del compuesto } j]$$

1.2.4. Consideraciones termodinámicas

El sentido de la evolución de una reacción estará dado por la variación de alguna de las funciones termodinámicas de estado como es el caso de la energía libre de Gibbs (ΔG) o de la energía libre de Helmholtz (ΔA). Estas funciones de estado indican, para una reacción química, su condición de equilibrio y espontaneidad utilizando unidades de energía. Se utiliza ΔG para sistemas abiertos (P, T constantes) y ΔA para celdas electrolíticas cerradas (V, T constantes). En ambos casos, lo que se mide normalmente

es la energía libre de reacción o cambio de energía que sufre una reacción en condiciones estándares, es decir, ΔG^0 o ΔA^0 .

Entre estas funciones se establecen las siguientes relaciones termodinámicas:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad \text{Ec. I-3}$$

$$\Delta G_{\text{reacción}} = -R \cdot T \cdot \ln K \quad \text{Ec. I-4}$$

$$\Delta G^0_{\text{H}_2\text{O}} = 273.75 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G^0 = -n \cdot F \cdot E^0 \quad \text{Ec. I-5}$$

Donde ΔH es la entalpía, ΔS es la entropía, K la constante de equilibrio previamente mencionada, n es el número de electrones en la semirreacción por mol de agua dividido ($n=2$), F es la constante de Faraday ($F=96500 \text{ C/mol}$) y E^0 el potencial estándar en voltios. Como ya se ha indicado, existe una tabla con potenciales estándar de semirreacciones tabulados para condiciones estándar y tomando un electrodo de hidrógeno como referencia

$$\Delta A = \Delta H - T \cdot R \cdot \Delta n - T \cdot \Delta S \quad \text{Ec. I-6}$$

Para la electrolisis del agua (Zoulias and Varkaraki, 2004) se tienen los siguientes valores:

$$\Delta H^0 = 285.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta n = 1.5$$

$$\Delta S^0(\text{H}_2) = 130.6$$

$$\Delta S^0(\text{O}_2) = 205.1$$

$$\Delta S^0(\text{H}_2\text{O}) (\text{l}) = 70 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta S^0(\text{total}) = 130.6 + \frac{1}{2} * 205.1 - 70 = 163.14 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta A^0 = 233.1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G^0 = 237.2 \frac{Kj}{mol}$$

A partir del valor de la energía libre puede calcularse teóricamente el valor del voltaje mínimo necesario de la celda. El resultado es:

$$E^0 = 1.23 \text{ V celda abierta} \quad E^0 = 1.21 \text{ V celda cerrada}$$

Y con ello puede calcularse la eficiencia máxima posible de la celda electroquímica (eficiencia ideal), definida como (Zoulias and Varkaraki, 2004):

$$\mathcal{E} \text{ máx.} = \frac{\Delta H}{\Delta G} = \frac{-\Delta H}{n \cdot F \cdot E^0} \quad (\text{Abierta}) \quad \text{Ec. I-7}$$

$$\mathcal{E} \text{ máx.} = \frac{\Delta H}{\Delta A} = \frac{-\Delta H}{n \cdot F \cdot E^0} \quad (\text{Cerrada}) \quad \text{Ec. I-8}$$

En la realidad, la eficiencia de la celda se calcula como:

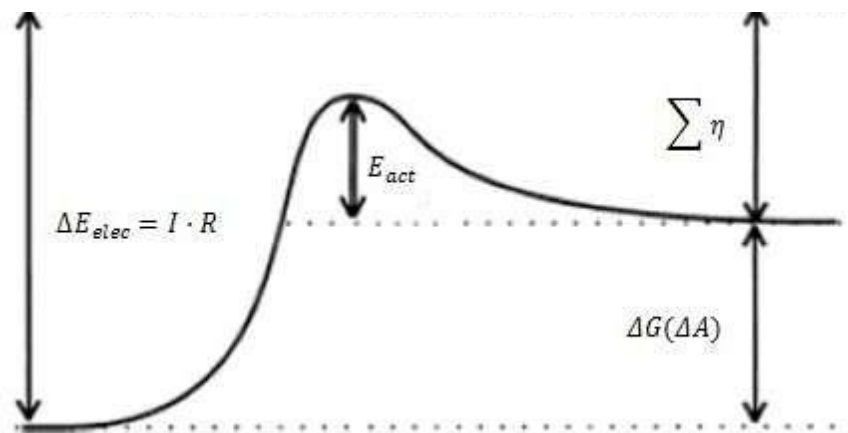
$$\mathcal{E} \text{ real} = \frac{-\Delta H}{n \cdot \Delta E_{\text{celda}}} \quad \text{Ec. I-9}$$

$$\Delta E_{\text{celda}} = \Delta(\Delta A) + I \cdot R + \sum n \quad \text{Ec. I-10}$$

Donde ΔE_{celda} es el voltaje real aplicado, R es la resistencia óhmica total (teniendo en cuenta el electrolito, los electrodos, la membrana y la resistencia del circuito externo) y $\sum n$ es la suma de sobrepotenciales.

La expresión de la eficacia real tiene en cuenta que para que comience la electrolisis hace falta vencer varias barreras extra como son las resistencias eléctricas y los denominados sobrepotenciales, que incluyen la energía de activación (como cualquier reacción química) y el sobrepotencial de concentración para el transporte de materia desde la superficie de los electrodos hacia el exterior de los gases formados en los electrodos.

Figura I- 4: Energías involucradas en la reacción



Fuente: Zoulias and Varkaraki, 2004

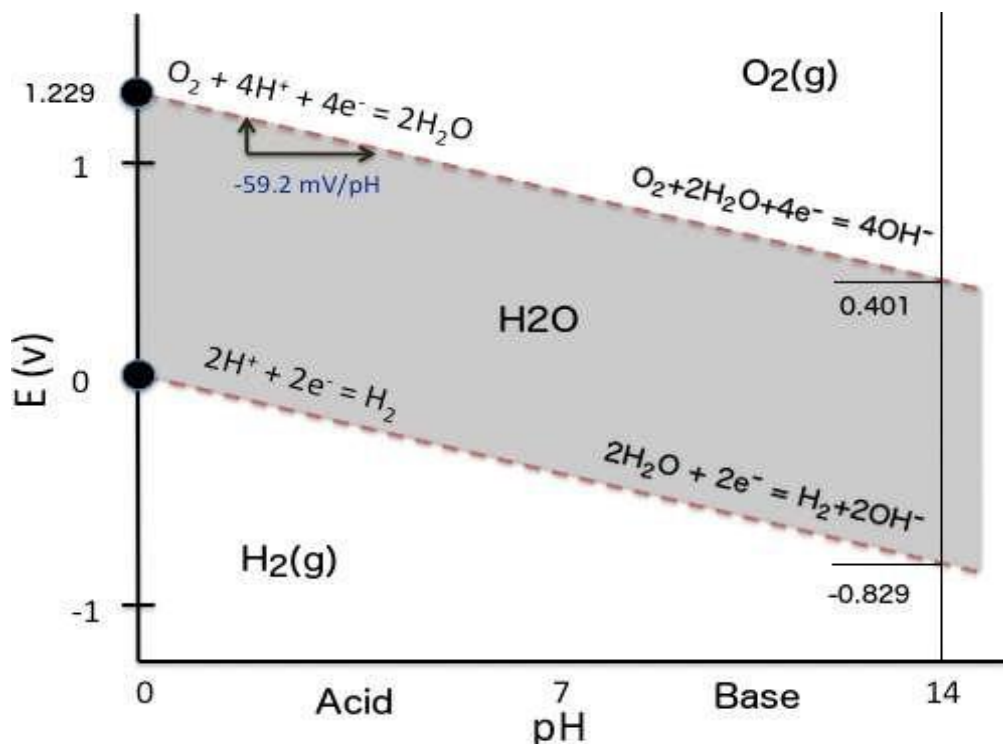
En la Figura 1-6 puede apreciarse el esquema del balance de energías durante la electrolisis del agua.

Como es lógico, el término $\sum \eta$ interesa mantenerlo lo más bajo posible, lo que aconsejaría operar con baja densidad de corriente (i). Sin embargo i baja disminuiría la productividad. Si se analiza la fórmula de la eficiencia, valores bajos de $\sum \eta$ maximizan la eficiencia pero, a su vez, reducen la velocidad de reacción. En consecuencia, hay que llegar a una solución de compromiso.

1.2.5. Diagrama de Pourbaix

Dependiendo del medio en el que se produzca la electrolisis, las semirreacciones en los electrodos varían, aunque el potencial estándar será el mismo, -1.23 V , es decir, una diferencia de potencial de 1.23 V . El signo negativo indica la no espontaneidad de la reacción y la necesidad de aportar energía para provocar dicha reacción. En general, un diagrama de Pourbaix es una representación gráfica del potencial (ordenada) en función del pH (abscisa) para un metal dado bajo condiciones termodinámicas estándar, y traza el equilibrio de fases en el sistema electroquímico acuoso. En la Figura I-7 aparece el diagrama de Pourbaix para el caso del agua, indicando las reacciones y los potenciales que tienen lugar según el pH en el que se encuentre la disolución.

Figura I- 5: Diagrama de Pourbaix para el agua



Fuente: PourbaixWater.png - Wikipedia

Las dos líneas discontinuas que aparecen en el diagrama representan el equilibrio de descomposición del agua con desprendimiento de oxígeno e hidrógeno, respectivamente. La región entre las dos líneas representa la zona donde el agua es estable con respecto al oxígeno y al hidrógeno. Por encima de la línea discontinua superior (condiciones oxidantes), el agua se descompone por desprenderse oxígeno en forma de gas. Por debajo de la línea discontinua inferior (condiciones reductoras), el agua se descompone por desaparecer los protones en forma de hidrógeno gaseoso. Aplicando la ecuación de Nernst para el desprendimiento de hidrógeno se obtiene para la línea inferior la expresión $E = -0,0591 \text{ pH}$. De manera similar, para la reducción de oxígeno resulta la ecuación $E = 1,23 - 0,0591 \text{ pH}$

En el momento que a una disolución de agua líquida, a 298 K y 1 bar de presión se le aplican 1.23 V, se cumple el requisito energético y el agua comienza a descomponerse en los elementos que lo forman por medio de las semirreacciones de formación de

hidrógeno y oxígeno. El sistema reacciona de manera que tiende al equilibrio, partiendo de agua y energía eléctrica obtenemos como productos hidrógeno y oxígeno en forma de gas. No obstante, la formación de estos gases será próxima a cero para estas condiciones (condiciones estándar y 1.23V), ya que son las mínimas que deben darse para que se dé la reacción.

Para conseguir una reacción continuada se aplica un sobrepotencial, elevando el voltaje por encima de 1.23V. Esto cubre cualquier tipo de pérdidas y factores en contra de la idealidad de la reacción. El mayor sobrepotencial para celdas sin pérdidas excesivas es el sobrepotencial de reacción, que correspondería a un potencial de activación que precede a la transferencia de electrones. Los electro catalizadores pueden contribuir a mejorar el rendimiento, dando la posibilidad de trabajar con voltajes menores. Actualmente conseguir un electro catalizador barato y efectivo para la electrolisis del agua sería un gran avance, se está investigando en los siguientes campos (González, 2010):

- Sulfuro de molibdeno.
- Puntos cuánticos de grafeno.
- Nanotubos de carbono.
- Perovskita.
- Níquel / Óxido de níquel.

1.3. Tipos de celdas electrolíticas

En este apartado se estudian los principales tipos de celdas electrolíticas según el mecanismo por el que se rigen. Distinguimos electrolisis alcalina, PEM, AEM y de óxidos sólidos. Para cada tipo se presentarán:

- Un esquema del sistema, el cual dará una idea del funcionamiento viendo el recorrido que siguen los cationes y los aniones.
- Los componentes. Su apartado que se centrará principalmente en los electrodos y sus materiales.

- Las materias primas. Además del agua que se pretende separar en sus elementos pueden ser necesarios aditivos que actúen como catalizador de la reacción.
- Los voltajes de celda necesarios para que se produzca la reacción. Estos varían según la resistencia que ofrecen los electrodos el medio y la membrana.

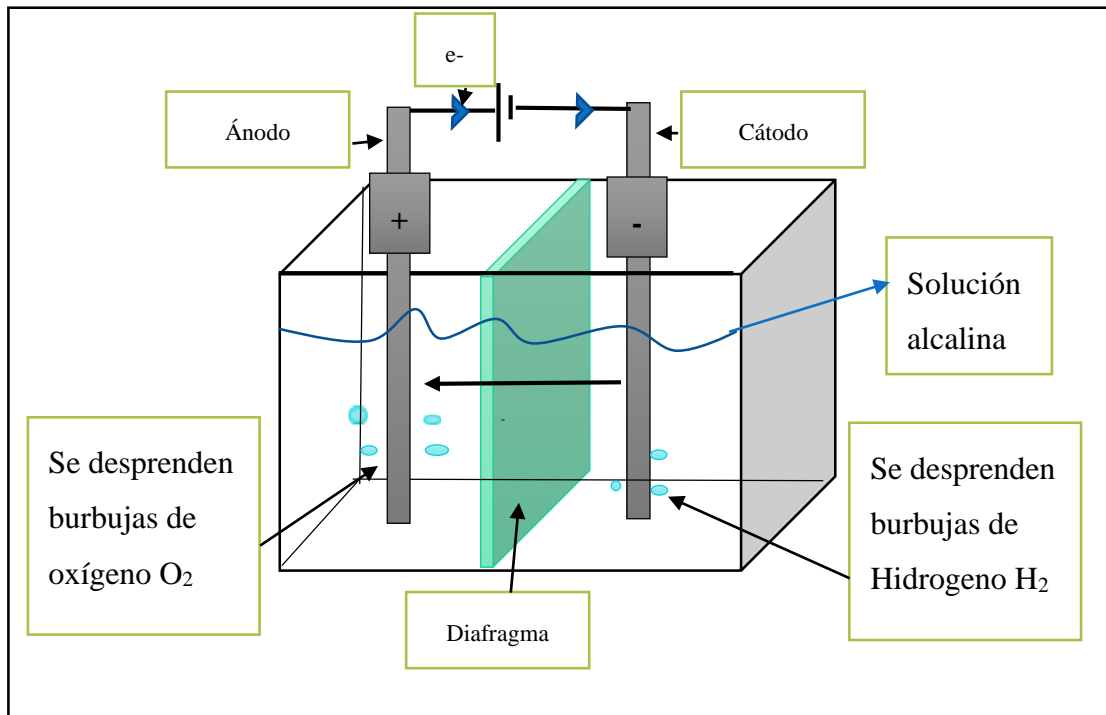
1.3.1. Alcalina

La electrolisis alcalina del agua es una de las dos principales tecnologías junto a los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM). Es la tecnología más madura, y debido a su desarrollo, es la más económica. Su eficacia se sitúa en torno al 62-82%, siendo mayor cuanto mayor sea el tamaño del electrolizador (Chisholm and Cronin, 2016).

1.3.1.1. Esquema

El esquema correspondiente a la Figura I-6 muestra un electrolizador alcalino convencional, que consta de ánodo y cátodo (normalmente de Níquel) y un separador entre las cámaras de ambos electrodos que es permeable a los iones de hidróxido y a las moléculas de agua. Para operar en un medio alcalino, es decir, básico, se añade un electrolito como el hidróxido de potasio (KOH) hasta tener una disolución con valores cercanos al 30% de KOH (Chisholm and Cronin, 2016). La función es desplazar la reacción del ánodo hacia la formación de oxígeno. En el cátodo se forman burbujas de hidrógeno y en el ánodo de oxígeno, las cuales son recogidas de manera separada en cada una de las cámaras.

Figura I- 6: Electrolizador alcalino



Fuente:(Chisholm and Cronin, 2016)

La configuración de la Figura I-6 es la de un electrolizador alcalino convencional. Los electrodos se sumergen en el electrolito. En cada compartimento se forma un producto (hidrógeno y oxígeno), permanecen separados por una membrana impermeable a gases que divide la celda electrolítica. Las burbujas de gas que se forman en los electrodos disminuyen la superficie activa del mismo, lo que supone una resistencia para el electrolito. Cuando se aplican densidades de corriente elevadas el flujo de burbujas aumenta, cubriendo una parte importante del electrodo, esto hace que a gran escala esta configuración sea inviable.

1.3.1.2. Componentes

Se diferencian 2 componentes básicos que son: ánodo y cátodo. Anteriormente hemos señalado que los electrolizadores estaban fabricados con Níquel, pero si queremos ser más específicos debemos añadir que son aleaciones en las que el 70% es Níquel aleado (por ejemplo el Níquel Raney, que contiene un 85% en masa de Ni y el resto de

aluminio)(Ertl, Knozinger and Weitkamp, 1999; Solomons and Fryhle, 2004). El 30% restante es variable, siendo objeto actualmente de investigación para conseguir electrodos que reduzcan la resistencia permitiendo de esta manera llevar a cabo la electrolisis con menores voltajes. Entre los materiales que se están utilizando para complementar al Ni se pueden señalar: óxidos de molibdeno, grafito, cobre y PTFE (politetrafluoroetileno, más conocido por su nombre comercial, teflón) (Marini et al., 2012).

1.3.1.3. Materias primas

Disolución de agua e hidróxido de potasio o sodio, el cual se puede recuperar y recircular de nuevo al proceso electrolítico.

1.3.1.4. Voltaje de celda

El electrolizador alcalino opera con densidades de corriente de 0.2-0.4 A/cm². La densidad de potencia que ofrece es <1 mW/cm². El voltaje de celda varía de 1.8-2.4 V. La energía consumida por Nm³ de hidrógeno producido es de aproximadamente 5 kWh (Marini et al., 2012; Chisholm and Cronin, 2016).

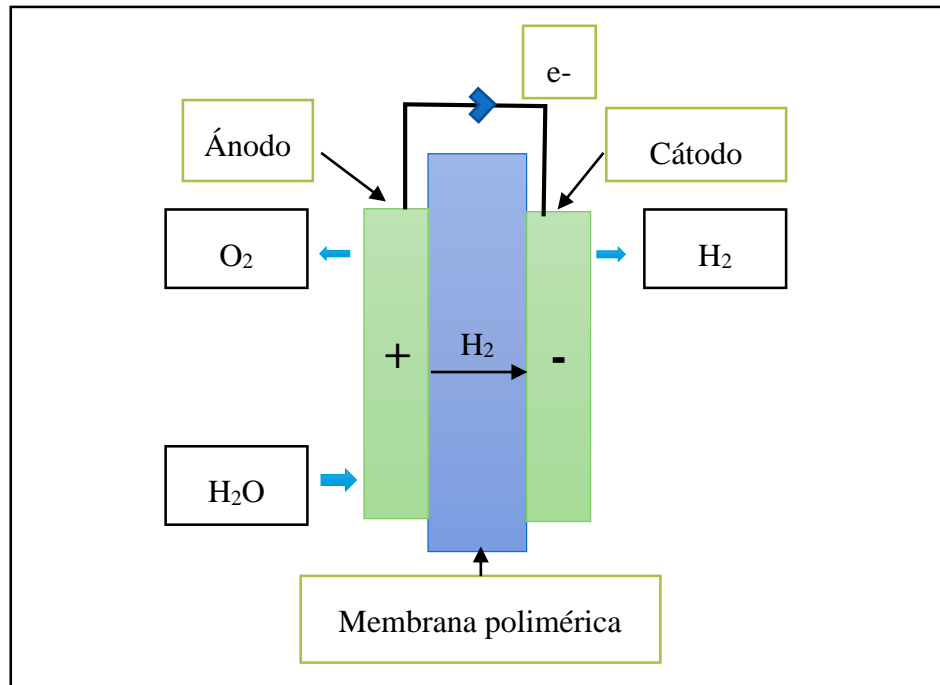
1.3.2. PEM

La electrolisis PEM cuyas siglas corresponden a Proton Exchange Membrane se basa en la conducción de los protones a través de la membrana, fabricada con un polímero fluorado y sulfonado. Dependiendo de los requerimientos de la aplicación la membrana puede variar su grosor, la cual está en el rango de 25-250µm (Chisholm and Cronin, 2016). En la Figura I-10 podemos ver la membrana, los electrodos (de Platino e Iridio) y las GDL (Gas Diffusion Layer) que tienen funciones como:

- Proporcionar un camino a los gases entre electrodos y canales de flujo.
- Transmiten calor durante la operación en la celda.
- Proveen resistencia mecánica al conjunto de membranas.

1.3.2.1. Esquema

Figura I- 7: Membrana de intercambio polimérica



Fuente: (Chisholm and Cronin, 2016)

Los polímeros conductores de iones que forman la membrana tienen un doble fin, en primer lugar transportan cargas eléctricas entre cátodo y ánodo, y en segundo lugar separan los productos formados en cada electrodo. El agua líquida se consume en el ánodo formando oxígeno y se transfiere al cátodo, en el cual se forman las moléculas de hidrógeno a partir de protones, esto es considerado un proceso de electroósmosis

Los protones solvatados con moléculas de agua que se han formado en el ánodo se transportan a través de la membrana hasta el cátodo por efecto del campo eléctrico aplicado. Una vez aquí, cesa la solvatación y son reducidos a hidrógeno molecular. (Millet, 2015)

1.3.2.2. Componentes

La membrana, al estar tratada con un ionómero ácido, hace que el uso de catalizadores se vea limitado a metales de transición raros que ante condiciones ácidas ofrecen un

comportamiento estable, por ejemplo; rodio, rutenio, platino, iridio, y los óxidos de éstos (Miles, 1976). En la tecnología actual se usa platino para el cátodo y óxido de iridio en el ánodo. La investigación tiende a buscar electro catalizadores que mejoren la eficiencia de ambos procesos (oxidación del agua y reducción del protón) y reduzcan los costes.

El componente más importante, la membrana está fabricada con un polímero fluorosulfonado. La más comúnmente utilizada es la de Nafion, un polímero sintético con propiedades iónicas, es decir, un ionómero.

1.3.2.3. Materias primas

La electrolisis PEM requiere un agua desionizado o desmineralizado para llevarse a cabo. El motivo es que los metales tienden a penetrar en la membrana, haciendo que la resistencia interna de la membrana aumente. El coste que supone el pre tratamiento de purificación y des ionización del agua constituyen una de las desventajas de este método. (Trillo-León, 2015).

1.3.2.4. Voltaje de celda

Normalmente en el rango 1.8-2.2 V con densidades de corriente de hasta 2 A/cm².

Las principales diferencias entre una electrolisis alcalina y una PEM son:

- La densidad de corriente. La electrolisis PEM permite manejar densidades de corriente más altas.
- El sistema alcalino permite producir grandes volúmenes, el sistema PEM aún no ha llegado a conseguir producciones a gran escala.
- La vida útil de las membranas es limitada, los sistemas alcalinos son más duraderos.

1.3.3. AEM

El sistema AEM (Anion Exchange Membrane) separa el agua en hidrógeno y oxígeno por medio de una membrana, igual que el PEM, pero en este caso la membrana es aniónica. Esto significa que son los iones hidroxilo los que difunden a través del

sistema AEM a la sección del ánodo mientras que los electrones son transportados por un circuito externo hasta el mismo ánodo donde se da la reacción de formación de la molécula de hidrógeno.

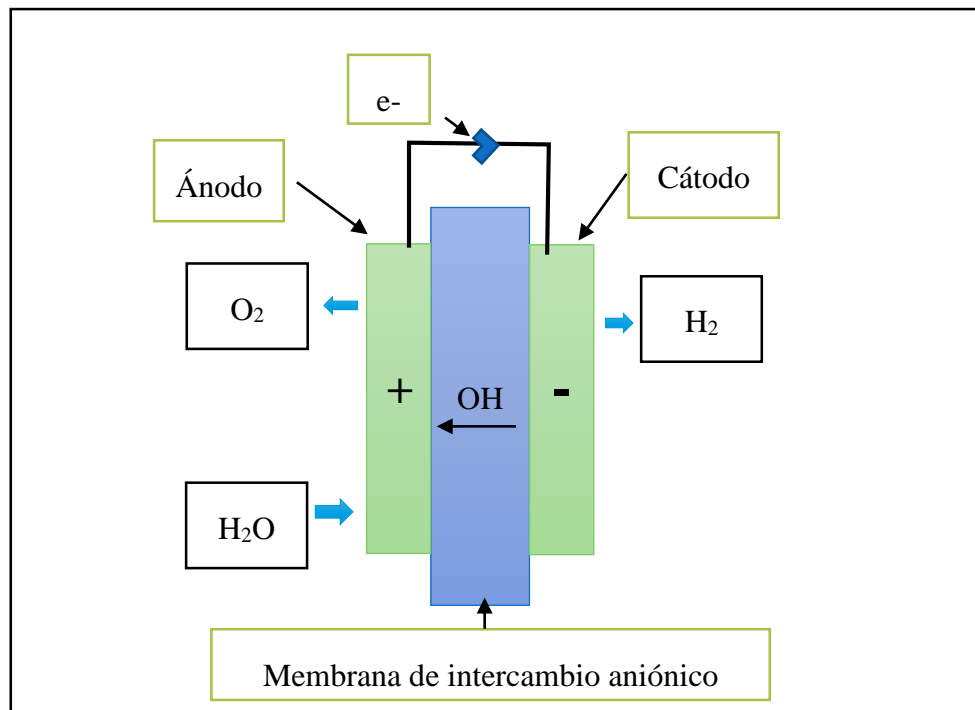
La electrolisis AEM se asemeja a la electrolisis alcalina, pero en vez de utilizar electrolitos se utiliza la membrana aniónica, lo cual da lugar a un sistema más compacto, ya que las membranas del sistema alcalino son relativamente gruesas y suponen una elevada resistencia óhmica. Sustituyendo el electrolito líquido por la membrana se evita en parte el problema del efecto burbuja.

La electrolisis AEM toma los principios de la electrolisis alcalina y la electrolisis PEM y los combina, dando lugar a una nueva variante que combina las ventajas de cada una de las anteriores

1.3.3.1. Esquema

El funcionamiento es similar al anterior sistema de membranas (PEM), solo varía el ión en el que se centra el proceso, en este caso el anión.

Figura I- 8: Membrana de intercambio aniónico



Fuente: (Vincent, Kruger and Bessarabov, 2017)

El agua entra a través del ánodo, llega al cátodo, se reduce y forma hidrógeno e iones hidroxilo gracias al aporte de electrones Figura I- 15. La atracción positiva del ánodo hace que los iones hidroxilo difundan a través de la membrana hasta la semicelda anódica. Un circuito externo transporta los electrones desde el cátodo hasta el ánodo. La reacción anódica consiste en la recombinación de iones hidroxilo para formar agua y oxígeno.

1.3.3.2. Componentes

Debido a que es una tecnología en desarrollo, todavía no se encuentran demasiados estudios publicados sobre la electrolisis AEM, si lo comparamos con la electrolisis alcalina o PEM. En el artículo publicado por (Vincent, Kruger and Bessarabov, 2017) utilizan componentes del fabricante ACTA; acta 3030 para el ánodo (CuCoOx) y acta 4030 ($\text{Ni/CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{/C}$) para el cátodo. En el sistema también aparecen electrodos para la difusión de gases, espuma de níquel en el ánodo y papel de carbón en el cátodo. Como soporte tenemos titanio en la semicelda anódica y grafito en la catódica, que actúan para canalizar el flujo.

La membrana comercial más usada es la conocida como A-201 de Tokuyama Corporation.

1.3.3.3. Materias primas

Al contrario que en la electrolisis alcalina, no es necesaria una concentración elevada de KOH, por ello, como electrolito se ha utilizado una disolución al 1% de K_2CO_3 , con la que se obtiene la electrolisis óptima (Vincent, Kruger and Bessarabov, 2017).

1.3.3.4. Voltaje de celda

El voltaje típico es de 1.9 V para una intensidad de corriente de 400 mA/cm² a una temperatura de 40°C (Vincent, Kruger and Bessarabov, 2017).

1.3.4. Óxido sólido (SOWE)

La electrolisis SOWE (Solid Oxide Water Electrolysis) tiene una diferencia principal con respecto a la alcalina y a las electrolisis basadas en membranas (PEM y AEM), y

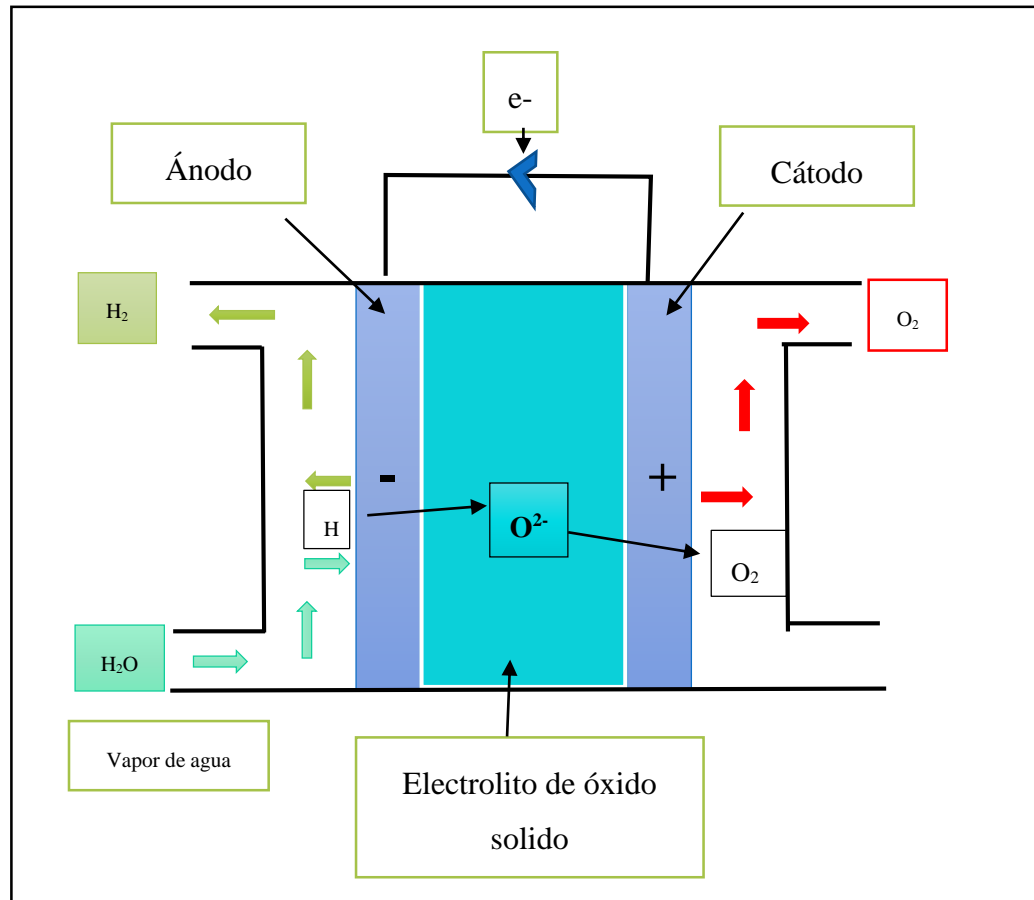
es la temperatura de operación, que se sitúa en un rango de 800-1000°C. Esta elevada temperatura hace que las eficiencias sean mayores que las que proporcionan electrolizadores alcalinos o PEM.

A esta temperatura, la alimentación al electrolizador se realiza en estado gaseoso, es decir, con vapor de agua. A priori, puede parecer que este tipo de electrolisis es inviable debido al aporte de energía necesario para llevar el agua hasta una temperatura de casi 1000 °C, aunque si nos fijamos en la [Figura I- 6] vemos que el aumento de la demanda térmica es del orden de la disminución de la demanda eléctrica que supone la separación de la molécula de agua. Esto da como resultado una reducción de la demanda total de energía, teniendo en cuenta la discontinuidad de las ecuaciones térmica ($T \cdot \Delta S$) y eléctrica (ΔG) en el punto de cambio de estado.

1.3.4.1. Esquema

En este caso, el agua es introducida en el sistema en forma de vapor y a alta temperatura. Al entrar en contacto con el cátodo se reduce dando lugar a hidrógeno gaseoso y aniones de oxígeno Figura I- 9. En este momento entran en juego los óxidos sólidos que actúan como electrolito y como separador de semiceldas, además, son conductores de iones. Los iones de oxígeno migran al ánodo, en el cual se produce la reacción de formación de oxígeno gas. En la reacción anódica se obtienen también electrones que formarán parte de un circuito externo. Este circuito permite aprovechar los electrones producidos en la reacción anódica como reductores en la reacción catódica.

Figura I- 9: Electrolisis SOWE



Fuente: (Vincent, Kruger and Bessarabov, 2017)

1.3.4.2. Componentes

Actualmente, el sistema de óxidos sólidos utiliza como electrolito zirconio ZrO_2 estabilizada con ytrio y óxidos de escandio (Bi, Boulfrad and Traversa, 2014). Este material muestra una buena conductividad iónica cuando se encuentra sometido a altas temperaturas

Los principales componentes son las placas bipolares de acero inoxidable y la manganita recubierta del electrolito de zirconio. El hecho de trabajar a elevadas temperaturas hace que no sea necesario el uso de electro catalizadores, los cuales en el caso de operar a bajas temperaturas son imprescindibles. Existe por lo tanto la posibilidad de utilizar electrodos que no utilicen platino, aunque actualmente se siguen

usando para asegurar un buen contacto eléctrico entre celdas. En el cátodo se utiliza un cermet (aleación de metal y cerámico) que contiene níquel y circonio. Para el ánodo se utiliza platino dopado con manganita de lantano (Millet and Grigoriev, 2013).

1.3.4.3. Materias primas

Este sistema no requiere que el agua tenga una gran pureza, aunque se ha demostrado que las impurezas en el vapor de alimentación tienen una gran influencia en la velocidad de degradación.

1.3.4.4. Voltaje de celda

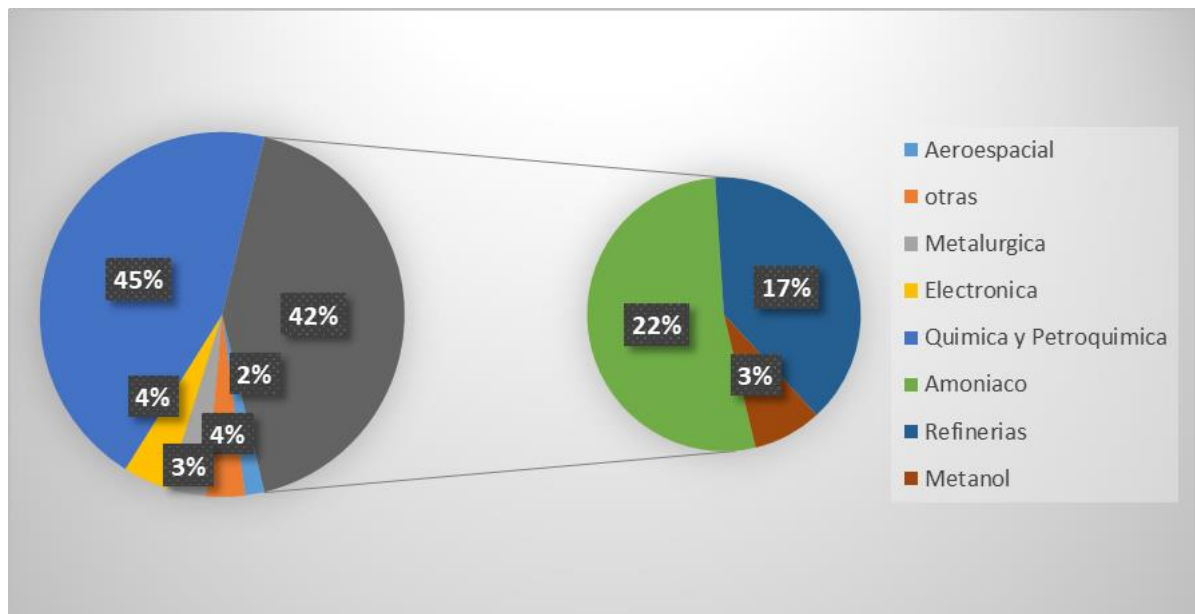
Se ha demostrado la posibilidad de operar con elevadas densidad de corriente obteniendo eficiencias cercanas al 100% (3,6 A/cm², 1,48 V y 950°C) A unas temperaturas situadas entre 900 y 1000 °C el voltaje es inferior a 1V, un valor por debajo de los que aparecen en los otros tipos de electrolisis (Millet and Grigoriev, 2013).

1.4. El Hidrogeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo, constituye las tres cuartas partes de toda la masa del Universo y el 90% en número de átomos.

La presencia de hidrógeno gaseoso en la atmósfera terrestre es escasa debido a su alta difusividad mientras que es abundante en la corteza aunque generalmente enlazado al carbono (formando, p. ej., hidrocarburos como el metano CH₄), al oxígeno (en el agua H₂O) o a ambos (carbohidratos)

Figura I- 10: Usos actuales del hidrógeno.



Fuente: Linares, 2007.

El hidrógeno ha sido y es la principal materia prima de numerosos procesos productivos. Puesto que el hidrógeno no se encuentra disponible como tal en la naturaleza, se obtiene industrialmente y esta producción ha sido considerada como tecnología común en el último siglo. No obstante, el 95% de esta producción es «cautiva», es decir, se produce para consumo propio de las industrias que lo demandan.

1.5. Propiedades del hidrógeno

A continuación se exponen las principales propiedades del hidrógeno agrupadas según el aspecto relativo a la producción o uso del hidrógeno sobre el que presentan cierta influencia.

En primer lugar, se abordan las propiedades relacionadas con la estructura atómica del hidrógeno que, entre otros aspectos, explican por qué el hidrógeno no existe en la naturaleza en forma libre. En otro grupo se encuentra un conjunto de propiedades de tipo físico estrechamente relacionadas con las posibilidades para el almacenamiento del hidrógeno. El contenido energético es la característica más interesante desde el punto de vista de su uso energético aunque, como se verá, no puede considerarse

separadamente de otras propiedades como, por ejemplo, la densidad. Finalmente, se presenta un grupo de parámetros relacionados con la problemática de seguridad en la manipulación.

1.5.1. Propiedades químicas

Tabla I- 2: Propiedades químicas

<i>Símbolo químico</i>	H
<i>Z</i>	1
<i>Peso atómico</i>	1,0079 kg/kmol
<i>Peso molecular</i>	2,0159 kg/kmol

Fuente: Linares, 2007.

El hidrógeno (H) es el elemento más simple y ocupa la primera posición en la tabla periódica.

Un átomo de hidrógeno consta de un protón en su núcleo, cuya carga está equilibrada por un electrón que se mueve en una órbita alrededor de dicho núcleo. El radio de la órbita del electrón, que define el tamaño del átomo, es aproximadamente 100 000 veces el radio del núcleo.

El hidrógeno tiene un número atómico de 1, un estado de oxidación c1, perteneciendo al grupo 1 (o IA) del sistema periódico y posee un peso atómico de 1,00794 uma² superior a 1 por la coexistencia de varios isótopos.

Desde un punto de vista químico, la disposición de un único electrón orbitando alrededor de un núcleo hace que el elemento sea muy reactivo. Por eso los átomos de H se encuentran combinados en pares formando la molécula de H₂.

Esta molécula es la más ligera y la más pequeña que existe en la naturaleza y se puede difundir a través de muchos materiales considerados herméticos o impermeables a otros gases. No obstante, en caso de fuga, el hidrógeno se dispersaría rápidamente.

El hidrógeno no es tóxico ni contaminante pero es altamente reactivo por lo que su manipulación requiere de cuidados especiales para evitar accidentes. Los escapes de hidrógeno suponen un elevado riesgo de incendio, cuando se mezclan con aire. Puesto que el hidrógeno es incoloro, inodoro y su llama en el aire es casi invisible, se necesita detectar con sensores específicos.

1.5.2. Propiedades físicas

1.5.2.1. Densidad y medidas relacionadas

Dado que el hidrógeno es el elemento químico con menor peso atómico, su densidad es muy baja tanto en estado líquido como en estado gaseoso.

Los datos de densidad solo tienen significado a una determinada temperatura y presión, dado que ambos parámetros afectan la compactación de una disposición molecular, especialmente en un gas

Tabla I- 3: Valores de densidad del hidrógeno

<i>Densidad líquido (a la temperatura de ebullición)</i>	70,8 kg/m ³
<i>Densidad gas (en CN)*</i>	0,0899 kg/m ³
<i>Peso específico del gas (aire/1)</i>	0,0696
<i>Peso específico del líquido (agua/1)</i>	0,0708

Fuente: Linares, 2007.

El peso específico, una forma muy habitual de expresar la densidad, es la relación entre la densidad de una sustancia y la de una sustancia de referencia a la misma temperatura y presión.

En el caso de gases y vapores, se utiliza el aire (que tiene una densidad de 1,203 kg/m³) como sustancia de referencia de forma que los gases con un peso específico inferior a 1,0 son más ligeros que el aire mientras que los gases con un peso específico superior a 1,0 son más pesados que el aire. El hidrógeno gaseoso tiene un peso específico de

0,0696, es decir, su densidad es aproximadamente el 7% de la densidad del aire, lo que lo hace muy ligero.

1.5.2.2. Temperaturas de cambio de fase

La mayoría de las sustancias pueden cambiar de un estado de agregación a otro en función de la temperatura y la presión de sus alrededores. Así cada sustancia presenta unas temperaturas de ebullición y fusión características a una determinada presión.

Los puntos de ebullición y de fusión del hidrógeno son los más bajos de todas las sustancias, a excepción del helio.

Tabla I- 4: Temperaturas de cambio de fase del hidrógeno.

<i>Temperatura de fusión</i>	259,20 °C
<i>Temperatura de ebullición</i>	252,77 °C
<i>Temperatura crítica</i>	239,96 °C

Fuente: Linares, 2007.

1.5.3. Contenido energético

Cuando un combustible reacciona con el oxígeno se libera una cantidad fija de energía y se forma agua.

Esta energía liberada se mide experimentalmente y se cuantifica como poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI). Ambos denotan la cantidad de energía (J en el S.I.) contenida en un peso determinado de combustible (kg en el S.I.).

La diferencia entre el PCS y el PCI es el calor de vaporización del agua y representa la cantidad de energía necesaria para vaporizar un combustible líquido en un combustible gaseoso así como la energía utilizada para convertir el agua en vapor. Los combustibles gaseosos no consumen energía para su vaporización.

Debido a que el agua que se produce como resultado de un proceso de combustión o en una reacción electroquímica dentro de una pila de combustible se encuentra en

forma de vapor, el poder calorífico inferior representa la cantidad de energía disponible para hacer trabajo externo.

La Tabla I- 5 recoge el PCS y el PCI de varios combustibles. A los niveles de presión y temperatura considerados, el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso:

Tabla I- 5: Contenido energético de diferentes combustibles (a 25 °C y 1 atm).

<i>Combustible</i>	<i>PCS (Poder calorífico superior)</i>	<i>PCI (Poder calorífico inferior)</i>
Hidrógeno	141,86 MJ/kg	119,93 MJ/kg
Metano	55,53 MJ/kg	50,02 MJ/kg
Propano	50,36 MJ/kg	45,6 MJ/kg
Gasolina	47,5 MJ/kg	44,5 MJ/kg
Diésel	44,8 MJ/kg	42,5 MJ/kg
Metanol	19,96 MJ/kg	18,05 MJ/kg

Fuente: Linares, 2007.

El hidrógeno gaseoso es el combustible con el mayor contenido de energía por unidad de masa. A partir de los datos de la Tabla I- 5 puede verse que el hidrógeno tiene casi tres veces el contenido de energía de la gasolina.

Una comparativa del PCI del hidrógeno frente a otros combustibles observándose que la cantidad de energía liberada durante la reacción de hidrógeno, en base másica, es aproximadamente 2,5 veces el calor de combustión de los hidrocarburos (gasolina, diésel, metano, propano, etc.) y 10 veces el del metanol. Por lo tanto, para una determinada carga, la masa de hidrógeno necesaria es solo aproximadamente un tercio de la masa de un hidrocarburo.

Por esta razón, el hidrógeno se ha utilizado ampliamente como combustible en los programas espaciales donde el peso es crucial.

1.5.4. Propiedades relacionadas con la seguridad

Para que se produzca un incendio o explosión, se necesita la presencia de una mezcla en cantidades adecuadas de combustible y oxígeno y una fuente de ignición.

El hidrógeno es un combustible inflamable, que se puede mezclar con oxígeno en cualquier momento que haya aire dispuesto a entrar en un contenedor de hidrógeno o una fuga de hidrógeno. La fuente de ignición puede ser una chispa, una llama o una fuente de calor a alta temperatura.

Tabla I- 6: Propiedades del hidrógeno relacionadas con los riesgos de explosión e incendio.

<i>Constante de difusión</i>	0,61 (cm ² /s)
<i>Velocidad de difusión en el aire a CN</i>	2 cm/s
<i>Punto de inflamación o flash-point</i>	< 253 °C
<i>Rango de inflamabilidad</i>	4-75 (vol. %)
<i>Límites de detonabilidad en el aire</i>	15-59 (vol. %)
<i>Temperatura de autoignición</i>	585 °C
<i>Energía de ignición</i>	0,02 MJ
<i>Temperatura llama</i>	2 045 °C
<i>Energía de explosión</i>	2 kg TNT/m ³
<i>Emisividad de la llama</i>	1,53x10 ² kJ/cm ² • s

Fuente: Linares, 2007.

1.5.4.1. Punto de inflamación o flash-point

Todos los combustibles se queman en estado gaseoso o vapor. El punto de inflamación o flash-point se define como la temperatura mínima a la cual un líquido inflamable desprende suficiente vapor para formar una mezcla inflamable con el aire disponible en su entorno.

Si el combustible está a una temperatura inferior a su flash-point, no se produce el suficiente vapor porque su velocidad de evaporación es demasiado lenta pero si se encuentra por encima de su flash-point hay vapor, y en contacto con una fuente de ignición se producirá la explosión.

Tabla I- 7: Punto de inflamación o flash-point de diferentes combustibles.

<i>Combustible</i>	<i>Flash-point (°C)</i>
Hidrógeno	< 253 °C
Metano	188 °C
Propano	104 °C
Gasolina	aprox. 43 °C
Metanol	11 °C

Fuente: Linares, 2007.

1.5.4.2. Rango de inflamabilidad

El potencial de inflamabilidad de un gas se define en términos de sus límites inferior y superior de inflamabilidad:

- El límite inferior de inflamabilidad es la concentración mínima de vapor o gas en mezcla con el aire, por debajo de la cual no existe propagación de la llama al ponerse en contacto con una fuente de ignición.

- El límite superior de inflamabilidad es la concentración máxima de vapor o gas en aire, por encima de la cual no tiene lugar la propagación de la llama, al entrar en contacto con una fuente de ignición.

Entre los dos límites se encuentra el rango en el que el gas y aire se encuentran en las proporciones adecuadas para arder.

Una mezcla estequiometria se produce cuando las moléculas de oxígeno e hidrógeno están presentes en la relación exacta necesaria para completar la reacción de combustión. Si hay más hidrógeno que oxígeno, la mezcla será rica y se consumirá todo el oxígeno. Si hay menos hidrógeno que oxígeno disponible, la mezcla será pobre por lo que todo el combustible se consumirá quedando un remanente de oxígeno. Los sistemas de combustión interna y los sistemas de pila de combustible operan normalmente con mezclas pobres lo que garantiza una reacción completa del combustible.

Una consecuencia del límite superior de inflamabilidad es que el hidrógeno (líquido o gaseoso) no es inflamable si se encuentra almacenado en ausencia de oxígeno en los contenedores cilíndricos. El combustible solo se convierte en inflamable en las zonas periféricas de un escape donde el combustible se mezcla con el aire en proporciones suficientes.

1.5.4.3. Temperatura de autoignición

La temperatura de autoignición es la temperatura mínima, a presión de 1 atm, a la que una sustancia en contacto con el aire arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de ignición.

Cada combustible tiene una temperatura de autoignición única. La temperatura de autoignición del hidrógeno es de 585 °C, un valor alto que hace que sea difícil encender una mezcla de hidrógeno-aire solo mediante calentamiento y sin una fuente de ignición adicional.

Tabla I- 8: Temperatura de autoignición de diferentes combustibles.

<i>Combustible</i>	<i>Temperatura de autoignición (°C)</i>
Hidrógeno	585 °C
Metano	540 °C
Propano	490 °C
Gasolina	385 °C
Metanol	230 a 480 °C

Fuente: Linares, 2007.

1.5.4.4. Energía de ignición

La energía de ignición es la cantidad de energía externa que debe aplicarse para encender una mezcla de combustible. La energía de una fuente externa debe ser mayor que la energía de ignición y ser de suficiente duración para calentar el vapor de combustible hasta su temperatura de ignición. Las fuentes de ignición más comunes son las llamas y las chispas.

Aunque el hidrógeno tiene una temperatura de autoignición mayor que la del metano, el propano y la gasolina, su energía de ignición (0,02 mJ) es un orden de magnitud menor y, por lo tanto, es incluso más fácil de encender. Incluso una chispa invisible o una pequeña descarga de electricidad estática de un cuerpo humano pueden tener la suficiente energía para causar la ignición.

El hidrógeno tiene una propiedad añadida como es su baja conductividad eléctrica que ocasiona que el flujo o la agitación del hidrógeno gas o líquido puedan generar cargas electrostáticas que produzcan chispas. Por esta razón, cualquier equipo de almacenamiento de hidrógeno debe ser convenientemente puesto a tierra.

1.5.4.5.Toxicidad

El hidrógeno puro es inodoro, incoloro e insípido por lo que una fuga de hidrógeno es casi imperceptible a la luz del día.

En el caso del gas natural se añaden compuestos como odorizantes (por ejemplo, mercaptanos) pero esta opción no es adecuada para el hidrógeno para usos energéticos debido a que el azufre podría envenenar las pilas de combustible.

Aunque el hidrógeno no es tóxico puede actuar como asfixiante desplazando el oxígeno en el aire.

El aire que respiramos contiene aproximadamente un 21% en volumen de oxígeno. Si la presencia de oxígeno alcanza niveles por debajo del 19,5%, se produce cierta inactividad biológica en los humanos que tiene como principales efectos la respiración rápida, la disminución del estado de alerta, problemas de coordinación muscular, habla defectuosa, depresión de sensaciones, inestabilidad emocional y fatiga. Si la asfixia progresa puede provocar mareos, náuseas, vómitos, postración y pérdida del conocimiento y finalmente convulsiones, coma y la muerte. Una concentración de oxígeno inferior al 12% provoca la pérdida inmediata del conocimiento sin ningún síntoma de aviso.

Por esta razón si en un lugar cerrado se produce una fuga de hidrógeno se pueden producir graves problemas debido a que el hidrógeno se difunde rápidamente desplazando el volumen que ocupa el oxígeno del aire.

El potencial de asfixia en zonas abiertas es casi insignificante debido a la misma elevada difusividad del hidrógeno. Inhalar hidrógeno puede generar una mezcla inflamable en el interior de nuestro cuerpo. También puede provocar inconsciencia y asfixia.

Es necesario entonces extremar las medidas de seguridad e instrumentalizar la ventilación de los espacios en los que se almacena o manipula hidrógeno.

1.6. Medidas de seguridad y almacenaje para el hidrógeno

1.6.1. Medidas de seguridad para su manipulación

Para la manipulación segura del hidrógeno, es importante conocer sus propiedades y las medidas de seguridad necesarias. En este consejo de seguridad se describen las propiedades más relevantes para su seguridad, y proporciona consejos prácticos para trabajar con seguridad con este gas. Es un complemento, y no reemplaza, la normativa nacional o internacional (Linde, 2012).

1.6.1.1. Propiedades físicas

El hidrógeno es el más ligero de los gases (la densidad es de 84 g/m^3 a una temperatura de 15°C y una presión de 1bar). Es por eso que el hidrógeno al escaparse inmediatamente se elevará hacia arriba y se acumulan en los techos o zonas similares. El hidrógeno se almacena en forma de gas en cilindros o tanques a temperatura ambiente a alta presión (hasta 300 bares), o se almacena o se transporta casi sin presión en forma de hidrógeno criogénico líquido en recipientes aislados. El hidrógeno tiene un rango de inflamabilidad muy amplio (entre el 4% y el 74% de concentración en el aire) y requiere muy poca energía (0.02 mJ) para iniciar la combustión.

La liberación de la presión de hidrógeno a temperatura normal tiene como resultado a diferencia de otros gases en un ligero aumento de la temperatura. La temperatura se eleva desde 20 hasta 25°C cuando la presión cae desde 175 hasta 1 bar. Este aumento de la temperatura no es suficiente para hacer que el hidrógeno escapado se encienda por sí mismo, ya que la temperatura de ignición se encuentra a 600°C (Linde, 2012).

El hidrógeno líquido (LH_2) es un líquido muy ligero (densidad de 70 g / litro a una temperatura de 253°C). LH_2 se evapora muy rápidamente a temperatura normal, con la creación de unos 845 litros de hidrógeno gaseoso por cada 1 litro LH_2 . Inmediatamente después de la evaporación del hidrógeno gaseoso es todavía muy frío y tiene aproximadamente el mismo peso que el aire. Esa es la razón por la que se extiende casi horizontalmente. Sin embargo, se calienta muy rápido. Su densidad es continuamente reducida y tiende a extenderse hacia arriba. A la temperatura del

hidrógeno líquido todos los líquidos y gases a excepción de helio son sólidos. Es por eso que todas las demás sustancias tienen que ser mantenidas lejos de las instalaciones del LH₂. Una mezcla de aire sólido y LH₂ tiene características explosivas. La baja temperatura del hidrógeno líquido hace que el aire atmosférico condense en el exterior de las piezas de la instalación que no hayan sido aisladas. A través de la evaporación parcial del nitrógeno del aire líquido, podría llegar a ser enriquecido con oxígeno y al entrar en contacto con sustancias combustibles, actuar como un agente inflamable (Linde, 2012).

1.6.1.2. Propiedades químicas:

El hidrógeno cuando se combina con el aire o el oxígeno y se enciende puede quemarse y convertirse en agua. El hidrógeno también puede reaccionar con otros agentes oxidantes, por ejemplo, cloro o gas de la risa. Cuando el hidrógeno se combina con un agente oxidante y luego se enciende, el proceso de combustión puede ser explosivo. Si este proceso se lleva a cabo en una sala cerrada, con un aumento rápido de presión, puede ser muy destructivo, y tiene lugar a causa del calor generado (Linde, 2012).

Los niveles de concentración en el que el hidrógeno puede reaccionar con el aire a presión normal y temperatura normales, en comparación con otros gases combustibles, es muy amplia (el límite inferior de explosividad (LEL) es del 4 % vol, siendo el límite superior de explosividad (UEL) del 75,6 % vol). Las mezclas de Hidrógeno / aire se encienden a través de las fuentes de ignición que contienen muy baja la energía. La menor cantidad de energía necesaria para encender el hidrógeno es 0.019 mJ que sólo es 1/10 de la de gas propano. Por ejemplo, partículas de herrumbre, que han sido transportados por una corriente rápida de hidrógeno puede desarrollar la chispa de encendido a través de la carga electrostática o por golpear un objeto. Debido a que es difícil de demostrar que la explicación anterior es la causante de la ignición, se cree injustamente que el hidrógeno es capaz de autoencenderse. Una llama de hidrógeno es muy clara y no se puede ver la luz del día. Otras indicaciones deben ser utilizadas, por ejemplo, un trozo de papel en el área afectada. Por supuesto, el hidrógeno líquido tiene las mismas propiedades químicas como el hidrógeno gaseoso. Sin embargo, la

capacidad de reaccionar con el oxígeno se reduce un poco debido a las bajas temperaturas (Linde, 2012).

1.6.1.3.Efectos fisiológicos / Protección medioambiental:

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido y por lo tanto no puede ser percibido con los sentidos humanos. El hidrógeno no es tóxico. Cuando es inhalado en grandes concentraciones causará la asfixia. No se debe permitir la presencia en ese ambiente, debido al peligro de explosión. Por esta razón la protección respiratoria no es relevante cuando se trabaja con el hidrógeno. Hidrógeno criogénico en forma líquida o gaseosas (evaporado) puede causar quemaduras criogénicas al entrar en contacto con la piel. Lo mismo ocurre cuando la piel entra en contacto con cualquier tubería sin aislar o equipos que contengan hidrógeno líquido (Linde, 2012).

El hidrógeno no impone un peligro para el medio ambiente. No daña la capa de ozono y no contribuye al efecto invernadero. El escape de la combustión gas de hidrógeno es agua y no dióxido de carbono u hollín (Linde, 2012).

1.6.1.4.Características de las mezclas de gas que contengan hidrógeno:

Las mezclas de gases no se separan bajo la influencia de la gravedad. Cuando, por ejemplo, una mezcla de hidrógeno / argón se escapa en una sala, el hidrógeno no se acumula en el techo y el argón no se acumula en el suelo. La mezcla se mueve hacia arriba en su conjunto, cuando es más ligero que el aire, y hacia abajo cuando es más pesado que el aire. Al hacer esto se mezcla continuamente en el aire. Las mezclas de hidrógeno con helio o nitrógeno son siempre más ligeras que el aire. Las mezclas de Hidrógeno / argón de hasta el 71% vol de argón. son más ligeras que el aire y con un contenido más alto de argón más pesado que el aire. Las mezclas de Hidrógeno / gas inerte son mezclas combustibles cuando su contenido de hidrógeno está por encima de ciertos niveles. Los valores correspondientes se han estandarizado en la norma ISO 10156. Se especifica que las mezclas de hidrógeno / nitrógeno con más de 5,7 vol. % H_2 y las de hidrógeno / helio y de hidrógeno / argón con más de 2,9 vol.% H_2 son combustibles. Los valores indicados son valores teóricos y están, en el criterio seguro

“y se utiliza para clasificar una mezcla de gas de acuerdo con la normativa. Los valores de umbral actual de combustibilidad, que han sido identificados en los experimentos para un contenido de hidrógeno es algo mayor en las mezclas de hidrógeno / gas inerte (Linde, 2012).

1.6.1.5. Evitar atmósferas explosivas en las salas y al aire libre:

Es posible evitar la acumulación de una atmósfera explosiva en las zonas aledañas instalaciones de hidrógeno por:

- La construcción de plantas de hidrógeno con áreas bien ventiladas,
- Asegurándose de que las plantas de hidrógeno se encuentran a prueba de fugas y permanecen de esa manera.

Las instalaciones de hidrógeno se tratarán de ser instaladas en el exterior, para que el escape de hidrógeno puede escapar a la atmósfera sin peligro. Si esto no es posible, por lo menos el recipiente de almacenamiento de hidrógeno debe estar instalado fuera. Las líneas de escape de las válvulas de seguridad o bombas de vacío, deben dar al exterior. Las aberturas de escape no se encontrarán bajo salientes, en las aberturas de los edificios o en las proximidades de un área de admisión de aire. Las aberturas de escape deben estar claramente marcadas para que en caso de trabajos en caliente en los alrededores, todo el mundo sea consciente de las precauciones necesarias que deben tomar. Las líneas de suministro de hidrógeno deben tener una válvula de cierre al entrar en un área bajo techo. El hidrógeno en el interior de instalaciones no usará bridas ciegas o conexiones roscadas, con el fin de evitar la fuga de gas en la sala. Las salas con instalaciones de hidrógeno tendrán una efectiva ventilación natural o forzada. El contenido de hidrógeno en la sala puede ser controlado a través de un sistema de alerta (explosímetro). Se debe prestar especial atención a las salas muy pequeñas, como por ejemplo habitáculos de instalaciones de mezclas de gas o aparatos de medición de hidrógeno. Las partes en este tipo de habitáculos que contienen hidrógeno tienen que ser definitivamente a prueba de fugas, por ejemplo, mediante el uso de conexiones permanentes de la tubería. El habitáculo debe estar equipado con aberturas de ventilación para que el hidrógeno pueda escapar. Las conexiones de las tuberías en las

instalaciones de hidrógeno, siempre que sea posible, estarán de forma permanente soldadas, porque esto asegura estanqueidad de larga duración. Esta recomendación es especialmente seguro para las tuberías de hidrógeno instaladas bajo la tierra o en zonas no accesibles, como por ejemplo en un canal. Cuando los tubos que pueden ser separados están conectados con accesorios roscados o bridas, se utilizará equipos a prueba de fugas. En conexiones de las tuberías que están roscadas, se deben usar accesorios de compresión. Comprobación de fugas en las instalaciones de hidrógeno primero se debe hacer con un gas no inflamable, como el nitrógeno o el helio. Sólo después de que las fugas evidentes han sido reparadas, una segunda prueba de fugas se debe hacer con el uso de hidrógeno a una presión de trabajo. Una instalación de hidrógeno con las fugas se sabe que no es segura. La instalación tiene que ser despresurizada, purgada y reparada (Linde, 2012).

1.6.1.6. Evitar la ignición causada por fuentes de ignición en las salas y el exterior:

La planta de hidrógeno y la instalación incluyendo los alrededores se clasificarán para el riesgo de atmósferas explosivas, consulte la norma DIN EN 1127-1, DIN EN 60079-10 u otras regulaciones relevantes. La clasificación sirve de orientación sobre las precauciones necesarias para evitar la ignición. Sin embargo, el consejo general debe considerar lo siguiente:

- i. Los equipos eléctricos no se utilizarán o bien serán instalados si no se dispone de su clasificación de uso para atmósferas explosivas.
- ii. Trabajar con fuego (soldadura, corte, soldering, molienda) sólo está permitida si el área de trabajo está libre de hidrógeno. Esto debe ser verificado con un explosímetro, en ningún caso con una llama abierta. Al realizar el trabajo con el fuego es importante tener en cuenta, que la soldadura y las chispas pueden volar hasta a 10 m del lugar de origen.
- iii. Los trabajos de ensamblaje no están permitidos cuando el hidrógeno se está fugando, porque incluso cuando se utilizan herramientas libres de chispa, todavía hay un riesgo de ignición (Linde, 2012).

1.6.1.7. Prevenir las mezclas explosivas en instalaciones de hidrógeno:

No es aceptable tener una mezcla explosiva en una instalación de hidrógeno. Estas mezclas son fácilmente inflamables, por ejemplo, mediante calor de fricción al operar una válvula o por medio de partículas de óxido que han sido transportadas. Incluso el calentamiento del gas que ha sido causado por el choque de presión de flujo rápido de hidrógeno, dentro de una sección llena de aire de la instalación puede causar una ignición (Linde, 2012).

El aire y el oxígeno tienen que mantenerse lejos de instalaciones de hidrógeno. Esto es posible si la instalación no tiene relación con aire o el oxígeno que contienen los sistemas. Si las conexiones existen, por ejemplo, en equipos de soldadura que funcionan con hidrógeno y oxígeno, tienen que ser instaladas válvulas de retención para asegurarse que no es posible para uno de los gases de entrar en la línea del otro. Los compresores de hidrógeno deben estar equipados con alarma de baja presión de succión y alarma de oxígeno, para asegurar que no se puede crear una mezcla explosiva de hidrógeno / oxígeno (Linde, 2012).

Si el hidrógeno se combina con el aire o el oxígeno para un proceso técnico especial, sólo se hará bajo los requisitos previos supervisados muy de cerca manteniendo la correcta concentración y la presión máxima admisible y la ausencia de fuentes de chispa. Antes de poner en funcionamiento las instalaciones de hidrógeno, el aire tiene que ser eliminado, por ejemplo, mediante el bombeo de vacío o purga. El método más seguro es purgando con nitrógeno, si el contenido de oxígeno en la instalación es del 1% vol. Si es una mezcla combustible de argón / hidrógeno o mezclas de gases (nitrógeno / hidrógeno) que se utilizan para la soldadura de los envases, el aire también tiene que ser eliminado a través de la purga con el fin de evitar una explosión en el contenedor. También cuando se cierre, la instalación de hidrógeno tiene que ser purgada de hidrógeno a través de bombeo de vacío o purga. El contenido de hidrógeno tiene que ser reducido al 1 % vol. antes que la instalación se abra. Si cuando cierre la instalación, partes de ésta siguen estando bajo presión, el hidrógeno tiene que ser cuidadosamente retirado de la parte que se encuentra bajo presión, por ejemplo, a través

de un doble bloqueo con una válvula de purga, desconexión, etc. En todos los procesos de depuración, es importante recordar, que la purga de gas seguirá el camino de menos resistencia. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a las vías muertas. Puede ser necesario ver si todas las válvulas han asumido el control de posición necesario. (Válvulas que parecen estar abiertas no siempre permiten el paso y válvulas que se cierran no siempre son a prueba de fugas.) (Linde, 2012).

1.6.2. Medidas de seguridad para su almacenamiento

1.6.2.1. Corrosión, materiales:

El hidrógeno no es corrosivo. A la temperatura normal los habituales materiales metálicos acero, cobre, latón, aluminio - son adecuados para el hidrógeno. Algunos tipos de acero pueden ser dañados por el hidrógeno bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, cuando los defectos de producción (agrietamientos, incrustaciones) están presentes. Es por eso que los materiales utilizados en las instalaciones de hidrógeno tienen que ser elegidos por los expertos, que están familiarizados con el funcionamiento en condiciones específicas. Aparte de los materiales metálicos, el caucho y el plástico también se puede utilizar para instalaciones de hidrógeno. El hidrógeno es un gas muy “flexible”. Las moléculas pequeñas pueden encontrar su camino en los materiales o ajustadas fisuras, que podrían ser impermeables para otros gases. Los materiales de fundición no deben utilizarse para el hidrógeno, debido a su porosidad podría ser la causa de las fugas (Linde, 2012).

Debido a su baja temperatura, el hidrógeno líquido puede causar la fragilidad de caucho, plástico y acero al carbono. Debido a esto la ductilidad de estos materiales pueden ser extremadamente reducidas. Es por eso que estos materiales no son adecuados para su uso en instalaciones de LH₂ (Linde, 2012).

1.6.2.2. Fuga de hidrógeno o un incendio de hidrógeno:

Si el hidrógeno se está escapando sin intención, el suministro de gas tiene que ser cortado por el cierre de los controles necesarios. No debe ser intentado reparar la fuga mientras que el hidrógeno se escapa, por el peligro de una ignición. Si una gran

cantidad de hidrógeno ha fugado a la atmósfera, existe un grave peligro de una explosión. El personal tiene que salir de la sala, que luego tiene que estar muy bien ventilada. Con el fin de probar la efectividad de la ventilación, un chequeo de medición debe llevarse a cabo. Si el escape de hidrógeno se ha prendido fuego, puede ser extinguido por el cierre de las líneas de suministro de hidrógeno. Si esto no funciona, no intente apagar el fuego en las salas con los agentes de extinción debido a que el flujo continuo de hidrógeno presenta un riesgo de explosión. En tal caso, uno tiene que dejar que el fuego se consuma hasta que el hidrógeno se quemara y el fuego se apague por su cuenta. Puede que sea necesario refrigerar las áreas con agua fresca que podría estar en peligro por el fuego (ejemplo, los cilindros de gas). Cuando el proceso de combustión está casi terminado, la instalación afectada se debe purgar con nitrógeno para asegurar que no hay retroceso en el interior (Linde, 2012).

1.6.2.3. Manipulación segura de cilindros de hidrógeno:

Regulaciones nacionales contienen diversos requisitos en la manipulación de cilindros de gas. También se debe tener en cuenta la manipulación de cilindros y bloques de hidrógeno: las válvulas de los cilindros y bloques sólo se abren cuando el reductor de presión, con juntas en buen estado, han sido cuidadosamente conectados. Los puntos de conexión deben ser evaluados para verificar que no haya fugas. Las válvulas del cilindro y el bloque se cierran cuando no estén en uso con el fin de evitar la fuga de gas en las conexiones. Si la válvula del cilindro o bloque tiene una fuga o cuando el escape de hidrógeno no se puede detener mediante el cierre de la válvula, el contenedor de hidrógeno tiene que ser transportado fuera y dejarlo que se vacíe. Las reparaciones de cilindros de hidrógeno o bloques, así como las válvulas, sólo pueden ser llevadas a cabo por el proveedor de gas (Linde, 2012).

1.6.2.4. Evitar el abuso:

El hidrógeno no se debe utilizar para el llenado de globos de juguete, debido al peligro de una explosión. El hidrógeno no debe ser utilizado como energía para los sistemas neumáticos, por ejemplo, de pintura en aerosol o por procesos similares. El hidrógeno

no debe inhalarse intencionalmente en grandes dosis. El efecto sofocante puede comenzar después de la inhalación de una respiración profunda (Linde, 2012).

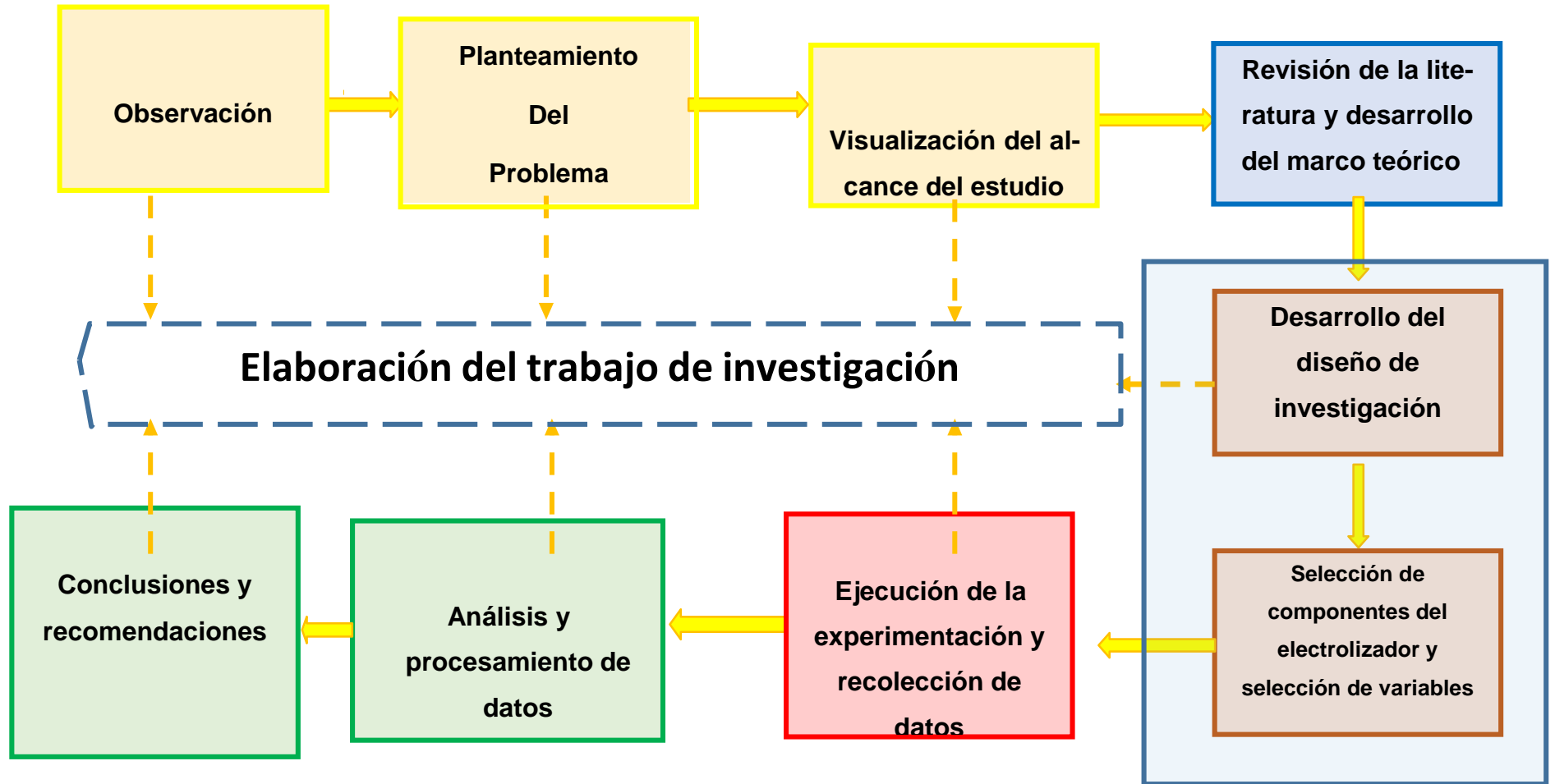
CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Método de investigación y tipo de estudio

El presente proyecto usara la metodología cuantitativa, donde a través de la parte experimental realizaremos una serie de combinaciones de insumos para obtener el hidrogeno. La metodología a aplicar en el estudio, con el fin de lograr los objetivos de la investigación se describe en el siguiente diagrama de bloques.

Figura II- 1: Pasos para el desarrollo del trabajo de investigación a través del método científico para un trabajo experimental.



Fuente: Elaboración propia

2.2. Selección de los componentes del electrolizador

2.2.1. Selección del tipo de celda

La selección del tipo de celda electrolítica es un aspecto en el que intervienen diversos factores, como pueden ser los balances de materia, los datos numéricos referidos a voltajes y densidades de corriente o el diseño geométrico y sus dimensiones. Sin embargo, aun siendo importantes cada uno de esos factores, es posible hacer una primera selección partiendo de la información general reflejada en el apartado de Tipos de celdas electrolíticas de esta memoria y analizando las ventajas y desventajas teóricas que ofrece cada tipo de electrolisis. Por ello, se resumen en este apartado las principales características de cada tipo de celda con el objetivo último de encontrar el tipo de celda que se adecúe mejor a una aplicación destinada a la producción de hidrógeno en laboratorio.

Tabla II- 1: Las principales características de cada tipo de celda

	Ventajas	Desventajas
ALCALINA	<p>Tecnología madura</p> <p>Bajo precio</p> <p>Estructura simple</p> <p>Vida útil elevada</p> <p>Alta pureza 99,95%</p>	<p>Baja intensidad de corriente</p> <p>Electrolito corrosivo</p> <p>Poco compacto</p>
PEM	<p>Intensidad de corriente elevada (>1 A/cm²)</p> <p>Diseño compacto</p> <p>Alta pureza ($<99,99\%$ H₂)</p>	<p>Coste elevado</p> <p>Posibilidad de vida útil corta debido a la membrana</p> <p>Tecnología en desarrollo</p>
AEM	<p>Diseño compacto</p> <p>Coste bajo</p> <p>Posibilidad de utilizar metales de transición como electrodos</p>	<p>Baja intensidad de corriente (<1 A/cm²)</p> <p>Degradación de la membrana a largo plazo</p> <p>Tecnología en desarrollo</p>
SOWE	<p>Elevadas eficiencias (cerca al 100%)</p> <p>Menor demanda eléctrica</p> <p>Posibilidad de utilizar metales no nobles abaratando el coste</p>	<p>Elevado desgaste debido a la temperatura</p> <p>Poco compacto</p> <p>Alta temperatura</p> <p>Tecnología en desarrollo</p>

Fuente: Elaboración propia

Para la selección del tipo de celda, se consideran los citados en párrafos anteriores donde de analizas ventajas y desventajas desde el punto de vista técnico se usará el método de los factores ponderados. . Asimismo, se asigna una calificación de acuerdo en la tablaII-2, se observan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método más adecuado.

Tabla II- 2: Escala de puntuación.

Escala de Puntuación	Puntuación
Excelente	9-10
Muy bueno	7-8
Bueno	5-6
Regular	3-4
Mala	1-2

Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla II- 3: Selección del tipo de celda para la de obtención de Hidrogeno

Factores	Peso relativo (%)	Tipos de celdas							
		Alcalina		PEM		AEM		SOWE	
		Puntuacion	Calificacion	Puntuacion	Calificacion	Puntuacion	Calificacion	Puntuacion	Calificacion
Diseño	0,2	8	1,6	7	1,4	8	1,6	6	1,2
Costo	0,3	8	2,4	5	1,5	5	1,5	4	1,2
Eficiencia	0,2	8	1,6	9	1,8	9	1,8	10	2
Disponibilidad de materiales	0,3	9	2,7	7	2,1	6	1,8	5	1,5
Puntuacion Final	1		8,3		6,8		6,7		5,9

Fuente: Elaboración propia 2023

Tras analizar globalmente la información de la Tabla II- 3, puede concluirse que el sistema que mejor puede cumplir con los objetivos de este trabajo es el tipo Alcalina: Proporcionando purzas con niveles del 99,95% (Vincent and Bessarabov, 2018) su

diseño de estructura simple y bajo precio hacen que sea adecuado para la investigación además de que los materiales se pueden encontrar fácilmente y tiene una gran durabilidad.

La electrolisis con óxidos sólidos (SOWE) tiene eficiencias elevadas, pero requiere de altas temperaturas para operar. Si además se tiene en cuenta que este sistema está considerado como poco compacto, esta opción sería descartada por ser poco práctica para el ámbito al que estará destinada.

El sistema PEM es compacto, no utiliza electrolitos corrosivos, cumple las especificaciones de pureza... El problema que presenta es su excesivo precio. Utiliza metales nobles en sus electrodos y titanio para los colectores de corriente. Si se añade también el coste de la membrana, el resultado es un precio que no resulta asequible para el rendimiento que ofrece.

El sistema AEM debido a que es una tecnología en desarrollo los materiales necesarios para la electrolisis no son accesibles además de que la membrana sufre degradaciones lo que alteraría las condiciones de operación.

2.2.2. Selección de electrolito

Para llevar a cabo la electrólisis del agua, es necesario agregar electrolitos o sustancias que aumenten la conductividad del agua. El agua pura no conduce electricidad eficientemente debido a su baja conductividad. Los ácidos oxácidos y las bases son ejemplos de sustancias que pueden aumentar la conductividad del agua sin interferir en la producción de gases.

Es importante destacar que, independientemente del electrolito utilizado (base o ácido oxácido), se obtendrá el mismo producto durante la electrólisis del agua, independientemente del pH de la solución

La conductividad producida por los ácidos es significativamente mayor que la producida por las bases en una solución electrolítica. En la producción industrial del hidrógeno mediante electrólisis, se utiliza principalmente hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH). Las bases se prefieren sobre los ácidos debido a su

menor capacidad para corroer los materiales del electrolizador, especialmente aquellos en contacto directo con la solución, como los electrodos y el tanque.

Si el hidróxido de sodio entra en contacto con la atmósfera, reacciona con el dióxido de carbono para formar carbonato de sodio (Na_2CO_3), lo que disminuye la conductividad de la solución y puede generar ataques corrosivos en los materiales expuestos.

A pesar de las desventajas asociadas con las bases, se prefieren sobre los ácidos debido al menor riesgo de corrosión y desgaste en los materiales del electrolizador. Esto reduce la necesidad de reemplazar los costosos electrodos.

Al controlar la temperatura entre los 24 °C y los 85°C como se pretende hacer en el experimento las concentraciones para lograr una buena conductividad están rondando el 20% al 30% para el NaOH y el 20% al 50% para el KOH, además se registra en la bibliografía que los valores de resistencia para ambos electrolitos se mantienen iguales al igual que el ataque corrosivo a los electrodos. Con los datos anteriores queda claro que las ventajas de usar una base de sodio o potasio son prácticamente iguales sin embargo hay una leve ventaja con el hidróxido de potasio respecto a la presión de vapor que es mayor a la solución de hidróxido de sodio y esto es relevante a la hora de recuperar gases ya que a temperaturas altas la vaporización del agua representa pérdidas y tendría que agregarse más agua destilada de la necesaria para producir cantidades de hidrógeno. Además, el hidróxido de potasio tiene otras ventajas como electrolito para la electrólisis del agua. Por ejemplo, ayuda a mantener los electrodos limpios durante el proceso, evitando la acumulación de sedimentos. También disminuye el punto de congelación del agua, lo que puede ser beneficioso en ciertas aplicaciones.

Para la selección del electrolito, se consideran los citados en párrafos anteriores donde se analizan características de cada electrolito y desde el punto de vista técnico se usará el método de los factores ponderados. Asimismo, se asigna una calificación de acuerdo en la tablaII-2, se observan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método más adecuado.

Tabla II-2: Escala de puntuación

Escala de Puntuación	Puntuación
Excelente	9-10
Muy bueno	7-8
Bueno	5-6
Regular	3-4
Mala	1-2

Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla II- 4: Selección del electrolito para la de obtención de Hidrogeno

Factores	Peso relativo (%)	Electrolitos					
		KOH		NaOH		Acido	
		Puntuacion	Calificacion	Puntuacion	Calificacion	Puntuacion	Calificacion
Conductividad	0,2	8	1,6	8	1,6	9	1,8
Costo	0,3	8	2,4	8	2,4	5	1,5
Corrosion a materiales	0,2	8	1,6	8	1,6	5	1
Disponibilidad del electrolito	0,3	8	2,4	7	2,1	6	1,8
Puntuacion Final	1		8		7,7		6,1

Fuente: Elaboración propia 2023

Por lo tanto el electrolito seleccionado es el Hidróxido de potasio (KOH)

2.2.3. Selección de electrodos

Para el experimento existen 2 posibilidades de electrodos que se pueden usar, los electrodos de acero inoxidable y los electrodos de grafito. En el caso de los de acero inoxidable, de baja composición de carbón, para el momento de llevar a cabo la electrólisis estos presentan un pequeño desgaste debido al ataque químico pero que no es significativo además son económicos y su disponibilidad es segura de encontrarlos. Por otro lado, se tienen los de grafitos que si bien estos no presentan ningún tipo de desgaste a la hora de la electrólisis, estos para ser utilizados se deben traer del exterior

del país ya que se ha buscado donde conseguirlos a nivel nacional y no se encuentran lo que incrementa el precio de estos.

Para la selección del electrodo se usará el método de los factores ponderados. . Asimismo, se asigna una calificación de acuerdo en la tablaII-2, se observan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método más adecuado.

Tabla II-2: Escala de puntuación

Escala de Puntuación	Puntuación
Excelente	9-10
Muy bueno	7-8
Bueno	5-6
Regular	3-4
Mala	1-2

Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla II- 5: Selección del electrodo para la de obtención de Hidrogeno

Factores	Peso relativo (%)	Electrodo			
		Acero Inoxidable		Grafito	
		Puntuacion	Calificacion	Puntuacion	Calificacion
Costo	0,3	8	2,4	7	2,1
Resistencia a la corrosion	0,3	8	2,4	9	2,7
Disponibilidad del electrodo	0,4	9	2,7	7	2,1
Puntuacion Final	1		7,5		6,9

Fuente: Elaboración propia 2023

Se utilizarán los electrodos de acero inoxidable ya que estos a pesar que presentan un pequeño desgaste por la electrólisis los tiempos que estos estarán bajo el proceso de la electrólisis no serán amplios, por lo tanto, el desgaste no sería tan significativo lo que no llevaría problemas a la hora de realizar el experimento. Por otra parte, los electrodos de acero inoxidable no son necesario que sean de alta calidad o de alta concentración

de carbón basta con los de baja concentración para el proceso ya que aún estos presentan baja corrosión para llevar a cabo la electrólisis del agua

Se utilizará acero inoxidable 316 el cual es una aleación que contiene cromo, níquel y molibdeno, lo que le confiere una mayor resistencia a la corrosión que otras aleaciones similares, como el acero inoxidable 304. El molibdeno mejora la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 316 en ambientes agresivos, como los entornos marinos o en este caso la solución electrolítica. Además, el acero inoxidable 316 es más resistente a la corrosión por picaduras y a altas temperaturas que otras aleaciones similares.

2.3. Diseño Experimental

El diseño de experimentos es una técnica estadística que nos ayuda a identificar qué factores o variables afectan el comportamiento de un proceso productivo y de esta manera poder mejorarlo.

El diseño factorial completo 2^k describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian).

El número de corridas a realizarse en el experimento es $2^k * \#$ réplicas. Además, también es importante que el orden en que se realizan las corridas sea aleatorio, es por esto que el experimento es un experimento completamente aleatorio.

Pasos para determinar el diseño experimental

- Elección de la variable respuesta a medir
- Elección de las variables objeto de estudio
- Elección del intervalo de dichas variables
- Diseño Factorial
- Realización de los experimentos y recolección de datos
- Análisis de los datos experimentales

2.3.1. Elección de la variable a medir (variable respuesta)

Para esta investigación se estableció como variable respuesta el volumen de hidrogeno producido por minuto en el electrolizador, caudal volumétrico.

2.3.2. Determinación de variables experimentales

La primera ley de Faraday sobre la electrólisis obtenida de manera experimental dice que “La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a este electrodo”. La cantidad de electricidad o carga eléctrica se mide en coulomb.

La segunda ley de Faraday expresa que “Para una determinada cantidad de electricidad (carga eléctrica), la masa depositada de una especie química en un electrodo, es directamente proporcional al peso equivalente del elemento”. Siendo el peso equivalente de una sustancia a la división de su masa molar y un número que dependerá de la reacción el cual representa el número de moles de electrones que interactúan en la reacción oxido-reducción.

En el momento de formular la ecuación que nos permitirá saber la cantidad de sustancia que se producirá en el electrodo tomando las leyes anteriores nos da como resultado:

$$m = \frac{Q}{F} * \frac{M}{z} \quad \text{Ec. II-1}$$

m equivale a la masa de sustancia producida en el electrodo en gramos

Q equivale a la carga eléctrica total que pasa por la solución en coulomb

F equivale a la constante de Faraday

M equivale a la masa molar de la sustancia que se expresa en gramos por mol

z corresponde al número de valencia de la sustancia ion en la solución

Puesto que en nuestro experimento trabajaremos con corriente continua será necesario tomar en cuenta que las fórmulas de las leyes de Faraday, la carga eléctrica se trabaja en coulomb lo cual tendrá que ser convertido su valor desde el conocimiento de la intensidad de corriente con la fórmula:

$$Q = I * t \quad \text{Ec. II-2}$$

Q es la carga encontrada en coulomb

I es la intensidad de corriente circulando medida en Amperios

t es el tiempo de circulación medido en segundos

Acomodando las ecuaciones anteriores para trabajar directamente los datos tenemos:

$$m = \frac{I*t}{F} * \frac{M}{z} \quad \text{Ec. II-3}$$

Se puede obtener el valor en moles si se toma en cuenta que $n=m/M$ utilizando la ecuación según conveniencia de presentación.

2.3.2.1. Temperatura

Ya se ha indicado que en el caso de la electrolisis del agua el potencial E^0 es negativo, lo que nos da una $\Delta G^0 > 0$. Esto significa que la reacción no ocurre de manera espontánea y es necesario un aporte mínimo de energía para que se produzca dicha reacción (la reacción se mantiene al aportar energía en forma de corriente continua mediante un circuito exterior). Como consecuencia de ello, la técnica está limitada cuando se lleva a cabo en condiciones estándar. Así, si utilizamos el hidrógeno producido en condiciones ambiente (1 atm y 25°C) en pilas de combustible con un rendimiento

inferior al 60%, el balance resulta negativo, es decir, la cantidad de energía contenida en un mol de H_2 (237.75 kJ) es inferior a la cantidad de energía eléctrica aportada para separar una molécula de agua.

No obstante, al aumentar la temperatura, la demanda térmica aumenta y la demanda eléctrica disminuye, lo que permite obtener más kJ de hidrógeno por cada kJ eléctrico utilizado

Al realizar pruebas preliminares se observó la temperatura de ebullición del agua es de 94 ° C y la temperatura de ebullición de la solución de hidróxido de potasio es de 104 ° C por lo tanto al controlar la temperatura del experimento en 85 ° C aumenta la conductividad de iones si provocar una ebullición que puede alterar el rendimiento por la producción de vapor de agua.

Tabla II- 6: Balances termodinámicos a 1 atm para la reacción $H_2O \rightarrow H_2 + 2 O_2$

	Δh (kJ/mol)	$T\Delta s$ (kJ/mol)	Δg (kJ/mol)
25 ° C	286.43	48.72	237.75
1000 ° C	249.87	72.17	177.66

Fuente: (Soria and Hurtado, 2007)

2.3.2.2. Concentración del electrolito

Debido a que en la solución la resistencia debe ser mínima y la conductividad máxima siendo importante mantener el equilibrio para lograr una eficiencia óptima en el uso de consumo energético. Si el manejo de la solución que se electroliza es óptimo el electrolito puede estarse reciclando debido a que este no se consume provocando que el gasto en su compra sea mínimo además hay que tomar en cuenta que a medida que se consume el agua por la separación de gases esta tiene que ser reemplazada para que la concentración del electrolito no aumente y esto provoque una subida en el consumo. Al controlar la temperatura entre los 25 °C y los 90°C como se pretende hacer en el experimento las concentraciones para lograr una buena conductividad están rondando el 20% al 30% para el NaOH y el 20% al 50% para el KOH.

2.3.2.3. Intensidad de Corriente

El aumento de la corriente en la electrólisis del agua tiene varios efectos en el proceso. A medida que aumenta la corriente eléctrica, se incrementa la velocidad de la reacción de electrólisis, lo que resulta en una mayor producción de hidrógeno y oxígeno. Esto se debe a que una mayor corriente suministra más energía para impulsar la descomposición del agua en sus componentes elementales.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el aumento de la corriente también puede generar un mayor calentamiento del sistema debido a la resistencia eléctrica. Este calentamiento adicional puede afectar la eficiencia del proceso y requerir medidas adicionales para controlar la temperatura. Al realizar pruebas preliminares se puede apreciar que la generación de gases en los electrodos surge a partir de los 0.5 amperios, el cual también está próximo al voltaje mínimo necesario para llevar a cabo la reacción, por lo tanto para el rango de variación se tomó esta medida hasta 1 amperios para medir la producción de hidrogeno.

2.3.3. Diseño Factorial

Para estudiar cuantitativamente el efecto de estos factores sobre el volumen en determinado tiempo y sus interacciones se utilizará el diseño factorial completo a 2 niveles y 3 factores (2^3) elegidos anteriormente por que son los que pueden influir significativamente en el rendimiento de la reacción, como cada factor en el experimento tiene 2 niveles los llamaremos nivel bajo (-) y nivel alto (+).

Tabla II- 7: Factores y dominio experimental.

Factor	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
X1: Corriente (Amperios)	0.5	1
X2: Temperatura (°C)	Tamb(24)	85
X3: Concentración de electrólito ($\frac{g\text{ soluto}}{ml\text{ solución}} \times 100$) (%)	20	50

Fuente: Elaboración propia 2023

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial 2^3 .

$$N^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 2^3 = 8$$

Se realizará el experimento y una repetición.

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 8 * 2 = 16 \text{ experimentos}$$

Variable respuesta será el volumen de hidrogeno producido (100 ml) en determinado tiempo, caudal volumétrico.

Tabla II- 8: Matriz de experimentos, plan de experimentación y respuesta medida.

	Matriz de experimentos			Plan de Experimentación			EXPERIMENTO (ml / min)	REPETICION (ml / min)
	X1	X2	X3	Intensidad de Corriente (Amperios)	Temperatura (°C)	Concentración de electrolito ($\frac{\text{g soluto}}{\text{ml solución}} \times 100$) (%)		
1	-	-	-	0.5	Tamb (24)	20	Y1	Y9
2	+	-	-	1	Tamb (24)	20	Y2	Y10
3	-	+	-	0.5	85	20	Y3	Y11
4	+	+	-	1	85	20	Y4	Y12
5	-	-	+	0.5	Tamb (24)	50	Y5	Y13
6	+	-	+	1	Tamb (24)	50	Y6	Y14
7	-	+	+	0.5	85	50	Y7	Y15
8	+	+	+	1	85	50	Y8	Y16

Fuente: Elaboración propia 2023



El modelo de regresión

Para el experimento del proceso químico de 2^3 , el modelo de regresión es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

Donde:

y: Modelo de regresión

X_1 : Variable codificada que representa la Intensidad de corriente

X_2 : Variable codificada que representa la temperatura

X_3 : Variable codificada que representa la concentración del electrolito

β : Coeficientes de regresión

ε : Error

Los coeficientes de regresión, nos lo brindara el análisis estadístico hecho en el programa de SPSS.

Para la estimación de efectos se puede aplicar las siguientes formulas:

$$A = \frac{1}{4*n} (a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc)$$

$$B = \frac{1}{4*n} (b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac)$$

$$C = \frac{1}{4*n} (c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab)$$

$$AB = \frac{1}{4*n} (ab - a - b + (1) + abc - bc - ac + c)$$

$$AC = \frac{1}{4*n} (1 - a + b - ab - c + ac - bc + abc)$$

$$BC = \frac{1}{4*n} ((1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc)$$

$$ABC = \frac{1}{4*n} (abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1))$$

Donde:

n: Numero de replicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

c: Resultado del cuarto tratamiento

ab: Resultado del quinto tratamiento

ac: Resultado del sexto tratamiento

bc: Resultado del séptimo tratamiento

abc: Resultado del octavo tratamiento

Estas fórmulas permiten saber si el efecto es significativo o es irrelevante.

Para la suma de cuadrados es muy importante, pues ayuda a estimar el análisis de varianza, se puede aplicar las siguientes formulas.

$$SS A = \frac{(a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc)^2}{8 * n}$$

$$SS B = \frac{(b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac)^2}{8 * n}$$

$$SS C = \frac{(c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab)^2}{8 * n}$$

$$SS AB = \frac{(ab - a - b + (1) + abc - bc - ac + c)^2}{8 * n}$$

$$SS AC = \frac{(1 - a + b - ab - c + ac - bc + abc)^2}{8 * n}$$

$$SS BC = \frac{((1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc)^2}{8 * n}$$

$$SS_{ABC} = \frac{(abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1))^2}{8 * n}$$

Donde:

SS: Suma de cuadrados

n: Numero de replicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

c: Resultado del cuarto tratamiento

ab: Resultado del quinto tratamiento

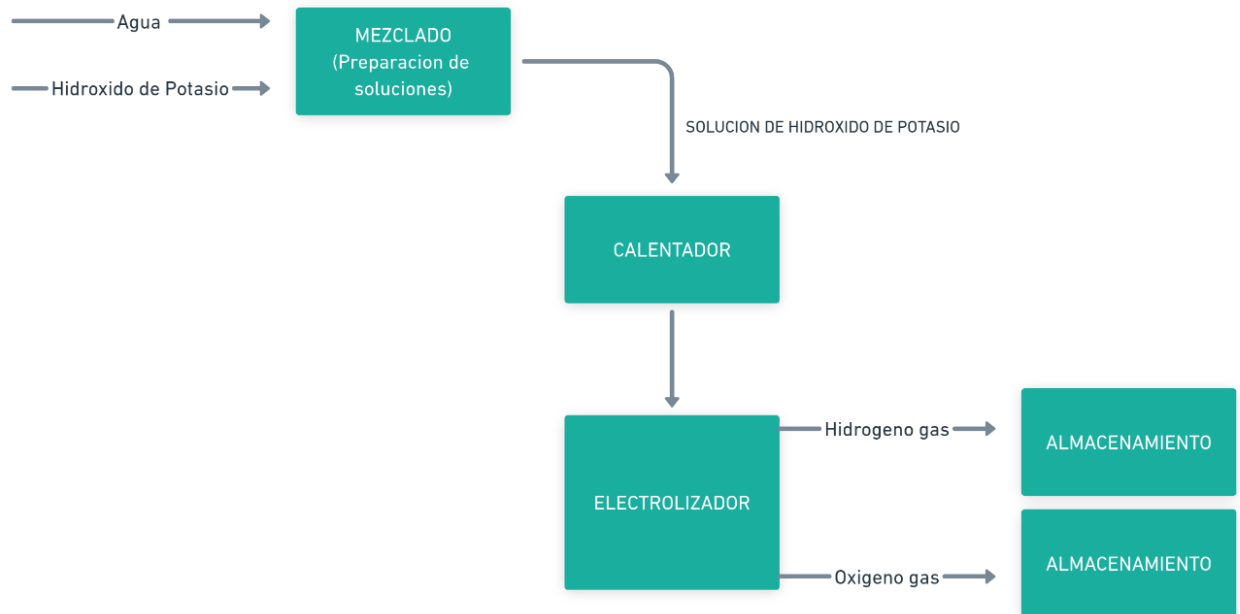
ac: Resultado del sexto tratamiento

bc: Resultado del séptimo tratamiento

abc: Resultado del octavo tratamiento

2.4. Descripción del proceso de obtención de hidrogeno a partir de la electrolisis del agua

Figura II- 2: Esquema del proceso de obtención de hidrogeno a partir de la electrolisis del agua



Fuente: Elaboración propia 2023

2.4.1. Preparaciones previas (Montaje del equipo)

Se procede al montaje del equipo para la electrolisis el cual contará con una fuente de alimentación de corriente continua la cual estará conectada a un voltímetro en conexión paralela y un amperímetro en conexión en serie para controlar y medir el voltaje y amperaje en las pruebas de electrolisis.

Figura II- 3: Montaje de equipo de electrolisis



Fuente: Elaboración propia 2023

2.4.2. Preparación de solución electrolítica (Mezclado)

Calibrar la balanza y medir la cantidad de 200 g de electrolito para una medida de 1L de solución. Recordar que si se utilizará un recipiente para depositar el hidróxido a la hora de pesarlo hay que tomar en cuenta el peso de ese recipiente.

Figura II- 4: Pesado del electrolito



Fuente: Elaboración propia 2023

Mezclar el electrolito con el agua destilada medida en un Beaker hasta formar un litro de disolución, aplicando el agua al KOH, tomar en cuenta que la reacción es exotérmica.

Figura II- 5: Preparación de la solución electrolítica



Fuente: Elaboración propia 2023

2.4.3. Puesta en marcha del experimento

Se prepara el beaker con electrodos fijados en la base. El interruptor debe estar apagado al inicio y la cubeta debe estar limpia de cualquier sustancia para evitar mezclar con el electrolito.

Figura II- 6: Electrodos fijados al beaker



Fuente: Elaboración propia 2023

Se ubican las probetas, una para el ánodo y otra para el cátodo sujetadas por las pinzas en los soportes universales para que quedan de manera invertida.

Figura II- 7: Probetas posicionadas en los electrodos



Fuente: Elaboración propia 2023

Se introduce la manguera del dispensador al interior de la probeta invertida de manera que el extremo libre quede topando con la superficie superior de la probeta.

Figura II- 8: Manguera en el interior de la probeta



Fuente: Elaboración propia 2023

Luego de posicionarla se procede a utilizar una jeringa para vaciar de aire la probeta y esta quedará llena de solución. El procedimiento se tiene que realizar mientras la probeta esté por lo menos sumergida una quinta parte en la solución ya que al llenarse el nivel del beaker bajará un poco.

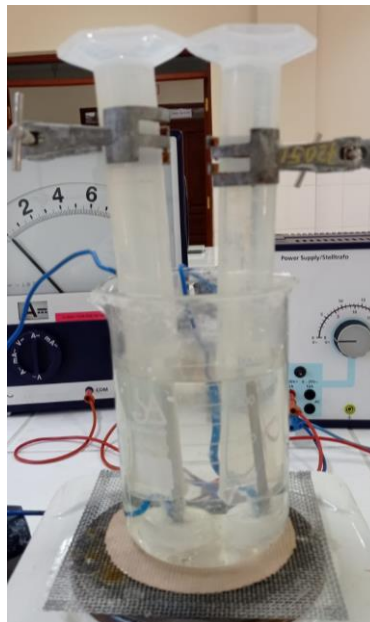
Figura II- 9: Vaciado de aire



Fuente: Elaboración propia 2023

El procedimiento se realiza hasta que la probeta quede totalmente llena de solución y se repite para ambas probetas.

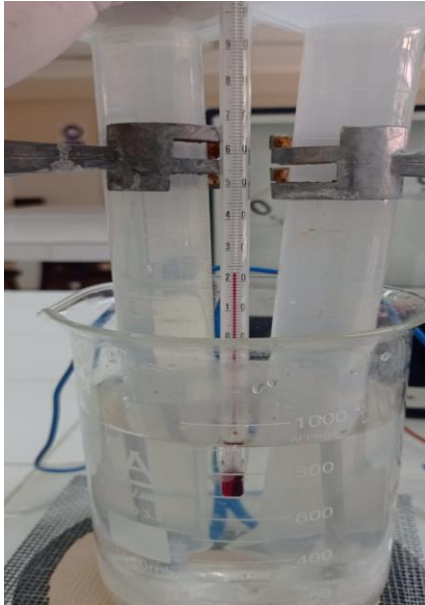
Figura II- 10: Probetas llenas de solución electrolítica



Fuente: Elaboración propia 2023

Antes de iniciar cualquier prueba se realiza la toma de temperatura, se anotará y luego se procede a iniciar la prueba.

Figura II- 11: Medición de temperatura

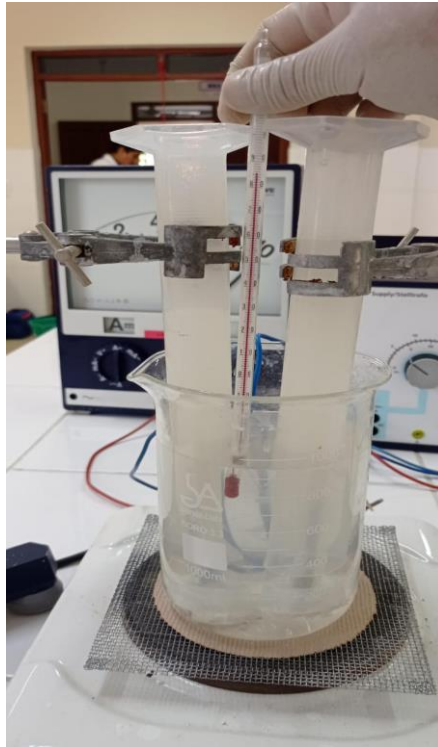


Fuente: Elaboración propia 2023

2.4.4. Calentador

Cuando las probetas estén aseguradas (con pinzas para probetas) y el aire se haya sacado de las probetas se procederá a calentar la solución desde los 67 °C a los que se encontraba debido al calor que libera la reacción en el mezclado hasta la temperatura de 85 C establecidos para el experimento.

Figura II- 12: Medición de temperatura



Fuente: Elaboración propia 2023

2.4.5. Electrolizador

Se permite el paso de corriente al mismo tiempo que se activa el cronómetro. Se observará como las burbujas saldrán de los electrodos empezando a llenar las probetas.

Figura II- 13: Puesta en marcha del experimento



Fuente: Elaboración propia 2023

Cuando se llene la probeta de 100 ml de gas recolectado se detendrá el cronometro anotando el tiempo de obtención y luego el gas se liberará en un espacio abierto para realizar la siguiente prueba.

Figura II- 14: Obtención de gases

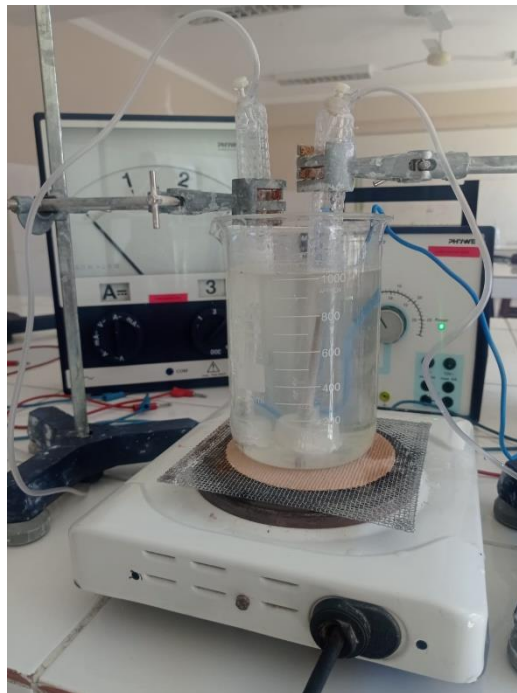


Fuente: Elaboración propia 2023

2.4.6. Almacenamiento de gases recolectados

Para el almacenamiento de gases se fabricó unos colectores de gases provistos de un tubo conectado a mangueras de infusión. Estos tubos de la misma forma que las probetas están colocadas en cada electrodo.

Figura II- 15: Colectores de gases en los electrodos



Fuente: Elaboración propia 2023

Los finales de estas mangueras colocadas en recipientes de polipropileno herméticos los cuales se le aplicaron un vacío y se proceden hasta completar el llenado de cada recipiente con su respectivo gas recolectado.

Figura II- 16: Almacenamiento de gases recolectados



Fuente: Elaboración propia 2023

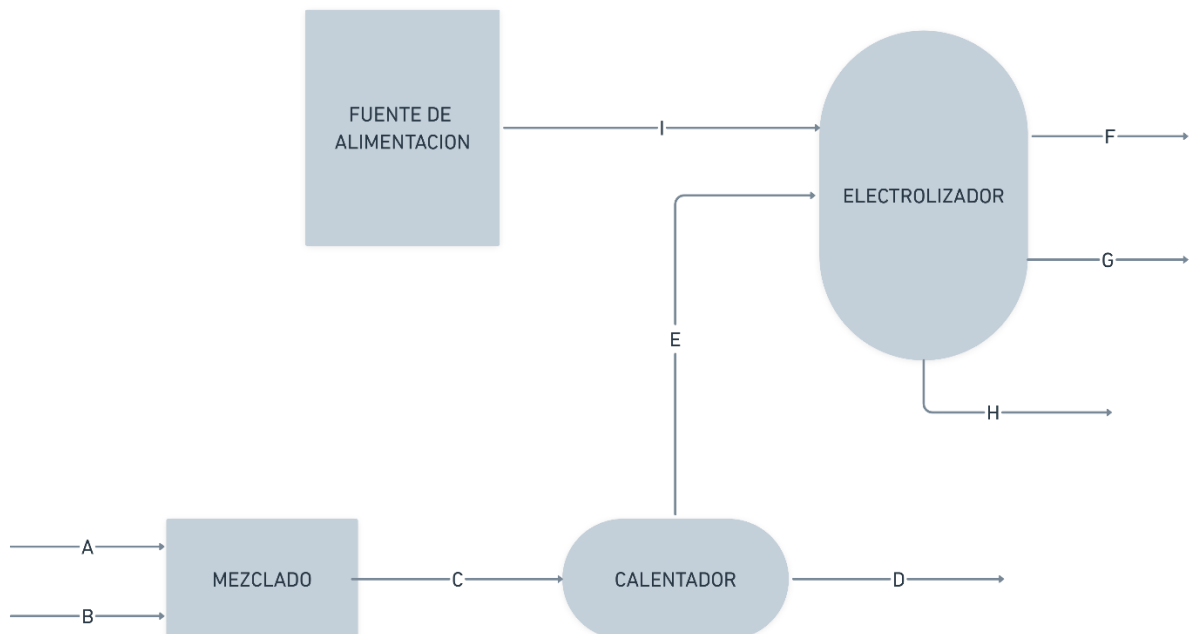
CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Balance de materia y energía del proceso

A continuación, se realizará un balance de materia y energía durante el proceso de electrólisis realizado el cual se podrá escalar posteriormente. Los datos utilizados corresponden a la prueba (4), esto debido a que es la prueba mayor rendimiento tiene, sin embargo, servirá para ejemplificar el cálculo del proceso ya que en la siguiente sección se estudiarán los datos que sean. El balance energético se realiza de acuerdo a la energía aportada para elevar la temperatura y la energía aportada para realizar el proceso de electrólisis con corriente eléctrica en función del rendimiento de la reacción. Se hace de esta manera y no un balance global energético debido a los objetivos de la investigación que se centra en la producción de hidrógeno por lo que se sugiere que para futuras investigaciones se tome en cuenta la entalpía inicial y final de la solución, así como las entalpías de los gases producidos, las pérdidas de calor y el calor liberado al momento de mezclar el hidróxido de potasio con el agua. Se presenta un esquema para entender el balance en la siguiente figura III-1.

Figura III- 1: Esquema de balance



Fuente: Elaboración propia 2023

En la Tabla III-1 se presenta la nomenclatura y simbología que se utilizó para el balance de materia.

Tabla III- 1: Nomenclatura utilizada en el balance de materia:

Nomenclatura utilizada	Especificación
A,B,C.....H Corriente másica global	A,B,C.....H = Corriente másica
X _{ZY} Fracción másica de cada componente	X = Fracción másica Z = Corriente a la que corresponde la fracción másica Y = Abreviatura del componente de la corriente

Fuente: Elaboración propia 2023

3.2. Balance de materia

Se realizó el balance de materia según del experimento que mayor caudal volumétrico se obtuvo logrando almacenar 1334 ml de hidrogeno obtenido en 77.37 min (4642.32s) obteniendo 17.24 ml/min. Se resume el diagrama de bloques con la Tabla III- 2.

Tabla III- 2: Resumen del curso de las corrientes

Entradas	Equipo o Etapa	Salidas
A + B	Mezclado	C
C	Calentador	D + E
E	Electrolizador	F + G + H

Fuente: Elaboración propia 2023

Se identifica las especificaciones de las distintas corrientes que interviene en el proceso de obtención de hidrogeno. (Ver Tabla III- 3)

Tabla III- 3: Corrientes del proceso.

Corriente	Especificación
A	Agua destilada
B	Hidróxido de potasio
C	Solución de hidróxido de potasio
D	Vapor de agua
E	Solución de hidróxido de potasio calentada
F	Gas hidrogeno
G	Gas oxigeno
H	Residuos
I	Energía alimentada

Fuente: Elaboración propia 2023

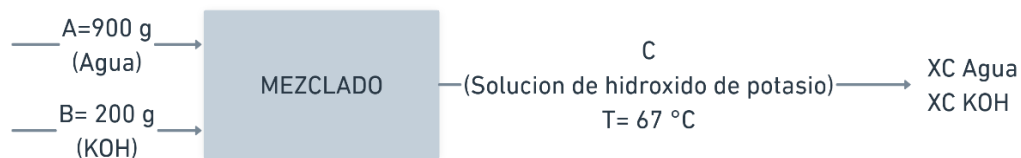
3.2.1. Mezclado

Donde:

A: Masa de agua destilada = 900 ml = 900 g

B: Masa de hidróxido de potasio = 200 g

C: Masa de solución de hidróxido de potasio = 1100 gr



PM KOH = 56.1056 g/mol

m KOH = 200 g

$$m \text{ solución} = m \text{ KOH} + m \text{ Agua} \quad \text{Ec. III-1}$$

$$m \text{ Agua} = 900 \text{ ml} \times 1 \text{ g/ml} = 900 \text{ g Agua} \quad \text{Ec. III-2}$$

$$m \text{ solución} = m \text{ KOH} + m \text{ Agua} = 1100 \text{ g sln KOH}$$

$$X_{C \text{ Agua}} = \frac{900}{1100} = 0.818 \quad \text{Ec. III-4}$$

$$X_{C \text{ KOH}} = \frac{200}{1100} = 0.181 \quad \text{Ec. III-5}$$

Al preparar la solución de hidróxido de potasio se puede apreciar que esta desprende calor (reacción exotérmica) elevando la temperatura de la solución hasta los 67 °C en cuestión de segundos existiendo una evaporación que se considera despreciable, se lleva directamente al procesos de calentamiento para aprovechar el calor que se generó en el mezclado.

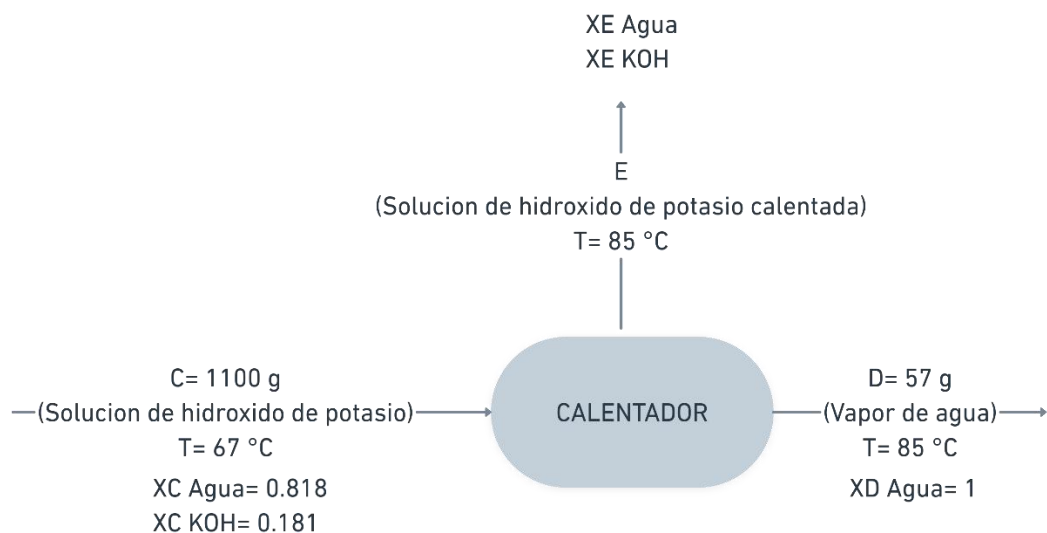
3.2.2. Calentador

Donde:

C: Masa de solución de hidróxido de potasio = 1100 g

D: Vapor de agua = 57 g

E: Masa de solución de hidróxido de potasio calentada = 1100 - 57 = 1043 g

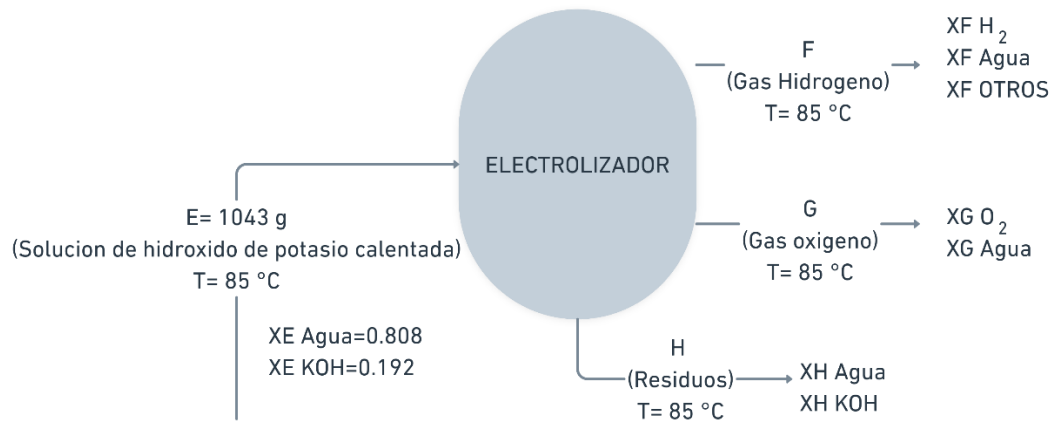


$$X_{E \text{ Agua}} = \frac{900-57}{1043} = 0.808 \quad \text{Ec. III-6}$$

$$X_{E \text{ KOH}} = \frac{200}{1043} = 0.192 \quad \text{Ec. III-7}$$

Se determinó la evaporación de agua que existe durante el calentamiento en toda la prueba midiendo el volumen final de la solución.

3.2.3. Electrolizador



Donde:

E: Masa de solución de hidróxido de potasio calentada = 1043 g

3.2.3.1. F: Masa de gas que contiene hidrogeno

Que se determinó con:

$$M_{\text{gas que contiene hidrogeno}} = M_{\text{recipiente final}} - M_{\text{recipiente inicial}} \quad \text{Ec.III-8}$$

Donde:

$M_{\text{gas que contiene hidrogeno}}$: masa del gas obtenido

$M_{\text{recipiente final}}$: masa del recipiente al final del proceso = 50.183 g

$M_{\text{recipiente inicial}}$: masa del recipiente al inicio del proceso en vacío = 49.998 g

$$M_{\text{gas que contiene hidrogeno (F)}} = 50.183\text{ g} - 49.998\text{ g} = 0.185\text{ g}$$

La composición se determinó según los análisis realizados, ver Tabla III- 4

Tabla III- 5: Valores para la corriente F

Parámetro	Valor	Unidad
Hidrogeno	83,1265	%
Agua	15,0643	%
Otros	1,8092	%

Fuente: Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos IIDEPROQ - UMSA, La Paz

Para el hidrogeno

$$XG_{H_2} = \frac{83.1265\%}{100\%} = 0.8313 \quad \text{Ec. III-9}$$

Para el agua

$$XF_{Agua} = \frac{15.0643\%}{100\%} = 0.1506 \quad \text{Ec. III-10}$$

Para otros

$$XF_{otros} = \frac{1.8092\%}{100\%} = 0.0181 \quad \text{Ec. III-11}$$

3.2.3.2. H: Masa de residuos

La corriente H contiene la cantidad de solución de hidróxido de potasio no utilizado

Se determinó:

$M_{residuos}$ = M solución de hidróxido de potasio calentada - M_{gas} que contiene oxígeno - M_{gas} que contiene hidrogeno

$$M_{residuos} (H) = 1043 \text{ g} - 0.185 \text{ g} - 0.893 \text{ g} = 1041.922 \text{ g} \quad \text{Ec. III-12}$$

$$XH_{KOH} = \frac{200}{1041.922} = 0.192 \quad \text{Ec. III - 13}$$

$$XH_{\text{Agua}} = \frac{1041.922 - 200}{1041.922} = 0.808 \quad \text{Ec. III-14}$$

3.2.3.3. G: Masa de gas que contiene oxígeno

Que se determinó con:

$$M_{\text{gas que contiene oxígeno}} = M_{\text{recipiente final}} - M_{\text{recipiente inicial}} \quad \text{Ec. III-15}$$

Donde:

$M_{\text{gas que contiene oxígeno}}$: masa del gas obtenido

$M_{\text{recipiente final}}$: masa del recipiente al final del proceso = 50.887 g

$M_{\text{recipiente inicial}}$: masa del recipiente al inicio del proceso en vacío = 49.994 g

$$M_{\text{gas que contiene hidrogeno (G)}} = 50.887 \text{ g} - 49.994 \text{ g} = 0.893 \text{ g}$$

Para el agua

$$D * XD_{\text{Agua}} = F * XF_{\text{Agua}} + G * XG_{\text{Agua}} + H * XH_{\text{Agua}} \quad \text{Ec. III-16}$$

$$XG_{\text{Agua}} = \frac{D * XD_{\text{Agua}} - F * XF_{\text{Agua}} - H * XH_{\text{Agua}}}{G} \quad \text{Ec. III-17}$$

$$XG_{\text{Agua}} = 0.9441$$

Para el oxígeno

$$XG_{\text{O}_2} = 1 - 0.9441 = 0.0559 \quad \text{Ec. III-18}$$

Rendimiento de la reacción (g H₂/s)

Masa de hidrogeno = 0.8313 * 0.185 g = 0.1537

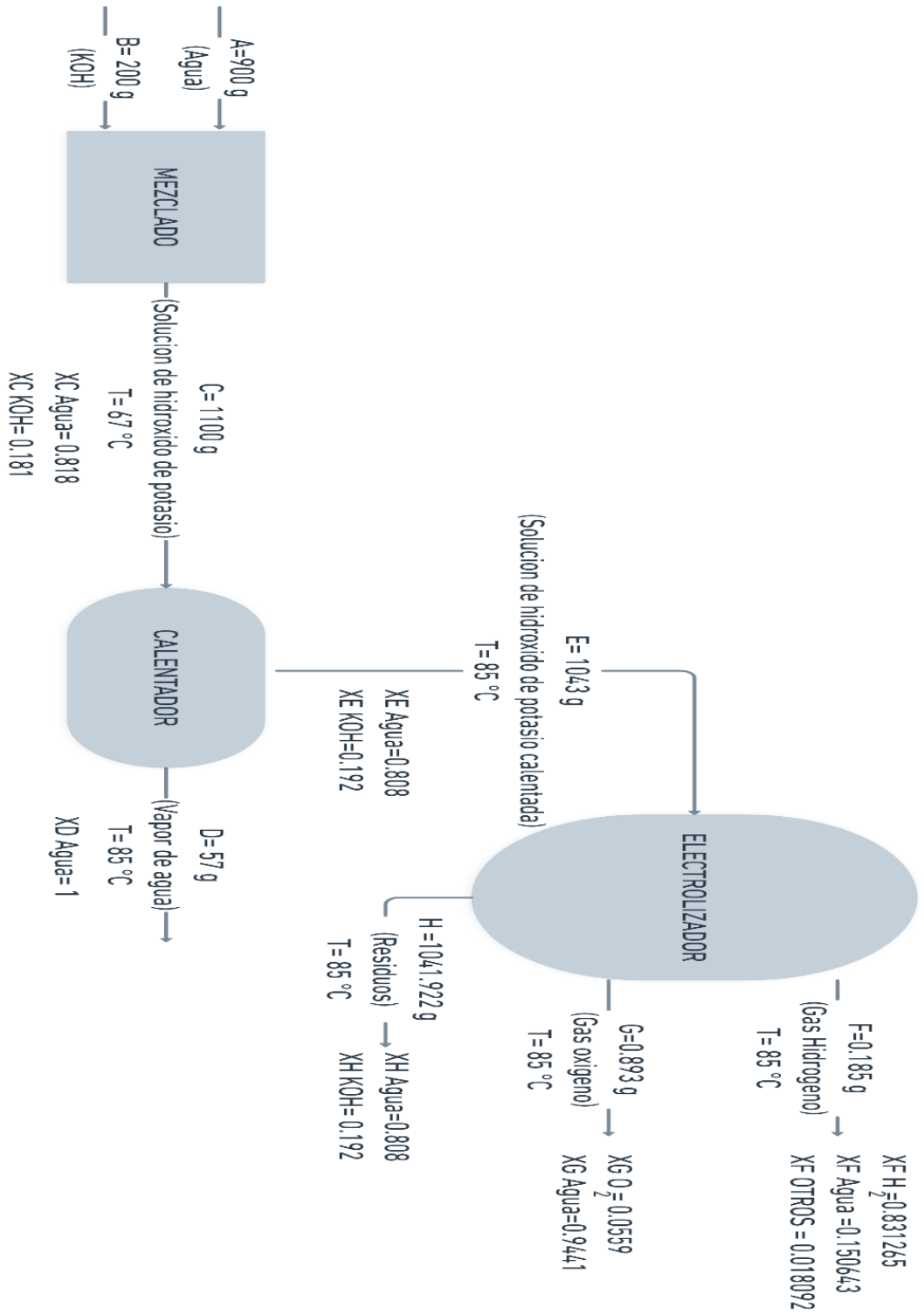
$$\text{Rendimiento} = \frac{0.1537 \text{ g H}_2 \text{ (hidrogeno producido)}}{4642.32 \text{ s (tiempo en producir 1334 ml gas)}} = 3.31 \times 10^{-5} \text{ g H}_2/\text{s}$$

Rendimiento de la reacción (g H₂/h)

Conversión de g H₂ producido por segundo a g H₂ por hora

$$\text{Rendimiento} = 3.31 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}} * 3600 \text{ s/h} = 0.1191 \text{ g H}_2/\text{h}$$

Figura III- 2: Balance de materia para la obtención de Hidrogeno.



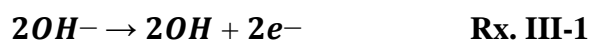
Fuente: Elaboración propia 2023

3.3. Balance de energía

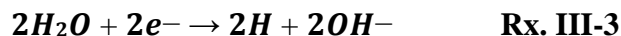
Se realizó el balance de energía según del experimento que mayor caudal volumétrico se obtuvo logrando almacenar 1334 ml de hidrogeno obtenido en 77.37 min (4642.32s) obteniendo 17.24 ml/min.

3.3.1. Corriente consumida en la reacción (calculada teóricamente)

A continuación, se presentan las semirreacciones para una solución alcalina: Semirreacción en el ánodo (Mendoza, 2004) :



Semirreacción en el cátodo (Mendoza, 2004):



Reacción total (Mendoza, 2004):



Ecuación de Faraday extraída de libro de corrosión (Mendoza, 2004).

I = corriente consumida (A)

$m = 0.1537$ (masa generada H_2) ($0.8313 * 0.185$ g)

$F = 96485.3365$ C/ (constante de Faraday)

$t = 4642.32$ s (tiempo consumido)

$PM H_2 = 2.01594$ (peso molecular)

$z = 2$ (moles de electrones involucrados).

Ley de Faraday de la electrólisis

$$I = \frac{m * F * z}{t * PM} \quad \text{Ec. III - 19}$$

$$I = \frac{0.1537 \text{ g} * 96485.3365 \text{ (A} * \text{s/mol)} * 2}{4642.32 * 2.01594}$$

$$I = 3.16 \text{ A}$$

3.3.2. Potencia consumida en la reacción

Para este cálculo se utiliza un valor de voltaje de 1.23 el cual pertenece al potencial estándar teórico en la electrólisis del agua y la corriente calculada en el paso anterior (Rayner-Canham, 2000).

I = corriente consumida (A)

V = Voltaje consumido (v)

$$P = I * V \quad \text{Ec. III-20}$$

$$P = 3.16 \text{ A} * 1.23 = 3.89 \text{ Watts}$$

3.3.3. Rendimiento de la electrólisis teórico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia consumida (W)

m = masa de hidrógeno por hora (g/h)

$$R = \frac{\text{salida deseada}(m)}{\text{entrada requerida}(P)} \quad \text{Ec. III-21}$$

$$R = \frac{0.1191 \text{ g H}_2/\text{h}}{3.89 \text{ Watts}} * \frac{1 \text{ kg} * 1000 \text{ W}}{1000 \text{ g} * 1 \text{ kW}} = 0.0306 \text{ kg H}_2/\text{kW} * \text{h}$$

3.3.4. Potencia suministrada por la fuente de alimentación

Los valores medidos cuando se lleva a cabo el experimento del amperímetro en de 1A y el voltímetro de 5.3 V con estos datos se calcula la potencia suministrada por la FEM

$$P = I * V \quad \text{Ec. III-22}$$

$$P = 1 A * 5.3 V = 5.3 \text{ Watts}$$

3.3.5. Rendimiento de la electrólisis práctico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia consumida (W)

m = masa de hidrógeno por hora (g/h)

$$R = \frac{\text{salida deseada}(m)}{\text{entrada requerida}(P)} \quad \text{Ec. III-23}$$

$$R = \frac{0.1191 \text{ g H}_2/\text{h}}{5.3 \text{ Watts}} * \frac{1 \text{ kg} * 1000 \text{ W}}{1000 \text{ g} * 1 \text{ kW}} = 0.0224 \text{ kg H}_2/\text{kW} * \text{h}$$

3.3.6. Eficiencia de la electrólisis.

Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{rendimiento real}}{\text{rendimiento teorico}} * 100 \% \quad \text{Ec. III-24}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{0.0224 \text{ (Kg H}_2/\text{ kW} * \text{ h)}}{0.0306 \text{ (Kg H}_2/\text{ kW} * \text{ h)}} * 100 \%$$

$$\text{Eficiencia} = 73.20 \%$$

Eficiencia = 73.20 %

Rendimiento teórico = 0.0306 g H₂/watt h = 0.0306 g/j

Rendimiento práctico = 0.0224 g H₂/watt h = 0.0224 g/j

3.3.7. Energía consumida en electrólisis

Correspondiente a la energía que la reacción de electrólisis utiliza.

$$E = \frac{0.1537 \text{ gH}_2}{0.0306 \text{ g/j}} = 5.0228 \text{ j}$$

3.3.8. Energía suministrada en electrólisis

Correspondiente a la energía que se le proporcionó al electrolizador

$$E = \frac{0.1537 \text{ gH}_2}{0.0224 \text{ g/j}} = 6.8616 \text{ j}$$

3.3.9. Energía suministrada para aumentar la temperatura de la solución

Correspondiente a la cantidad de energía que se le proporciona a la solución para aumentar la temperatura y que depende de la propiedad calorífica (cP) de la solución y de la masa que se esté trabajando. En este caso el valor variará según los aumentos de temperatura tomando como referencia la temperatura 85 C medida, así como la masa utilizada según concentración.

La capacidad calorífica de la solución compuesto por varios componentes, como son:

Hidróxido de potasio y agua. Principios de Termodinámica Para Ingenieros de Howell y Buckuis nos permite expresar el Cp de la mezcla como la suma de la fracción por el Cp de cada componente.

$$Cp \text{ solución} = (X * Cp) \text{ KOH} + (X * Cp) \text{ H}_2\text{O} \quad \text{Ec. III-25}$$

Donde:

(X * Cp) KOH Fracción por la capacidad calorífica del hidróxido

(X * Cp) H₂O: Fracción por la capacidad calorífica del agua

$$Cp. \text{ Solución} = 0.181 * 1.1567 \frac{J}{g * K} + 0.818 * 4.184 \frac{J}{g * K}$$

$$Cp. \text{ Solución} = 3.6318 \frac{J}{g * K}$$

Cabe señalar que la masa anterior es la combinación de agua más electrolito y el KOH no reacciona en la electrólisis y este permanecerá en una corriente H. La masa como solución se incluye en el balance energético a continuación a razón de que siempre está involucrada una cantidad de energía pequeña asociada a la presencia del KOH

$$E = C_{p. \text{ solución}} \times m_{\text{ solución}} \times \Delta^{\circ}\text{C} \quad \text{Ec. III-26}$$

Donde:

E: Energía suministrada para calentar la solución

Cp: capacidad calorífica de la solución

m: Masa de la solución

$\Delta^{\circ}\text{C}$: incremento de la temperatura en la solución

Datos:

$$m = 1100 \text{ g}$$

$$C_p = 3.6318 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

$$T_{\text{ inicial}} (67^{\circ}\text{C}) = 340.15^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{ final}} (85^{\circ}\text{C}) = 358.15^{\circ}\text{K}$$

$$E = C_{p. \text{ solución}} \times m_{\text{ solución}} \times \Delta^{\circ}\text{C}$$

$$E = 3.6318 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} * 1100 \text{ g} * (358.15^{\circ}\text{K} - 340.15^{\circ}\text{K})$$

$$E = 71909.64 \text{ J}$$

Es importante tomar en cuenta que cuando hablamos de energía suministrada nos estamos refiriendo a lo que se aportó durante el experimento, pero de esta energía aportada solo se utilizó una pequeña parte que sirvió para disociar el H₂O en los dos gases resultantes y a esa es la que nos referimos como energía consumida. El resultado de la energía suministrada total será la suma de la potencia eléctrica suministrada por la fuente de alimentación más la energía calorífica aportada externamente.

3.3.10. Energía total

$$E_T = E \text{ suministrada} + E \text{ calorífica} \quad \text{Ec. III-27}$$

$$E_T = 6.8616 \text{ J} + 71909.64 \text{ J} = 71916.5016 \text{ J}$$

3.4. Caracterización de la materia prima.

3.4.1. Agua destilada

3.4.1.1. Densidad.

Se calculó la densidad del agua destilada con la masa y el volumen previamente medidos, reemplazando en la ecuación:

$$\rho_{\text{Agua}} = \frac{m_{\text{Agua}}}{V_{\text{Agua}}} \quad \text{Ec. III-28}$$

Se pesó una muestra de 149.46 g que ocupaba un volumen de 100 ml

$$\rho_{\text{Agua}} = \frac{99.46 \text{ g}}{100 \text{ ml}} = 0.9946 \text{ g/ml}$$

3.4.1.2. Potencial de hidrogeno, pH.

Fue determinado por el laboratorio CEANID. valor de pH fue de 6.14 (24°C), que está dentro del rango permisible

3.4.1.3. Conductividad

Fue determinado por el laboratorio CEANID.

El valor de conductividad eléctrica fue de 81.9 uS/cm (24°C).

3.4.2. Solución de Hidróxido de potasio

3.4.2.1. Densidad.

Se calculó la densidad de la solución de hidróxido de potasio con la masa y el volumen previamente medidos, reemplazando en la ecuación:

$$\rho_{\text{sln}} = \frac{m_{\text{sln}}}{V_{\text{sln}}} \quad \text{Ec. III-29}$$

Se pesó una muestra de 149.46 g que ocupaba un volumen de 100 ml

$$\rho_{sln} = \frac{119.57 \text{ g}}{100 \text{ ml}} = 1.1957 \text{ g/ml}$$

3.4.2.2. Potencial de hidrogeno, pH.

Fue determinado por el laboratorio CEANID. valor de pH fue de 13.36 (25.3°C)

3.4.2.3. Conductividad

Fue determinado por el laboratorio CEANID.

El valor de conductividad eléctrica fue de 379 uS/cm (24°C).

3.5. Caracterización del gas que contiene hidrogeno

Se realizó el cálculo de la densidad del gas, midiendo el volumen que ocupa el gas en el recipiente de almacenamiento y pesando el recipiente en vacío para luego pesarlo unas ves llenas del gas obtenido.

$$V_{\text{gas H}_2} = 1334 \text{ ml}$$

Masa del gas se determinó con:

$$M_{\text{gas que contiene hidrogeno}} = M_{\text{recipiente final}} - M_{\text{recipiente inicial}}$$

Donde:

$M_{\text{gas que contiene hidrogeno}}$: masa del gas obtenido

$M_{\text{recipiente final}}$: masa del recipiente al final del proceso = 50.183 g

$M_{\text{recipiente inicial}}$: masa del recipiente al inicio del proceso en vacío = 49.998 g

$$M_{\text{gas que contiene hidrogeno}} = 50.183 \text{ g} - 49.998 \text{ g} = 0.185 \text{ g}$$

$$\rho_{\text{gas Hidrogeno}} = \frac{m_{\text{gas Hidrogeno}}}{V_{\text{gas Hidrogeno}}} \quad \text{Ec. III-30}$$

$$\rho_{\text{gas Hidrogeno}} = \frac{0.185 \text{ g}}{1334 \text{ ml}} = 0.000138 \text{ g/ml}$$

Llevando de gramos por mililitro a gramos por litro

$$\rho_{\text{gas Hidrogeno}} = 0.138 \text{ g/l}$$

3.5.1. Prueba de combustión.

La prueba de combustión se utilizó un pequeño frasco que se llenó con agua, y por desplazamiento se transportó el gas al frasco, se tapó. Posteriormente se encendió un cerillo de fosforo que se acercó al frasco, al estar a una distancia muy próximo, se abrió el frasco y se vio como se producía la combustión del hidrogeno.(Ver Figura III-3).

Figura III- 3: Prueba de combustión del gas obtenido



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Se verifico que el gas obtenido es un gas inflamable.

3.5.2. Olor.

Se hizo la prueba de olor personalmente, para ello lleno uno pequeño frasco de biogás por desplazamiento de agua, se tapó, y seguidamente se acercó hacia la nariz, al para liberar el gas obtenido y no se sintió ningún olor característico lo cual responde a las características del hidrogeno ya que es un gas inodoro, incoloro e insípido.

3.5.3. Composición del gas que contiene hidrogeno

Según los análisis de cromatografía de gases realizada en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos IIDEPROQ - UMSA, La Paz. (Ver Tabla II-3).

Tabla III- 6: Composición del gas obtenido

Parámetro	Valor	Unidad
Hidrogeno	83,1265	%
Agua	15,0643	%
Otros	1,8092	%

Fuente: Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos IIDEPROQ - UMSA, 2023.

3.5.4. Poder calorífico superior.

Para calcular el poder calorífico superior de una mezcla de gases se deben multiplicar cada porcentaje de gas componente por su poder calorífico y al final sumar estos productos el resultado es el poder calorífico superior de la mezcla de gases.

$$PCS (gas) = X_{H_2} * PCS_{H_2} + X_{H_2O} * PCS_{H_2O} + X_{Otros} * PCS_{Otros} \quad \text{Ec. III-31}$$

El poder calorífico superior del hidrogeno es igual a 141,86 MJ/kg, para el H₂O es igual a cero, y para los “otros” componentes, al ser desconocidos podemos asumir que serán igual a cero, el poder calorífico calculado será un aproximado, la ecuación queda:

$$PCS (gas) = X_{H_2} * PCS_{H_2} \quad \text{Ec. III-32}$$

Remplazando:

$$PCS (gas) = 0,831265 * 141.86 \text{ MJ/kg}$$

$$\mathbf{PCS (gas) = 117.92 \text{ MJ/kg}}$$

3.6. Caracterización del gas que contiene oxígeno

Se realizó el cálculo de la densidad del gas, midiendo el volumen que ocupa el gas en el recipiente de almacenamiento y pesando el recipiente en vacío para luego pesarlo unas veces llenas del gas obtenido sacando la masa del gas.

V gas H₂ = 667 ml

Masa del gas se determinó con:

$$M_{\text{gas que contiene oxígeno}} = M_{\text{recipiente final}} - M_{\text{recipiente inicial}}$$

Donde:

$M_{\text{gas que contiene oxígeno}}$: masa del gas obtenido

$M_{\text{recipiente final}}$: masa del recipiente al final del proceso = 50.887 g

$M_{\text{recipiente inicial}}$: masa del recipiente al inicio del proceso en vacío = 49.994 g

$M_{\text{gas que contiene hidrógeno}} = 50.887 \text{ g} - 49.994 \text{ g} = 0.893 \text{ g}$

$$\rho_{\text{gas Oxígeno}} = \frac{m_{\text{gas Oxígeno}}}{V_{\text{gas Oxígeno}}} \quad \text{Ec. III-33}$$

$$\rho_{\text{gas Oxígeno}} = \frac{0.893 \text{ g}}{667 \text{ ml}} = 0.001339 \text{ g/ml}$$

Llevando de gramos por mililitro a gramos por litro

$$\rho_{\text{gas Oxígeno}} = 1.339 \text{ g/l}$$

3.7. Análisis estadístico del diseño experimental.

Para el tratamiento estadístico de los datos del diseño factorial, se utilizó el programa SPSS STATISTICS 21 (Statistical Package for the Social Sciences).

En la Tabla III- 7, se presenta los datos obtenidos de la parte experimental.

Tabla III- 7: Datos de la parte experimental.

	Matriz de experimentos			Plan de Experimentación			EXPERIMENTO	REPETICION
	X1	X2	X3	Intensidad de corriente (Amperios)	Temperatura (°C)	Concentración de electrolito ($\frac{g\text{ soluto}}{ml\text{ solución}} \times 100$) (%)	A (ml / min)	B (ml / min)
1	-	-	-	0.5	Tamb (24)	20	4.7	4.51
2	+	-	-	1	Tamb (24)	20	9.75	9.97
3	-	+	-	0.5	85	20	6.51	7.06
4	+	+	-	1	85	20	19.30	15.63
5	-	-	+	0.5	Tamb (24)	50	4.69	4.64
6	+	-	+	1	Tamb (24)	50	9.59	9.04
7	-	+	+	0.5	85	50	6.08	5.78
8	+	+	+	1	85	50	15.87	13.93

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2023.

3.7.1. Análisis de varianza univariante.

Se realiza un Análisis de Varianza Univariante, para poder determinar la influencia de los factores intensidad de corriente, temperatura y concentración, verificando si todos los factores y su combinación son significativos respecto a la variable respuesta, volumen obtenido. Los factores inter-sujetos se muestran en la Tabla III- 8.

Tabla III- 8: Factores Inter Sujetos.

Factores inter-sujetos		
		N
Corriente	-1,00	8
	1,00	8
Temperatura	-1,00	8
	1,00	8
Concentración	-1,00	8
	1,00	8

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2023

Donde N es el número de datos.

Entre mayor sea el numero datos es mucho mejor para que la respuesta estadística sea Confiable. En este caso en particular para cada factor (Intensidad de corriente, temperatura y concentración) tenemos 8 en su estado mínimo y 8 en su estado máximo, en caso de que N sea menor a 4 la respuesta estadística no sería confiable.

La Tabla III- 9 nos muestra las pruebas inter-sujeto realizadas para determinar variables significativas.

Tabla III- 9: Pruebas de los efectos Inter-Sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Caudal volumétrico					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	318,861 ^a	7	45,552	40,439	0,000
Intersección	1351,529	1	1351,529	1199,844	0,000
Corriente	218,305	1	218,305	193,804	0,000
Temperatura	69,185	1	69,185	61,420	0,000
concentración	3,815	1	3,815	3,387	0,103
Corriente * Temperatura	23,761	1	23,761	21,094	0,002
Corriente * concentración	1,335	1	1,335	1,185	0,308
Temperatura * concentración	2,154	1	2,154	1,913	0,204
Corriente * Temperatura * concentración	0,306	1	0,306	0,272	0,616
Error	9,011	8	1,126		
Total	1679,401	16			
Total corregido	327,872	15			

a. R al cuadrado = 0,973 (R al cuadrado ajustada = 0,948)

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2023.

El análisis de la varianza reparte la variabilidad de la respuesta volumen en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego prueba la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental, los efectos principales de CORRIENTE, TEMPERATURA y CORRIENTE * TEMPERATURA fueron altamente significativos para esta variable respuesta, puesto que tienen valores de P menores a 0.05.

3.7.2. Determinación del modelo matemático.

Para determinar el modelo matemático se realiza una regresión con todas las variables Significativas.

Tabla III- 10: Experimentos realizados

Nº	Nº de muestra	Intensidad de corriente	Temperatura	Concentración	Caudal Volumétrico ml/min
1	1A	-1	-1	-1	4,70
2	1B	-1	-1	-1	4,51
3	2A	1	-1	-1	9,75
4	2B	1	-1	-1	9,97
5	3A	-1	1	-1	6,51
6	3B	-1	1	-1	7,06
7	4A	1	1	-1	19,30
8	4B	1	1	-1	15,63
9	5A	-1	-1	1	4,69
10	5B	-1	-1	1	4,64
11	6A	1	-1	1	9,59
12	6B	1	-1	1	9,04
13	7A	-1	1	1	6,08
14	7B	-1	1	1	5,78
15	8A	1	1	1	15,87
16	8B	1	1	1	13,93

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Tabla III- 11: y Tabla III- 12, se muestra un resumen del modelo matemático y del análisis Anova para el volumen de gas donde el exponente hace referencia a las variables Predictores: (Constante), Corriente Temperatura, Temperatura, Corriente.

Tabla III- 11: Variables para la regresión.

Resumen del modelo^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,974 ^a	0,949	0,937	1,17690
a. Predictores: (Constante), Corriente Temperatura, Temperatura, Corriente				
b. Variable dependiente: Caudal volumétrico				

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 202.

El análisis de varianza de Anova (Tabla III- 12) muestra un nivel de significación que tiende a cero, demostrando que el modelo matemático escogido es el correcto

Tabla III- 12: Resultados del análisis Anova.

ANOVA^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	311,251	3	103,750	74,905	0,000 ^b
	Residuo	16,621	12	1,385		
	Total	327,872	15			
a. Variable dependiente: Caudal volumétrico						
b. Predictores: (Constante), Corriente Temperatura, Temperatura, Corriente						

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2023.

En la Tabla III- 13 se muestran los coeficientes para el modelo matemático de volumen de gas

Tabla III- 13: coeficientes para el modelo matemático de volumen de gas

Coeficientes ^a								
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	9,191	0,294		31,237	0,000	8,550	9,832
	Corriente	3,694	0,294	0,816	12,554	0,000	3,053	4,335
	Temperatura	2,079	0,294	0,459	7,067	0,000	1,438	2,720
	Corriente Temperatura	1,219	0,294	0,269	4,142	0,001	0,578	1,860

a. Variable dependiente: Caudal volumétrico

Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2023.

Según los coeficientes indicados en la Tabla III-11, el modelo matemático para la obtención de gas, responde a:

$$Y = 9.191 + 3.694 X_1 + 2.079 X_2 + 1.219 X_3 \quad \text{Ec. III-34}$$

Donde:

Y: Rendimiento de gas (ml/min)

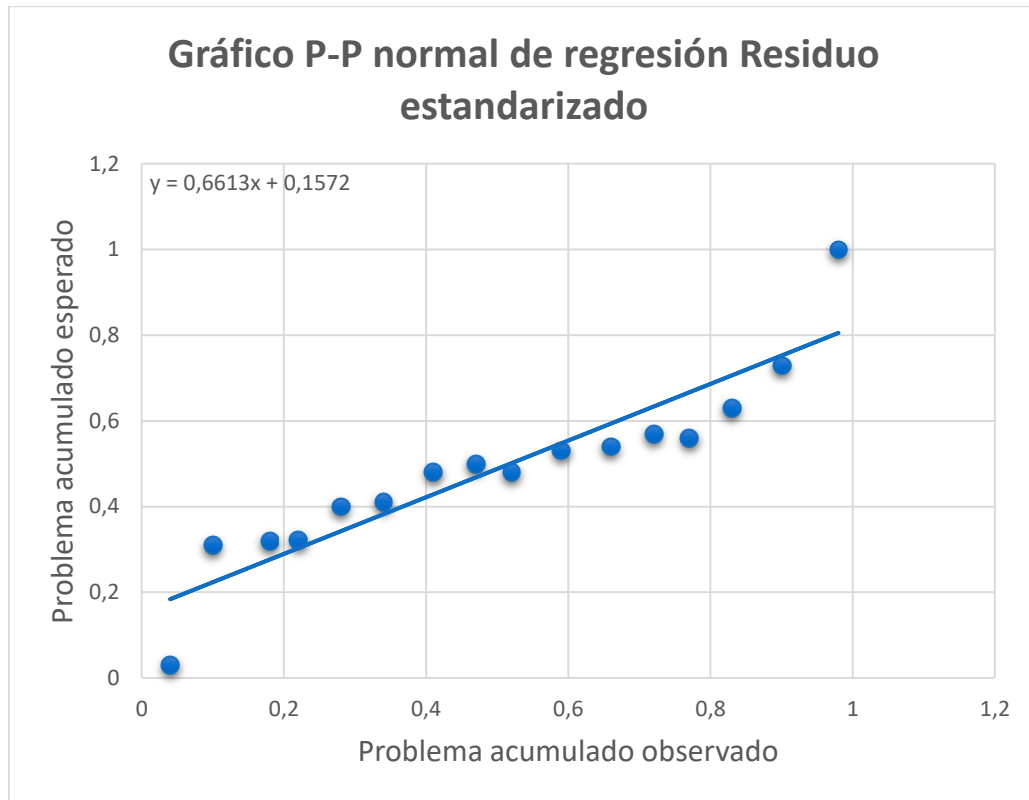
X1: Corriente (A)

X2: Temperatura (°C)

X3: Corriente (A)* Temperatura (°C)

Cada una de las variables introducidas y el volumen están relacionada con la ecuación. En la Figura III- 4 se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, según el análisis Anova no muestra gran significancia el desajuste, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Figura III- 4: Modelo Lineal.



Fuente: Elaboración propia SPSS 21, 2023.

Según el modelo lineal; se obtiene un nuevo volumen recibe el nombre de volumen ajustado, el que a continuación se gráfica junto al volumen observado que fue obtenido de cada experimento, para poder verificar el ajuste de la ecuación al modelo matemático. (Tabla III- 14).

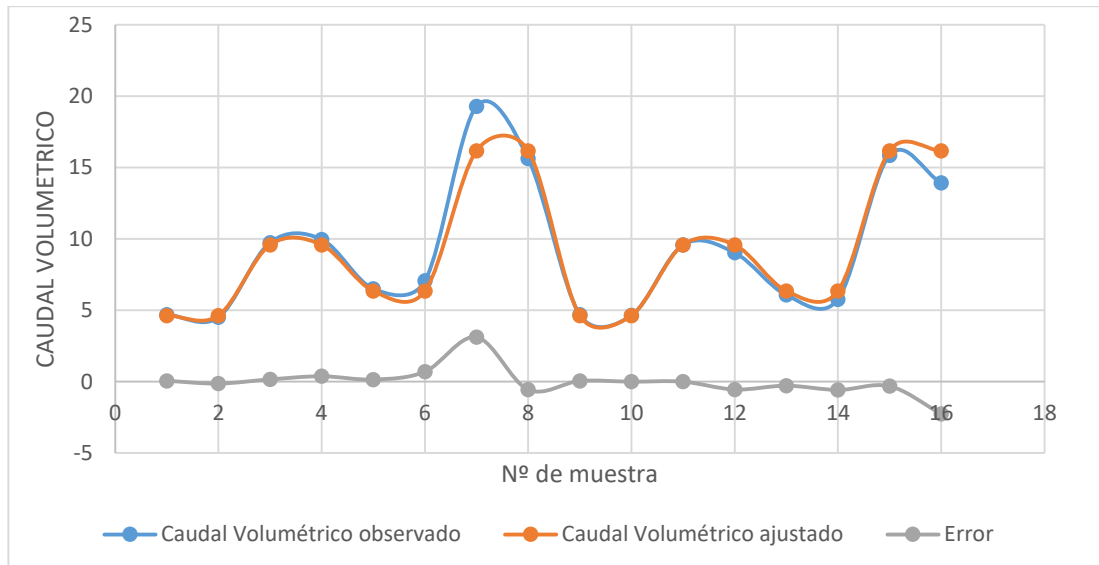
Tabla III- 14: Resultados del Caudal volumétrico ajustado y el error

Nº de muestra	Nº de muestra	Caudal Volumétrico observado	Caudal Volumétrico ajustado	Error
1	1A	4,7	4,637	0,063
2	1B	4,51	4,637	-0,127
3	2A	9,75	9,587	0,163
4	2B	9,97	9,587	0,383
5	3A	6,51	6,357	0,153
6	3B	7,06	6,357	0,703
7	4A	19,3	16,183	3,117
8	4B	15,63	16,183	-0,553
9	5A	4,69	4,637	0,053
10	5B	4,64	4,637	0,003
11	6A	9,59	9,587	0,003
12	6B	9,04	9,587	-0,547
13	7A	6,08	6,357	-0,277
14	7B	5,78	6,357	-0,577
15	8A	15,87	16,183	-0,313
16	8B	13,93	16,183	-2,253

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la Figura III- 5 se puede observar la gráfica de del rendimiento observado y el rendimiento ajustado y el error, donde se puede apreciar que valores entre el valor observado y el valor ajustado no varían drásticamente, por lo que podemos decir que el modelo matemático escogido es el correcto.

Figura III- 5: Caudal volumétrico observado y ajustado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.8. Análisis de Costos.

3.8.1. Costos Indirectos.

Las siguientes tablas muestran los detalles de los costos indirectos.

Tabla III- 15: Detalle de los costos de construcción del Electrolizador

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Electrodos de acero inoxidable	Pieza	1	30	30
Cables	Pieza	1	20	20
Unión de cables	Pieza	2	2.5	5
Equipo para suero	Pieza	1	5	5
Unión	Pieza	1	10	10
Silicona líquida	ml	1	20	25
Trabajo de ensamblado	-	-	10	10
			Total₁	105

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III- 16: Detalle de los costos del material de laboratorio.

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Probeta de 100 ml	Pieza	2	85	170
Vaso precipitado de 1000 ml	Pieza	1	80	80
Soporte de probeta	Pieza	1	80	80
Varilla de vidrio	Pieza	1	20	20
Contenedor de gas	Pieza	1	30	30
Pinza para probeta	Pieza	2	20	40
			Total₂	360

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III- 17: Detalle de los costos de reactivos

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Agua destilada	litro	5	12	60
Hidróxido de potasio	Kg	1,5	50	75
			Total₃	135

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III- 18: Detalle de costos material de apoyo.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Análisis de laboratorio	-	-	-	580
Internet	Horas	140	3	420
Pasajes	-	40	1	100
Papel	-	300	0.1	30
Impresión		7	50	350
Anillado	-	3	7	21
Empastado	-	3	50	150
			Total4	1651

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III- 19: Detalle del costo de investigación.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Costo de investigación mano de obra	Horas	500	8	4000
			Totals	4000

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III- 20: Detalle de costos totales.

Descripción		Valor Unitario (Bs.)
Total ₁	Costos de construcción del electrolizador	105
Total ₂	Costos del material de laboratorio	360
Total ₃	costos de reactivos	135
Total ₄	Costos material de apoyo	1651
Total ₅	Costo de investigación	4000
TOTAL		6251

Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.8.2. Costo de producción.

Para determinar los costos de producción se tomó en cuenta los datos empleados en el balance de materia y los gastos energéticos de los equipos utilizados durante el proceso de obtención de biogás.

Tabla III- 21: Detalle de los costos de agua destilada

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
Agua destilada	ml	58.078	0.0129	0.749
			Total	0.749

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III- 22: Detalle de los costos de energía

Descripción	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Valor Unitario (Bs.)	Valor (Bs.)
Calentador	1.5	1.5	2.25	0.82	1.84
Electrolizador	0,0053	1.28	0.0067	0.82	0.0056
Total					1.846

Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.8.3. Costo total

El costo total de producción fue la suma de los costos de materia prima y los costos energéticos.

$$\text{Costo total} = (0.749 + 1.84) \text{ Bs.}$$

Ec. III-35

$$\text{Costo total} = 2.60 \text{ Bs.}$$

Por lo tanto, para la producción de 1108.9 ml de hidrogeno a partir de una solución de agua destilada e hidróxido de potasio tendría un costo de 2.60 Bs.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONE

4.1. Conclusiones.

En el laboratorio, logramos obtener gas hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Nuestra investigación concluyó que la mejor alternativa para la producción de hidrógeno es la electrólisis alcalina, utilizando dos electrodos de acero inoxidable 316 e hidróxido de potasio como electrolito.

Determinamos que tres variables son significativas para la producción de gas: la intensidad de corriente, la temperatura y la concentración del electrolito. Los rangos de operación óptimos son los siguientes:

Temperatura: 24 - 85 °C

Intensidad de corriente: 0.5 – 1 A

Concentración: 20 – 50 % en composición m/V

Tomando como variable de respuesta la producción de 100 ml de gas en un tiempo determinado, encontramos que el procedimiento más eficiente se logra con una intensidad de corriente de 1 Amper, una temperatura de 85 °C y una concentración del 20% en composición m/V. Esto resulta en una producción de 17.24 ml de gas por minuto y una eficiencia del 73.20 % en la producción de hidrógeno.

Además, verificamos la calidad del producto mediante parámetros fisicoquímicos. La densidad del gas fue de 0.000138 g/ml, su poder calorífico fue de 117.92 MJ/Kg y, según la cromatografía de gases realizada por el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ), la composición del gas fue la siguiente:

Hidrógeno: 83.1265 %

Agua: 15.0643 %

Otros componentes: 1.8092 %

Finalmente de acuerdo al balance de materia y energía, calculamos el costo experimental de obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua en el nivel de laboratorio, que fue de 2.60 bolivianos por 1108.9 ml de hidrógeno.

4.2. Recomendaciones.

Para futuras experiencias iguales o similares.

- ✚ Se recomienda tener cuidado al momento de preparar la solución de hidróxido de potasio ya que esta es una reacción exotérmica que libera grandes cantidades de calor
- ✚ Se recomienda evaluar el consumo energético para proponer nuevos modelos de procesos. Se realizó un balance energético con los gastos energéticos más grandes y no un balance global energético debido a los objetivos de la investigación que se centra en la producción de hidrógeno por lo que se sugiere que para futuras investigaciones se tomen en cuenta las entalpías iniciales para ahorro de energía, así como el incremento de temperatura a la hora de mezclar el KOH con el agua.
- ✚ Para mantener precios bajos se recomienda ampliar los procesos como bien podría ser el recicló óptimo del KOH, la presurización a bajo costo, el almacenamiento de calor y las disposiciones de la instalación.
- ✚ Se recomienda elaborar un proyecto de producción de hidrogeno por electrolisis utilizando fuentes de energía renovable como la solar o eólica para disminuir los gastos energéticos del proceso.

Para la U.A.”J.M.S.”

- ✚ Realizar el proyecto de obtención de hidrogeno a partir de la electrolisis del agua para la producción de energía verde con un estudio detallado de costos para determinar si el mismo es factible a un nivel de producción industrial.
- ✚ Dar a conocer en mayor medida el tema de energías alternas, ayudando de esta manera a disminuir la contaminación y el calentamiento global.