

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO
DE LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO POR MEDIO DE ELECTROLISIS
UTILIZANDO ELECTROLIZADORES SIN MEMBRANAS**

JORGE EDUARDO TORRES GUZMÁN

Msc. ANDRÉS JOSÉ ZAPATA SAAD
DIRECTOR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
BOGOTÁ
2024

CONTENIDO

I.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
II.	OBJETIVOS	6
	OBJETIVO GENERAL	6
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
III.	MARCO TEÓRICO.....	7
1.	ELECTROLISIS.....	7
2.	ELECTROLITO	7
3.	TIPOS DE ELECTROLIZADORES	7
3.1.	ELECTROLIZADORES ALCALINOS	7
3.2.	ELECTROLIZADORES DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEM)	8
3.3.	ELECTROLIZADORES SIN MEMBRANA.....	8
4.	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS	10
4.1.	DENSIDAD	10
4.2.	VISCOSIDAD	10
4.2.1.	VISCOSIDAD DINÁMICA.....	10
4.2.2.	VISCOSIDAD CINEMÁTICA.....	10
4.3.	REGÍMENES DE FLUJO.....	10
4.4.	NÚMERO DE REYNOLDS.....	11
4.5.	DIÁMETRO HIDRÁULICO.....	11
4.6.	PERÍMETRO MOJADO	12
4.7.	CAUDAL.....	12
5.	CONCEPTOS DE LA ELECTRICIDAD	12
5.1.	VOLTAJE V	12
5.2.	CORRIENTE (I)	12
5.3.	RESISTENCIA R	12
5.4.	POTENCIA ELÉCTRICA.....	12
6.	LEYES DE FARADAY DE LA ELECTROLISIS	13
6.1.	PRIMERA LEY:.....	13
6.2.	SEGUNDA LEY.....	13
7.	LEY DE LOS GASES IDEALES	13
IV.	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	14
V.	DISEÑO CONCEPTUAL	16
VI.	DISEÑO DE DETALLE.....	19
1.	DETERMINACIÓN DEL TIPO Y CONCENTRACIÓN DEL ELECTROLITO LÍQUIDO...	19

2.	DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE FLUJO DE ELECTROLITO.....	20
2.1.	ELECTROLIZADOR SIN MEMBRANA FLOW THROUGH	20
2.2.	ELECTROLIZADOR SIN MEMBRANA FLOW-BY	22
3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL ELECTROLITO.....	22
4.	CELDA ELECTROLIZADORA	26
4.1.	ELECTROLIZADOR FLOW BY	26
4.2.	ELECTROLIZADOR FLOW THROUGH.....	29
5.	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE GASES PRODUCIDOS	30
5.1.	ESTIMACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN (FLOW-BY)	30
5.2.	ESTIMACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN (FLOW THROUGH).....	32
5.3.	DISEÑO DE ALMACENAMIENTO.....	33
5.4.	PUREZA DEL HIDROGENO	34
6.	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE MEZCLA.....	35
6.1.	ELECTROLIZADOR FLOW-TRHOUGH	35
6.2.	ELECTROLIZADOR FLOW-BY	36
7.	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICO	37
VII.	SELECCIÓN DE EQUIPOS	38
1.	SISTEMA DE FLUJO DE ELECTROLITO	38
2.	CELDA ELECTROLIZADORA	39
3.	ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO	40
4.	ALMACENAMIENTO DE MEZCLA	41
5.	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICO	42
VIII.	PROTOTIPO Y PUESTA EN MARCHA	42
1.	PRESUPUESTO FINAL.....	42
2.	PROTOCOLO DE EJECUCIÓN DE PRUEBAS.....	44
2.1.	PRECAUCIONES.....	44
2.2.	EJECUCIÓN DE PRUEBAS	44
2.3.	TASA DE PRODUCCIÓN Y PUREZA	44
3.	VALIDACIÓN DEL DISEÑO	45
IX.	CONCLUSIONES.....	46
X.	REFERENCIAS	47

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La degradación ambiental es uno de los temas más importantes en la actualidad, ya que genera una responsabilidad con las siguientes generaciones. La emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmosfera, los cuales son las causales del cambio climático, se deben en parte al uso de combustibles fósiles en las plantas de generación de energía y en vehículos automotores. Entre los gases de efecto invernadero se encuentra el dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) y dióxido de nitrógeno (NO_2) (Mustafa-Moraes et al., 2016). Por ende, se estudian maneras de generar energía, menos nocivas con el ambiente, dejando de lado el uso de combustibles orgánicos. Algunas de ellas son: Energía fotovoltaica, energía eólica y la energía hídrica.

La energía fotovoltaica es aquella que se obtiene a partir de la radiación solar. Su principal componente son los módulos fotovoltaicos, conformados por células capaces de transformar la capacidad luminosa incidente en energía eléctrica (Lamigueiro, 2011). Su problema radica en que no se puede generar energía de forma continua, puesto que, solo se tienen los horarios diurnos para su aprovechamiento y aún durante el día la radiación solar real es impredecible. Por ende, es necesario almacenar la energía obtenida para, posteriormente, utilizarla cuando esta no esté disponible. El método de almacenamiento puede ser químico (hidrógeno, biocombustible, nitrógeno líquido, peróxido de hidrógeno), electroquímico (baterías, celdas de combustible, baterías de flujo), eléctrico (capacitor, ultra condensadores, SMES), térmico (molten salt, acumulación freática, sistemas eutécticos, acumuladores de vapor), entre otros (Mírez, 2012).

Uno de los métodos más estudiados en el almacenamiento químico de energía ha sido el hidrógeno. Lo que hace al hidrógeno como vector de energía objeto de estudio, es que almacena mayor cantidad de energía por unidad de masa que cualquier otra sustancia y sus productos de reacción no son dañinos al medio ambiente ya que se genera simplemente agua. Si bien, el hidrógeno no se encuentra de forma natural (Isgró, 2015), existen procesos para producirlo tales como los procesos bioquímicos (biofotólisis, fermentación, celdas de electrolisis microbiana), fotoquímicos (fotólisis, sistemas fotosintéticos artificiales), termoquímicos (termólisis, gasificación, licuefacción, reformado, pirolisis), electroquímicos (electrohidrólisis, fotoelectrólisis, electrodescomposición con plasma), además de otros (Brijaldo et al., 2021).

El almacenamiento de energía eléctrica en forma de hidrógeno se puede realizar por medio de la electrolisis de agua, la cual consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por este medio, lo que produce la disociación las moléculas de hidrógeno y oxígeno que componen el agua. En estos momentos existen dos formas comerciales de producir hidrógeno por medio de electrolisis que son la electrolisis alcalina y la electrolisis PEM (proton exchange membrane). La electrolisis alcalina es la tecnología más avanzada, la cual utiliza catalizadores basados en Ni, Co, Ru, y utiliza electrolito líquido que generalmente es hidróxido de potasio en una solución acuosa. Los costes de este sistema son relativamente bajos, por lo que es la tecnología más usada en las últimas décadas (Jul et al., 2018). La electrolisis PEM utiliza una membrana de intercambio de protones, la cual cumple, entre otras cosas, la función de separador de gases. Algunos de los puntos fuertes en la electrolisis PEM es la alta calidad del gas producido, el bajo mantenimiento y una operación sin químicos (Diaz Saenz, 2020); sin embargo, su costo es elevado.

Una alternativa para la electrólisis alcalina y PEM son los electrolizadores sin membrana. Estos sólo necesitan de tres partes para funcionar: un ánodo, un cátodo y una estructura que sirve para facilitar el transporte del fluido junto con la recolección del producto (Davis, 2019). En años recientes ha crecido su interés ya que disminuyen los costos de producción al no contar con membranas de costos elevados para su producción. Su funcionamiento se basa en mecánica de fluidos por lo que es un campo en el que la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás está interesada, pero el problema es que ahora mismo no se cuenta con un montaje en el que se puedan recolectar datos para avanzar en el estudio del fenómeno y de esta manera en un futuro diseñar electrolizadores sin membranas.

Por estas razones la finalidad de este proyecto es diseñar y construir un banco de prueba de electrolizadores sin membranas en el que se pueda estudiar el efecto que tienen varios de los parámetros de operación de este como el caudal, amperaje, voltaje, etc., en la tasa de producción y pureza del hidrógeno obtenido.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Diseñar y construir un banco de pruebas para el estudio de la producción de hidrogeno por medio de electrolisis utilizando electrolizadores sin membranas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Definir los parámetros de funcionamiento, así como las variables de entrada y de respuesta del sistema.
2. Realizar el diseño de detalle del sistema que tenga la capacidad de manipular los parámetros de operación seleccionados y medir las variables de respuesta cumpliendo los estándares de seguridad.
3. Construir el sistema y realizar pruebas que avalen su funcionamiento.

III. MARCO TEÓRICO

1. ELECTROLISIS

Cuando una molécula de agua pasa a través de un proceso electroquímico, esta se separa en oxígeno e hidrógeno, en un proceso llamado electrolisis. Se usa electricidad para separar el hidrógeno y oxígeno en su fase gaseosa.

Para la electrolisis es necesario una fuente eléctrica de corriente directa (DC); también, es usado un ácido o una base (llamado electrolito) para aumentar la conductividad eléctrica, en electrolizadores alcalinos se usa hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio ($NaOH$) disueltos en agua. Esta solución se divide en iones positivos y negativo, los cuales conducen fácilmente la electricidad en el agua fluyendo de un electrodo a otro, los protones son reducidos en el cátodo para producir hidrógeno (H_2); en el ánodo, el agua se oxida para producir oxígeno (O_2). La primera parte de la reacción es conocida como reacción de desprendimiento de hidrógeno (HER) (ecuación 1) y reacción de desprendimiento de oxígeno (OER) (ecuación 2) (Rashid et al., 2015).



2. ELECTROLITO

Un electrolito es un compuesto que en solución acuosa se disocia en iones, en un mayor o menor grado. En el caso de la electrolisis, una vez aplicado el voltaje en los electrodos, la corriente eléctrica pasa a través del electrolito, el cual direcciona los iones positivos (H^+) y los iones negativos (OH^-) al cátodo y al ánodo respectivamente (Streblau et al., 2014).

3. TIPOS DE ELECTROLIZADORES

3.1. ELECTROLIZADORES ALCALINOS

El sistema de alimentación es agua líquida y el electrolito es un caustico concentrado, generalmente se usa hidróxido de sodio ($NaOH$) o hidróxido de potasio (KOH), es el método más desarrollado para la producción de hidrógeno por medio de electrolisis.

Este tipo de electrolizador trabaja entre los 60 °C y los 90 °C y utiliza una celda muy simple, necesitando un separador (diafragma) para evitar el cruce de los gases de producción. Este separador requiere un cambio periódico, que ya puede deteriorarse o

taparse por las impurezas del agua de alimentación. Con el correcto mantenimiento puede superar las 100.000 horas de vida útil (Rodriguez et al., 2022).

3.2. ELECTROLIZADORES DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEM)

Los electrolizadores de intercambio protónico utilizan agua líquida como alimentación. Este método de obtención de hidrogeno es costoso dado la complejidad su sistema de brecha cero. La ventaja de este electrolizador es su nulo requerimiento de mantenimiento durante su ciclo de vida, el cuál puede llegar a las cien mil horas de vida, si se utiliza agua ultrapura en la alimentación.

También es la tecnología más sensible a la presencia de impurezas como la presencia de $Mg^{+2}(aq)$ y $Ca^{+2}(aq)$ lo que puede conducir a la precipitación de $Mg(OH)_2$ y $Ca(OH)_2$ en el lado catódico del sistema, lo que conduce a daños irreversibles (Rodriguez et al., 2022).

3.3. ELECTROLIZADORES SIN MEMBRANA

Los electrolizadores sin membrana han sido diseñados para suplicar las diferentes carencias que tienen los electrolizadores comerciales actuales, como el costo de implementación, el mantenimiento y la más crítica de todas, las membranas y diafragmas.

Las membranas y diafragmas necesitan de agua ultrapura para funcionar, dado que cualquier tipo de impureza podría taparlos o degradarlos. El valor de producción se ve afectado por factores como el coste del mantenimiento, el coste de fabricación de las membranas y el tiempo útil del electrolizador, acompañado del requerimiento del agua ultrapura que se debe utilizar en el sistema.

Los diafragmas usados en los electrolizadores alcalinos suelen ser más económicos que la membrana de intercambio protónico y suelen ser usados por su simpleza, pero suelen ser susceptible a taparse por impurezas en el agua usado, además de la alta resistencia óhmica asociada a las burbujas llenas de líquido entre los electrodos. Los electrolizadores sin membrana son una solución para producir hidrogeno sin la necesidad de membranas o diafragmas, ya que estos también son llamados electrolizadores de flotabilidad inducida de separación de productos, ya que utiliza las fuerzas fluídicas para separar el oxígeno y el hidrogeno antes de que puedan cruzarse al otro electrodo (Esposito, 2017).

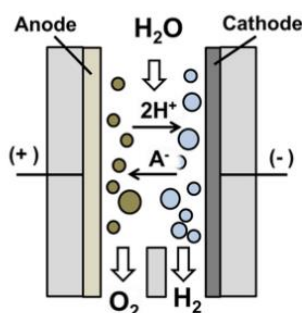
Durante la electrolisis, las burbujas generadas de H_2 y de O_2 en la superficie de los electrodos son arrastrados en dirección del flujo en los diferentes canales del electrolizador. Las burbujas avanzan cerca de los canales por el gradiente de velocidad asociado con el flujo laminar, creando así una fuerza de elevación inercial neta que las separa del centro de los canales, en un fenómeno conocido como efecto Sergé-Silberberg (Pang et al., 2020).

3.3.1. TIPOS

3.3.1.1 TIPO I (FLOW-BY)

Este electrolizador depende del flujo para la separación de gases. El oxígeno y el hidrógeno son separados mientras fluyen antes de que se puedan mezclar en el electrodo opuesto. En este tipo de electrolizador los productos son conducidos por canales con una solución electrolítica que fluye de manera paralela a la superficie del electrodo. Su arquitectura es similar a las celdas de combustible de flujo laminar (Malek et al., 2022).

Imagen 1 Electrolizador sin membrana tipo I

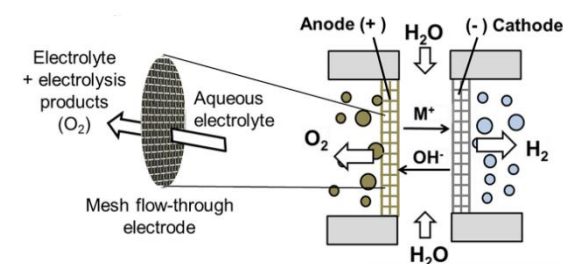


Adaptado de *Membraneless electrolyzers for low-cost hydrogen production in a renewable energy future* [imagen}, por Esposito, 2017

3.1.1.2. TIPO II (FLOW-THROUGH)

Aquí los electrodos son usados en un segmento del recorrido del agua. En este caso, los electrodos son porosos y el electrolito pasa a través de estos; generalmente, los electrodos son mallas metálicas (de titanio o de acero cromado) colocadas de manera paralela, el electrolito cruza la distancia entre electrodos usando una presión externa. Durante este tiempo el flujo se divide llevando el hidrógeno y el oxígeno por canales separados. Estos son generados en la superficie porosa del cátodo y el ánodo, este transporte se extiende a través del electrolizador antes de volver a unirse (Malek et al., 2022).

Imagen 2 Electrolizador sin membrana tipo II



Nota. Adaptado de *Membraneless electrolyzers for low-cost hydrogen production in a renewable energy future* [imagen}, por Esposito, 2017

4. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS

4.1. DENSIDAD

Dado que la mecánica de fluidos trata generalmente con fluidos en flujo continuo o con una pequeña cantidad en reposo, es más cómodo relacionar la masa y el peso específico con un volumen dado de fluido. La densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia. Se utiliza la letra griega ρ (*Rho*) para la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Donde V es el volumen y m es la masa. Las unidades son kilogramo por metro cúbico para el sistema internacional y para el sistema británico de unidades es slug por pie cúbico (Mott, 1996).

4.2. VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad de los fluidos, que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. La viscosidad de un fluido disminuye con la reducción de densidad que tiene lugar cuando se aumenta la temperatura. De igual manera, la viscosidad está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante (Agueda Casado et al., 2012).

4.2.1. VISCOSIDAD DINÁMICA

Se define como la fuerza que hay que ejercer por unidad de superficie, para mover una superficie paralela a una velocidad de un centímetro por segundo, sobre otra superficie paralela separada por una película de fluido de un centímetro de grosor. Su unidad de medida es el poise (Agueda Casado et al., 2012).

4.2.2. VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Es la capacidad que tiene un líquido de fluir a través de un tubo capilar. En un líquido, la viscosidad cinemática disminuirá al aumentar la temperatura, pero no se verá afectada por las variaciones de presión, ya que los efectos producidos son casi imperceptibles. La relación entre la viscosidad dinámica y la densidad es la viscosidad cinemática (Agueda Casado et al., 2012).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

4.3. REGÍMENES DE FLUJO

4.3.1. FLUJO LAMINAR

El flujo laminar hace referencia a un fluido que fluye en laminas o capas. En el flujo laminar las partículas fluidas se mueven según trayectorias paralelas. Este flujo está

gobernado por la ley de viscosidad de newton y la viscosidad del fluido es la magnitud física predominante siendo su acción una forma de amortiguamiento para cualquier forma (Duarte & Niño, 2004).

4.3.2. FLUJO TURBULENTO

En el flujo turbulento las partículas se mueven de forma caótica y desordenada. El flujo turbulento se presenta usualmente en problemas prácticos de ingeniería tales como flujos en tuberías, en canales, en máquinas hidráulicas, en ríos y flujos resultantes en zonas de rompimiento (Duarte & Niño, 2004).

4.4. NÚMERO DE REYNOLDS

El comportamiento de un fluido respecto a las pérdidas de energía depende de si un flujo es laminar o turbulento. Se puede mostrar de manera experimental y verificar de manera analítica que el carácter del flujo por un conducto redondo depende de cuatro factores: la densidad del fluido (ρ), la viscosidad del fluido (μ), el diámetro del conducto (D) y la velocidad promedio del flujo (v). El numero de Reynolds es el cociente de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido, entre la fuerza viscosa.

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (5)$$

Los flujos que tiene un Reynolds alto tienden a ser turbulento debido a su alta velocidad y baja viscosidad, mientras que aquellos que tiene un Reynolds bajo, suelen tener alta viscosidad y/o se mueven a bajas velocidad, tendiendo a ser laminares. Para aplicaciones prácticas, si se tiene un número de Reynolds menor de 2000 el flujo será laminar; de la misma manera, si el número de Reynolds es mayor a 4000 el flujo será turbulento. En el intervalo entre 2000 y 4000 es imposible predecir que tipo de flujo existe, por lo tanto, se le conoce como región crítica (Mott, 1996).

4.5. DIÁMETRO HIDRÁULICO

Cuando la sección transversal por la que se conduce un fluido no es circular, se puede utilizar el diámetro hidráulico medio y aplicar las formular para tuberías circulares sin introducir un gran error. El diámetro hidráulico se define como cuatro veces el área de sección transversal, dividida por el perímetro mojado (Coulson et al., 1983).

$$D_h = \frac{4A}{P_m} \quad (6)$$

4.6. PERÍMETRO MOJADO

Se define como la suma de la longitud de los límites de la sección que realmente están en contacto con el fluido. Esta debe ser calculada cuando se trabaja con secciones transversales diferentes a las circulares (Mott, 1996).

4.7. CAUDAL

El caudal o flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. Se calcula como la velocidad por el área de la sección transversal (Mott, 1996).

$$Q = v \cdot A \quad (7)$$

5. CONCEPTOS DE LA ELECTRICIDAD

5.1. VOLTAJE (*V*)

El voltaje (también llamado diferencia de potencial) permite establecer el trabajo o la energía eléctrica desarrollada para transportar una carga de un punto a otro dentro de una región de campo eléctrico. Su unidad es el voltio (Pérez & Pérez, 2014).

5.2. CORRIENTE (*I*)

La corriente eléctrica es la circulación de carga a través de un conductor. Se conviene asignar un sentido a la corriente eléctrica; como la corriente está producida por un campo eléctrico, ésta tiene el mismo sentido que el campo. Se define también la intensidad de corriente como la velocidad a la que se transporta una carga por unidad de tiempo. En el sistema internacional su unidad es el Amperio (De Ercilla, 2003).

5.3. RESISTENCIA (*R*)

Si por un conductor fluye una corriente eléctrica, los electrones libres se mueven entre los átomos del conductor, pero estos ofrecen cierta resistencia al paso de los electrones, esta debe ser superada por la tensión. La resistencia eléctrica tiene como unidad el Ohm (Ω) (Senner, 1992).

5.4. POTENCIA ELÉCTRICA

Cuando se pierde carga a través de una diferencia de potencial durante un tipo determinado, la energía eléctrica perdida es igual al producto de la carga por la diferencia de potencial dividida en una cantidad de tiempo (Bueche, 2021); en otras palabras, es igual al trabajo desarrollado en un segundo por una diferencia de potencial de un voltio para mover un Coulomb de carga (Harper, 1990).

$$P = I \cdot V \quad (8)$$

6. LEYES DE FARADAY DE LA ELECTROLISIS

6.1. PRIMERA LEY:

“La masa en gramos de una sustancia depositada en una electrolisis, es directamente proporcional a la intensidad de corriente y al tiempo que dura la electrólisis”.

$$M = \frac{M_m}{vF} It \quad (9)$$

M es la masa producida en la electrolisis (en moles); M_m es la masa en gramos de un mol de sustancia depositada; v es la valencia del ion correspondiente; I es la corriente aplicada (en amperes); t es el tiempo en que funciona la celda (en segundos); y F es una constante universal llamado Faraday, cuyo valor aproximado es 96500 Culombios (De Ercilla, 2003). Esta ecuación permite tener un estimado de producción de hidrogeno (suponiendo que no tiene cruce gaseoso) con base al tiempo que dura la electrolisis.

6.2. SEGUNDA LEY

“La masa en gramos de una sustancia depositada en una electrolisis, es directamente proporcional a su equivalente químico”

En las reacciones de neutralización y oxido-reducción se utiliza una cantidad de sustancia llamada equivalente químico. Es la cantidad de sustancia que puede liberar, adicionar, sustituir o desplazar un átomo-gramo de hidrógeno (Macarulla & Goñi, 1994).

7. LEY DE LOS GASES IDEALES

Cuando la distancia media entre las moléculas de una sustancia es lo bastante grande como para omitir los efectos de las fuerzas intermoleculares y el volumen de las moléculas mismas, un gas se puede considerar como ideal. Un gas ideal es un gas imaginario que cumple exactamente con la relación (Himmelblau, 1997):

$$pV = nRT \quad (10)$$

Donde p es la presión absoluta del gas (en *atm*, *mmHg*, *kPa*, *Torr*, *mbar*, *psi*); V es el volumen del gas (en *L*, *dm³*, *ft³*); n es el número de moles del gas (moles); R es la constante universal de los gases ideales (en *J · (K · mol)⁻¹*, *L · atm (K · mol)⁻¹*, *ft³ · psi · (°R · lbmol)⁻¹*); y T que es la temperatura del gas (en *K*, *°R*).

Se considera que un gas real tiene comportamiento de gas ideal, cuando las densidades son bajas, cuando las fuerzas de interacción molecular son despreciables y cuando el volumen ocupado por los átomos es muy pequeño respecto al volumen total en el que el gas está encerrado (Merino, 2006).

IV. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

El grupo de investigación de estudios y aplicaciones en ingeniería mecánica (Geamec) de la universidad Santo Tomás, en la búsqueda de nuevo conocimiento, requiere un banco de pruebas para la investigación de tecnologías emergentes para la producción de hidrógeno verde (energías renovables): electrolizadores sin membranas. Al ser una tecnología relativamente nueva, existen vacíos en diferentes aspectos que pueden ser estudiados gracias a la implementación de dicho banco.

En la literatura de los electrolizadores sin membrana siempre se menciona que la mezcla electrolito debe pasar por el electrolizador con una velocidad tal que, su flujo sea laminar; ya que esto evita que al pasar a régimen turbulento o en transición se genere mezcla de gases. Para un régimen de transición de flujo laminar se encuentran valores sobre $Re = 1400$ ((Pang et al., 2020) para los dos tipos de electrolizadores.

Al trabajar con elementos ácidos (como ácido sulfúrico) y básicos (como el hidróxido de potasio), se debe garantizar tanto la seguridad del personal que manipula el banco como de cada uno de los elementos que lo conforman.

El sistema debe permitir el fácil ensamblaje y la posibilidad de intercambiar distintas celdas electrolizadoras para evaluar diferentes geometrías, diferentes tamaños de electrolizador, diferentes materiales, etc., por lo que este debe ser diseñado de manera tal que cualquier elemento pueda ser reemplazado en caso de necesitarse y ser guardado por motivos de seguridad y espacio.

El sistema de almacenamiento de gases debe ser lo suficientemente seguro. No existe combustible cuyo uso esté libre de riesgos y el hidrógeno no es la excepción, ya que lo que hace que una sustancia sea un buen combustible es su capacidad de liberar mucha energía. Entre sus riesgos está la baja energía de activación, sus altos rangos de inflamabilidad y detonación, lo que implica que cualquier chispa podría generar reacciones no deseadas (Hurtado & Soria, 2007).

Como se trata de producción, el sistema debe ser capaz de permitir medir tasas de producción y debe ser capaz de permitir que el operador tome muestras de los diferentes productos si así se requiere. El sistema se construye con el fin de tener un modelo físico con el cual comparar modelamientos computacionales, por ello, es importante poder ver las burbujas y su comportamiento mientras la reacción ocurre.

Por los motivos anteriormente mencionados el sistema se diseña teniendo en cuenta los siguientes requerimientos:

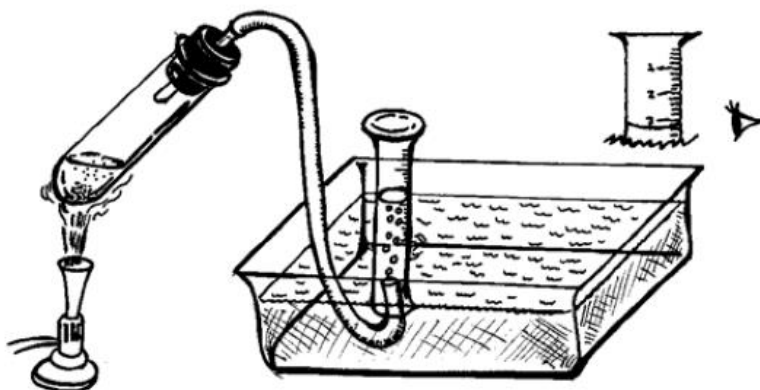
- El sistema debe mantener el flujo de electrolito constante durante las pruebas, pero debe permitir que se fijen diferentes valores de caudal.
- Sistemas de transporte con capacidad de resistir la corrosión ocasionada por el electrolito líquido.
- El montaje debe ser modular para que en un futuro se puedan probar diferentes configuraciones de electrolizadores.

- El sistema debe garantizar la seguridad en el tratamiento de los productos de reacción tanto de hidrógeno como de oxígeno. Como también en los sistemas eléctricos.
- El sistema debe permitir medir la tasa de reacción.
- El sistema debe permitir medir la pureza del hidrógeno producido.
- La velocidad mínima del electrolito en el electrolizador será de cero (0) ya que se estudiará el funcionamiento del sistema ante una posible falta de suministro de mezcla.
- El sistema debe permitir observar las burbujas producto de la reacción para modelamientos en CFD.

V. DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño conceptual de la recolección de gases de producción se basa en la recolección por desplazamiento de líquido. En este método, el recipiente se sumerge en líquido y se llena completamente sin que queden burbujas de aire, manteniendo el recipiente por debajo de la superficie (Trujillo, 2007).

Imagen 3. Recolección por desplazamiento de líquido

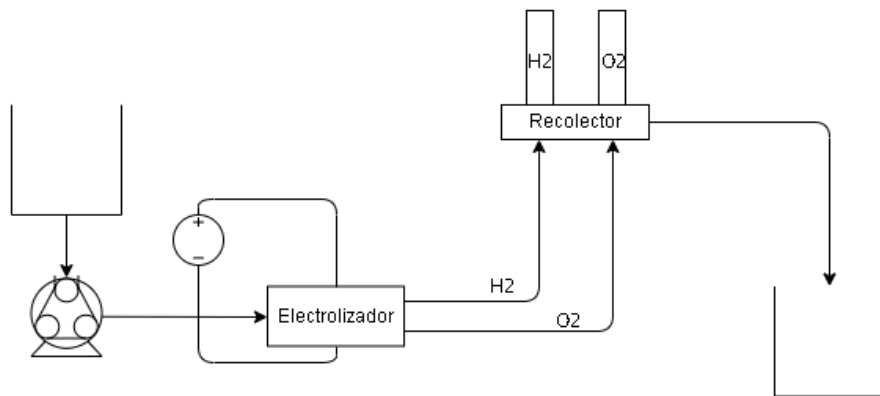


Adaptado de: Técnicas y medidas básicas en el laboratorio de química (Figura) por Trujillo (2007)

Para el diseño se evalúan tres alternativas conceptuales:

1. Sin retroalimentación: El sistema tiene dos tanques de almacenamiento de mezcla (agua-electrolito). En este sistema, la mezcla sale a una velocidad constante gracias a la bomba, llega al electrolizador donde se produce la producción tanto de hidrogeno como de oxígeno, llegando al recolector que funciona atrapando el gas entre un embolo y una columna de electrolito. El electrolito desplazado de cada uno de los recipientes de producto es llevado al segundo tanque de almacenamiento de mezcla por medio de un rebosadero.

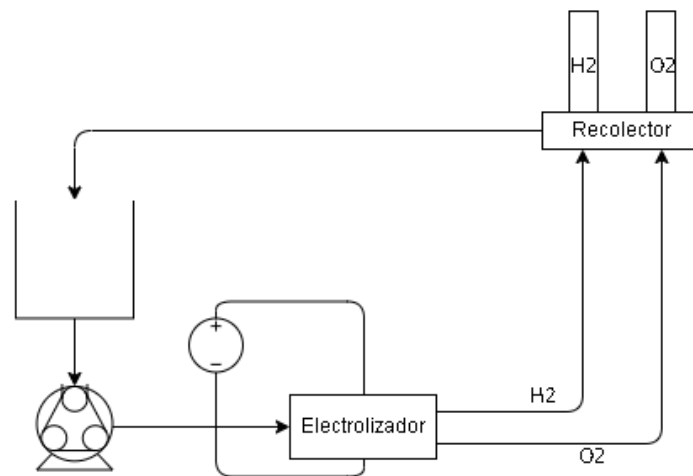
Imagen 4. Sistema sin retroalimentación



Fuente: Autor

2. Retroalimentada: El funcionamiento base es el mismo del diseño número 1, la diferencia radica en que la mezcla desplazada en cada recipiente vuelve al tanque de suministro.

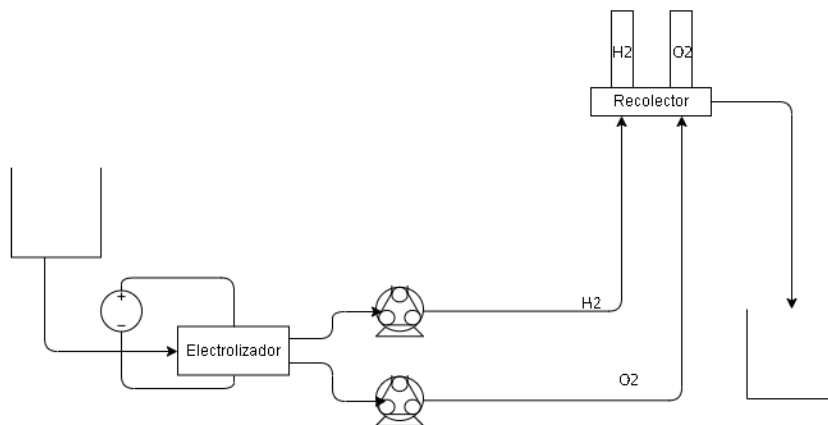
Imagen 5. Sistema retroalimentado



Fuente: Autor

3. Doble bomba: En este diseño la mezcla llega al electrolizador por gravedad y los productos son impulsados hasta el recolector para su almacenamiento, la mezcla desplazada por los productos va a un segundo tanque de almacenamiento.

Imagen 6. Sistema de doble bomba



Fuente: Autor

Se tiene en cuenta cuatro ítems para elegir la mejor opción entre los diferentes diseños: el costo de implementación, la calidad del electrolito de suministro, la construcción e implementación del banco y la toma de muestras.

Para el costo, la opción menos favorable es la opción número 3 ya que necesita de dos bombas para su funcionamiento, si bien la opción número 2 tiene solo un tanque, no representa una diferencia demasiado grande con la opción número 1, por lo que no hay una ventaja clara una con respecto a la otra; por otra parte, la calidad del electrolito sí que se ve afectada en la opción número 2 por la retroalimentación, ya que la mezcla de suministro puede tener hidrógeno disuelto lo que alteraría de manera significativa los resultados de las pruebas. En cuanto a las otras dos opciones, al tener un almacenamiento sin retroalimentación son generados resultados más confiables.

Para la implementación y construcción, hay una paridad entre las opciones número 1 y la número 2, puesto que su implementación es similar; por otra parte, existe un pequeño impacto en la implementación de las dos bombas, puesto que al ser un solo electrolizador con dos salidas podría presentarse algún cruce gaseoso. Para la toma de muestras ninguna sobresalta, y como la toma de muestras es igual para todas las opciones el puntaje es el mismo para todas.

Con la ayuda de la matriz de PUGH se elige la mejor opción:

Tabla 1. Matriz de PUGH

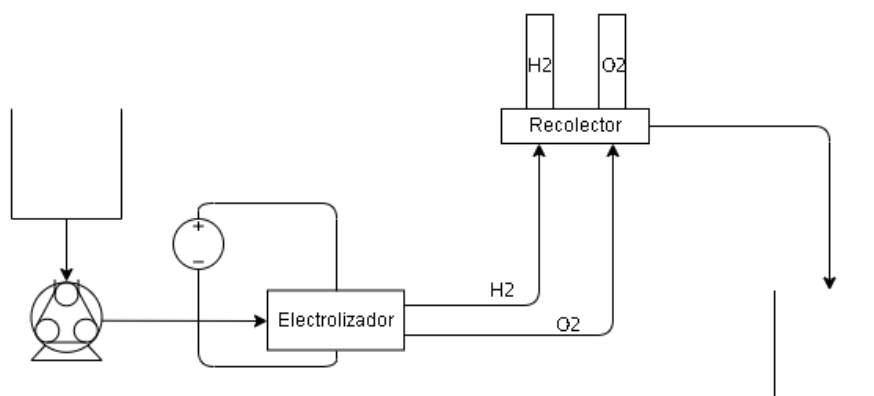
	Diseños conceptuales		
	diseño 1	diseño 2	diseño 3
Costo	0	0	-1
Calidad electrolito	1	-1	1
Implementación	1	1	0
Toma de muestras	1	1	1
TOTAL	3	1	1
Valoración	-1	0	1
	Negativo	Normal	Positivo

VI. DISEÑO DE DETALLE

El prototipo debe tener la capacidad de evaluar diferentes diseños de electrolizadores, por lo que se evaluarán los dos tipos principales de electrolizadores: flow-by y flow-through. Esto con el fin de obtener las condiciones críticas del sistema, las cuales permiten elegir los diferentes componentes que conforman el sistema:

- Electrolito
- Sistema de flujo
- Sistema de transporte de electrolito
- Electrolizadores
- Sistema de almacenamiento de gases producidos
- Sistema de alimentación eléctrico

Imagen 7 P&ID general del montaje



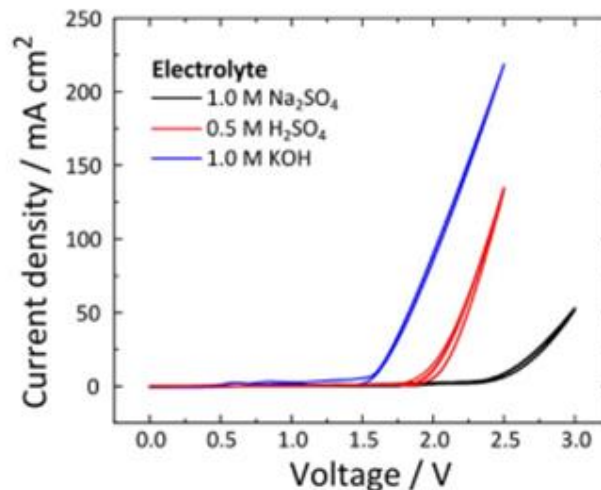
Fuente: Autor

1. DETERMINACIÓN DEL TIPO Y CONCENTRACIÓN DEL ELECTROLITO LÍQUIDO

Existe una relación entre el electrolito que se utiliza y su concentración que afecta directamente la densidad de corriente en los electrodos, por lo que tener densidades

altas de corriente por periodos prolongados afecta la eficiencia del proceso (Xu et al., 2021). Como se aprecia en la imagen 3, el electrolito que presenta una mayor densidad de corriente por voltaje aplicado es el hidróxido de potasio (KOH), por lo que se elige este electrolito para el diseño. Adicionalmente, esto permite el estudio de la resistividad eléctrica dado que la densidad de corriente es un producto del voltaje aplicado y la resistividad que ejerce el electrolito.

Imagen 8 Comportamientos de diferentes electrolitos



Nota. Adaptado de *Hydrogen production with a simple and scalable membraneless electrolyzer* [grafico] por O'Neil et al., 2016

2. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE FLUJO DE ELECTROLITO

Para ambos casos se tomará como objetivo un número de Reynolds de 1400, que es el valor encontrado en la literatura en el que comienza la transición a flujo turbulento en el electrolizador y se pierde el control sobre el flujo de las burbujas resultando así en un cruce de gases de producción (Pang et al., 2020).

Para el electrolizador Flow-Through, se toma como referencia el electrolizador utilizado por J.T Davis en su trabajo “*Membraneless Electrolyzers for Slar Fuels Production*” (Davis, 2019) y para el electrolizador flow by se toma como referencia el trabajo de Xueqi Pang, Jonathan Davis, Albert Harvey, Daniel Esposito “*Framework for evaluating the performance limits of membraneless electrolyzers*” (Pang et al., 2020), esto permite tener referencias y estimados de producción con los cuales hacer comparativas en los diferentes rangos estudiados, además de complementar la información que allí se presenta.

Cómo se ha mencionado anteriormente, el banco debe tener la capacidad de trabajar con los dos tipos de electrolizadores (Flow-by y Flow-through) por lo que las condiciones críticas de diseño se tomaran del electrolizador más crítico entre los dos. A continuación, se evalúa el flujo de electrolito tanto para el Flow-through como para el Flow-by.

2.1. ELECTROLIZADOR SIN MEMBRANA FLOW THROUGH

Partiendo de la ecuación del número de Reynolds (ecuación 11) se obtiene la velocidad del fluido necesaria para su funcionamiento. Tomando como referencia las medidas del

electrolizador que se encuentran en el trabajo de J.T Davis (Davis, 2019) y que se pueden observar en la tabla número 2, se puede hallar la velocidad del fluido como:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (11)$$

Donde Re es el número de Reynolds, ρ es la densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$), V es la velocidad del fluido ($\frac{m}{s}$), D_h es el diámetro hidráulico (m) y μ es la viscosidad dinámica del fluido ($Pa \cdot s$). Estas propiedades del fluido corresponden a una mezcla de hidróxido de potasio (KOH) y agua destilada, en una proporción de un molar dado que esta relación agua-electrolito con mejor densidad de corriente ($\frac{mA}{cm^2}$).

El diámetro hidráulico (ecuación 12) se define como:

$$D_h = \frac{2 \cdot B \cdot H}{B + H} \quad (12)$$

Donde H es la altura del electrodo y B es su base. Remplazando (ecuación 12) en (ecuación 11) se tiene que:

$$Re = \frac{2 \cdot B \cdot H \cdot \rho \cdot V}{\mu \cdot (B + H)} \quad (13)$$

$$V = \frac{\mu \cdot Re \cdot (B + H)}{2 \cdot B \cdot H \cdot \rho} \quad (14)$$

Los valores de viscosidad dinámica y densidad del hidróxido de potasio disuelto en agua en relación de un molar se tomaron de “*Handbook of Chemistry and Physics*” (Haynes M, 2014). A continuación, se muestran los valores correspondientes a cada termino:

Tabla 2 Valores para electrolizador Flow Through

Termino (Símbolo)	Valor (unidad)
B	22 mm
H	3 mm
Densidad de la mezcla (ρ)	1001,4 $\frac{kg}{m^3}$ (a 20° C)
Viscosidad dinámica de la mezcla (μ)	0,999x10 ⁻³ Pa · s (a 20° C)
Número de Reynolds (Re)	1400

Reemplazando los valores numéricos en (ecuación 14) y duplicándolo (puesto que son dos electrodos) se obtiene la velocidad necesaria para este electrolizador.

$$V = 0,53 \frac{m}{s}$$

2.2. ELECTROLIZADOR SIN MEMBRANA FLOW-BY

El desarrollo matemático es exactamente el mismo aplicado en el anterior electrolizador. La diferencia radica en el que ya no se multiplica por dos el resultado del caudal, puesto que el caudal es paralelo a los electrodos y los valores de los electrodos también cambian. Los datos para el electrolizador sin membrana Flow-by son:

Tabla 3 Valores para electrolizador Flow By

Termino (Símbolo)	Valor (unidad)
Base (B)	4 mm
Altura (H)	5 mm
Densidad de la mezcla (ρ)	1001,4 $\frac{kg}{m^3}$ (a 20° C)
Viscosidad dinámica de la mezcla (μ)	0,999x10 ⁻³ Pa · s (a 20° C)
Número de Reynolds (Re)	1500

Reemplazando los nuevos valores, se calcula el diámetro hidráulico con la (ecuación 12) teniendo:

$$D_h = 4,44 \times 10^{-3} m$$

Se calcula la velocidad necesaria para el fluido con la ecuación (14), no se multiplica por dos porque los electrodos son paralelos al flujo:

$$V = 0,314 \frac{m}{s}$$

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL ELECTROLITO

Se elige un diámetro comercial y se evalúan las pérdidas del sistema. El diámetro elegido es 3/8". Las pérdidas por fricción se estiman partiendo de medidas aproximadas al banco de pruebas.

La ecuación de Darcy-Weisbach es la fórmula básica para el cálculo de pérdidas por fricción, se define como:

$$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

Donde h_l es la pérdida por fricción (en metros (m)), f es el factor de fricción (adimensional), L es la longitud de la tubería (en metros (m)), D es el diámetro de la tubería (en metros (m)), v es la velocidad del fluido (en metros sobre segundo ($m \cdot s^{-1}$)) y g es el valor de la gravedad (en metros sobre segundo cuadrado ($m \cdot s^{-2}$)).

Si se suma la longitud aproximada de la tubería (Imagen 9) se tiene una longitud total de tubería de 5,1 m. Para un flujo laminar, el factor de fricción se calcula como:

$$f_{\text{laminar}} = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

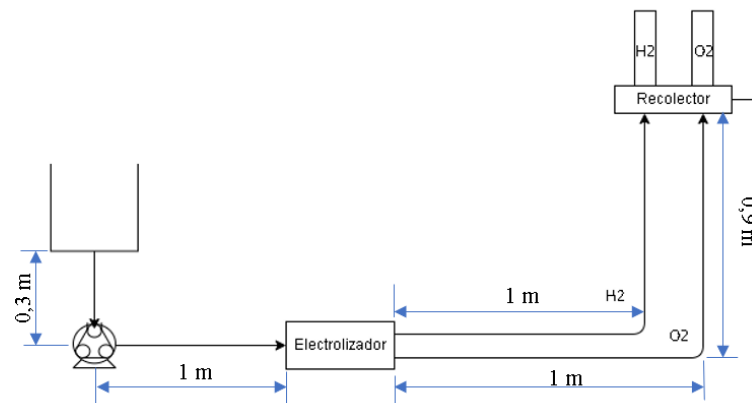
Aplicando la ecuación (16) se obtiene un factor de fricción $f = 45,7 \times 10^{-3}$. Ya calculado, se tiene todos los datos para aplicar la ecuación de Darcy. La velocidad usada para hallar las pérdidas es la velocidad más alta entre los dos tipos de electrolizadores.

Tabla 4. Valores para el cálculo de pérdidas

Termino	Magnitud (unidad)
Factor de fricción f	$45,7 \times 10^{-3}$ (adimensional)
Longitud total de tubería (L)	5,1 (metros)
Diámetro de tubería (D)	$9,53 \times 10^{-3}$ (metros)
Velocidad del fluido (v)	$0,53 m \cdot s^{-1}$
Gravedad (g)	$9,81 m \cdot s^{-2}$

Aplicando la ecuación (15) se tiene que la pérdida es de $h_l = 0,35 m$.

Imagen 9. Medidas aproximadas para longitud de tubería



Fuente: Autor

Para las pérdidas por accesorios hay que entender el recorrido del electrolito. Cuando el electrolito sale del tanque de almacenamiento existe una reducción brusca del área de

sección transversal; una vez entra por la tubería, existen reducciones mínimas en la entrada del electrolizador. En el electrolizador se considera que no hay pérdidas considerables. En la salida del electrolizador hay una ampliación de área transversal pequeña. Los gases de producción junto con la mezcla (agua-electrolito) se desplazan por la tubería hacia arriba hasta llegar al rebosadero, el cual tiene un cambio de área transversal.

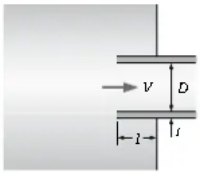
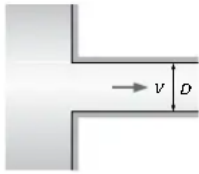
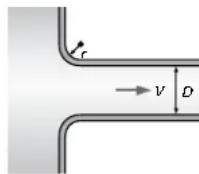
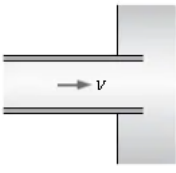
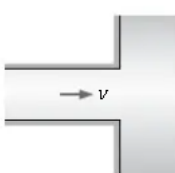
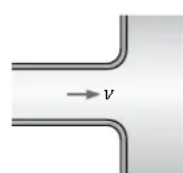
En resumen, la pérdida por accesorios se aplica a una reducción brusca en la salida del tanque de almacenamiento, dos reducciones leves (en la entrada de la bomba y en la entrada del electrolizador) y cuatro ampliaciones (una a la salida de la bomba, dos en la salida del electrolizador y una en la entrada del rebosadero).

La pérdida de energía localizada (o por accesorios) se calcula como:

$$h_v = K \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Donde h_v son las pérdidas localizadas (en metro (m)), K es un coeficiente determinado para cada accesorio en específico (adimensional), v es la velocidad del fluido (en metros sobre segundo ($m \cdot s^{-1}$)) y g es el valor de la gravedad (en metros sobre segundo cuadrado ($m \cdot s^{-2}$)). En la imagen 10 se observan los coeficientes necesarios para los cálculos de pérdidas por ampliación y reducción de área.

Imagen 10. Coeficiente K para algunos accesorios

Entrada de la tubería Reentrante: $K_L = 0.80$ ($l \ll D$ e $l \approx 0.1 D$) 	De borde agudo: $K_L = 0.50$ 	Redondeada ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$ Ligeramente redondeada ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$ (véase figura 8-40) 
Salida de la tubería Reentrante: $K_L = \alpha$ 	De borde agudo: $K_L = \alpha$ 	Redondeada: $K_L = \alpha$ 

Nota: el factor de corrección de energía cinética es $\alpha = 2$ para flujo laminar totalmente desarrollado, y $\alpha \approx 1.05$ para flujo turbulento totalmente desarrollado.

Adaptado de “Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones” (Tabla) por Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006)

Entonces se tiene que las pérdidas por accesorio son:

Para la ampliación abrupta, se tiene un $K = 0.8$, para una reducción menos brusca $K = 0.5$. Para cualquier ampliación en flujo laminar desarrollado el $K = 2$. Aplicando la ecuación 17, se tiene que:

A la salida del tanque de almacenamiento:

$$h_v = 0,8 \cdot \frac{\left(0,53 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_v = 11,45 \times 10^{-3} m$$

En la entrada de la bomba y en la entrada del electrolizador (se multiplica por dos, dado que son dos accesorios iguales):

$$h_v = 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{\left(0,53 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_v = 14,32 \times 10^{-3} m$$

Para las cuatro ampliaciones (salida de la bomba, dos salidas del electrolizador y rebosadero, por lo que se multiplica por cuatro):

$$h_v = 4 \cdot 2 \cdot \frac{\left(0,53 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_v = 11,45 \times 10^{-2} m$$

Las pérdidas totales se calculan como la sumatoria de la pérdida por longitud, las pérdidas por accesorios y las pérdidas por altura (altura a la que se debe impulsar el líquido) (ecuación 18):

$$h_t = h_l + \sum h_v + h_m \quad (18)$$

Entonces las pérdidas totales son iguales a:

$$h_t = 1,39 m$$

Como las pérdidas son tan bajas, y la velocidad del fluido también es parte fundamental del diseño, es probable que la cabeza de la bomba funcione bajo las condiciones de altura y de pérdida. Se entiende también, que el diámetro seleccionado funciona y al ser comercial, se usará tubería estándar de 3/8" de pulgada, fabricada en polipropileno. Como la elección del electrolito fue hidróxido de potasio (KOH) la tubería tiene que soportarlo. El polipropileno tiene muy buena compatibilidad química con el hidróxido de potasio (Tabla 5) incluso más de 48 °C (según la tabla), y dado que existen reacciones de electrolisis que alcanzan hasta los 60 °C, se elige el polipropileno.

Tabla 5 Compatibilidad química de algunos materiales

PRODUCTO QUÍMICO	Plásticos									
Sin efecto Efecto menor Efecto moderado Efecto severo Sin datos 1 Satisfactorio hasta 22 °C 2 Satisfactorio hasta 48 °C	ABS, plástico	Acetal (Delrin®)	CPVC	Epoxy	Hytrel	LDPE	Norly®	Nylon	Policarbonato	Polipropileno
Potasio, dicromato	1						1	1	1	
Potasio, ferricianuro		1		1		2	2	1		2
Potasio, ferrocianuro						1		1		
Potasio, hidróxido (potasa caustica)						1	1	1		
Potasio, hipoclorito						1		1		2

Nota. Adaptado “Tabla de resistencia química” (tabla) de Proindesca, Madrid. Disponible en: https://www.tuberiasdeacero.com/pdf/tienda/Tabla_Resistencia_Quimica.pdf

4. CELDA ELECTROLIZADORA

Los electrolizadores son impresos en ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) dada su gran compatibilidad química con el hidróxido de potasio a cualquier temperatura, considerando también que las temperaturas de fusión del ABS están sobre los 190 °C.

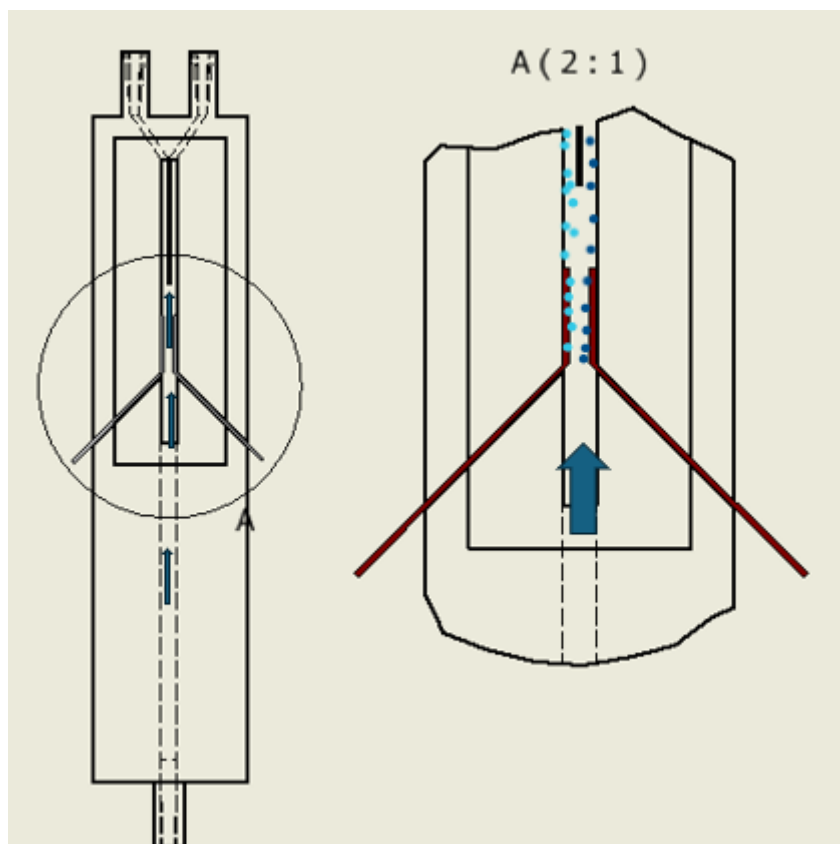
4.1. ELECTROLIZADOR FLOW BY

El electrolizador Flow-By se caracteriza por disponer los electrodos de forma paralela al flujo del electrólito. Tras la reacción electroquímica, el separador dirige los gases generados hacia el sistema de recolección. De entre los diferentes modelos de electrolizadores Flow-By, el propuesto por Pang et al. (2020) destaca por su simplicidad tanto en el proceso de construcción como en su funcionamiento. Este modelo requiere únicamente la impresión 3D del electrolizador, dos placas metálicas (generalmente de acero al níquel) y un material translúcido, como vidrio, para observar las burbujas resultantes de la reacción. Es uno de los electrolizadores más estudiados y avanzados en términos de diseño, lo que lo convierte en el modelo de referencia para este proyecto. Cabe mencionar que, en el futuro, se prevé la posibilidad de reemplazar la celda electrolítica; por esta razón, los puertos de alimentación del electrolito y las salidas de los productos deben ser de fácil conexión y desconexión.

El electrolizador debe instalarse de manera completamente vertical, con el único conducto de entrada en la parte inferior y un conducto de salida para cada gas producido en la parte superior. Los electrodos (representados en rojo en la imagen 11) se colocan paralelos al flujo del electrólito. Durante el proceso de electrólisis, las burbujas de H_2 y O_2 generadas en la superficie de los electrodos se desplazan en la dirección del flujo a través de los canales del electrolizador. Debido al gradiente de velocidad asociado con el flujo laminar, las burbujas tienden a moverse cerca de las paredes de los canales. Este fenómeno genera una fuerza de elevación inercial neta, que provoca que las burbujas se desplacen hacia las

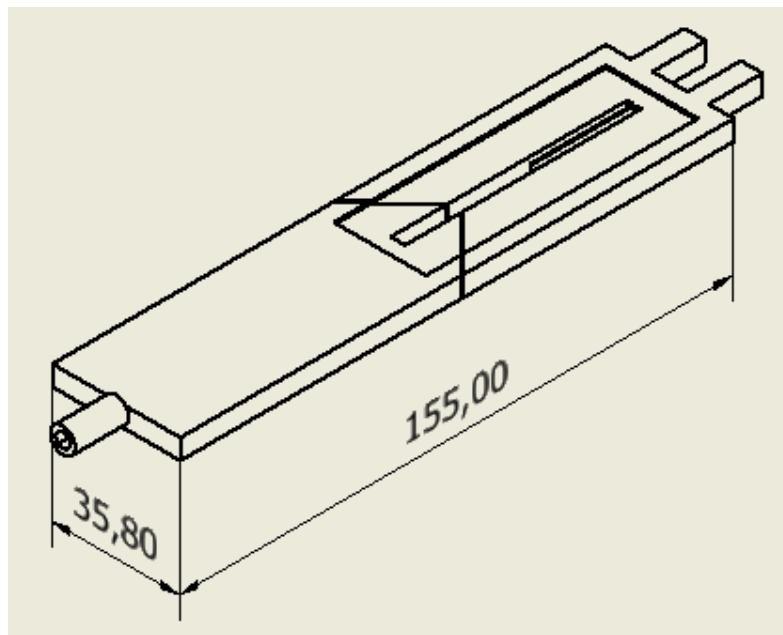
paredes y se alejen del centro de los canales. Este efecto es conocido como el efecto Sergé-Silberberg (Pang et al., 2020).

Imagen 11. Modelo 3D de un electrolizador Flow-By



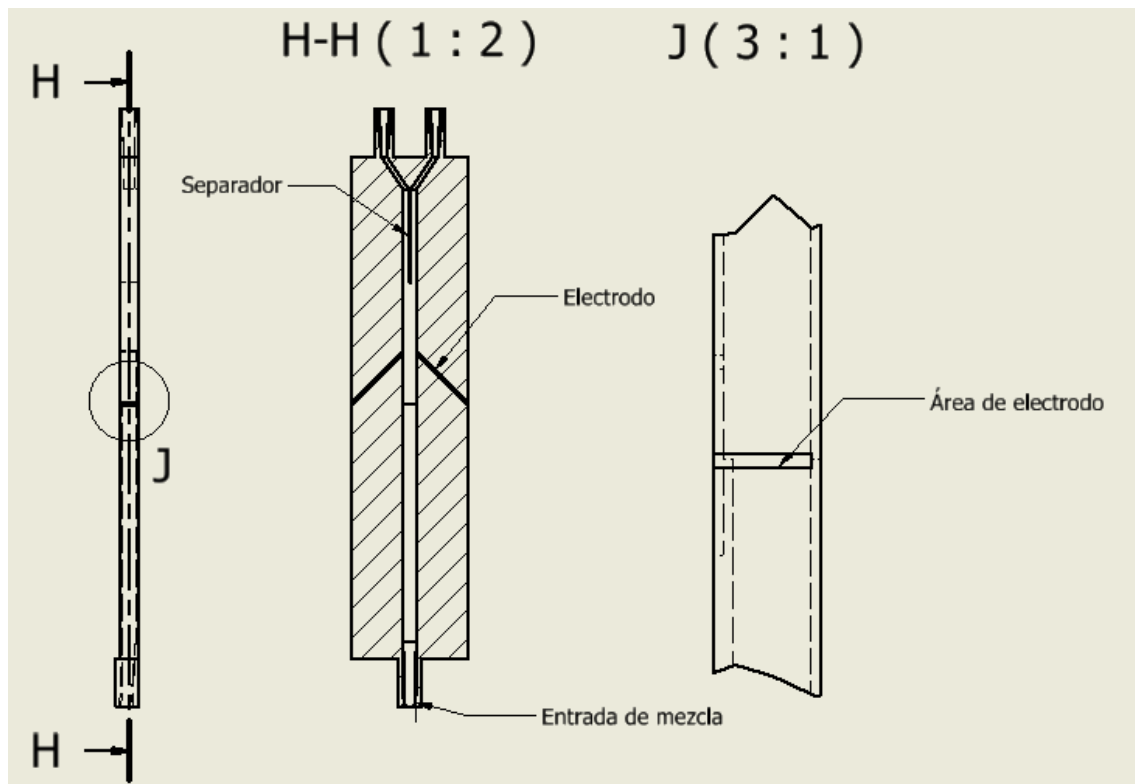
Fuente: Autor

Imagen 12 Medidas generales del electrolizador Flow By



Fuente: Autor

Imagen 13 Partes del electrolizador

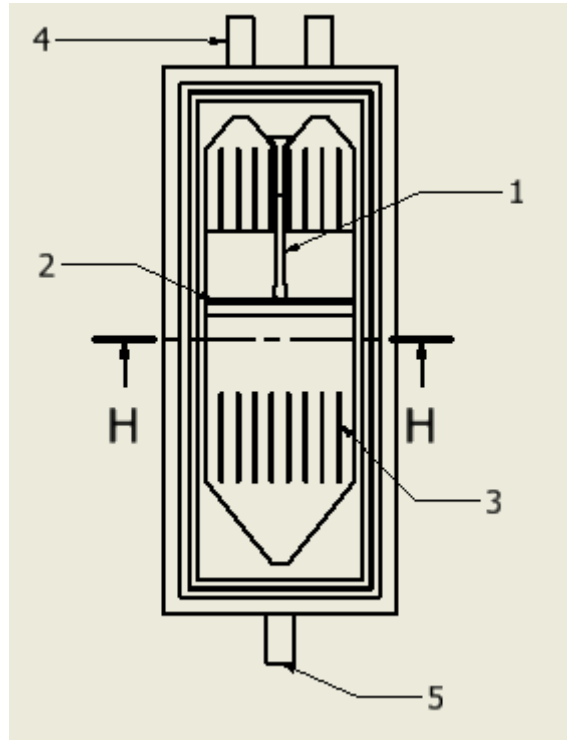


Fuente: Autor

4.2. ELECTROLIZADOR FLOW THROUGH

El electrolizador Flow Through se caracteriza porque los electrodos van de manera ortogonal al flujo del electrólito. La separación ocurre al mismo tiempo que las reacciones electroquímicas. Los electrodos de esta celda son mallas de hasta cincuenta hilos por pulgada, generalmente de titanio, lo que hace compleja y costosa su fabricación y construcción.

Imagen 14 Partes de electrolizador Flow Through

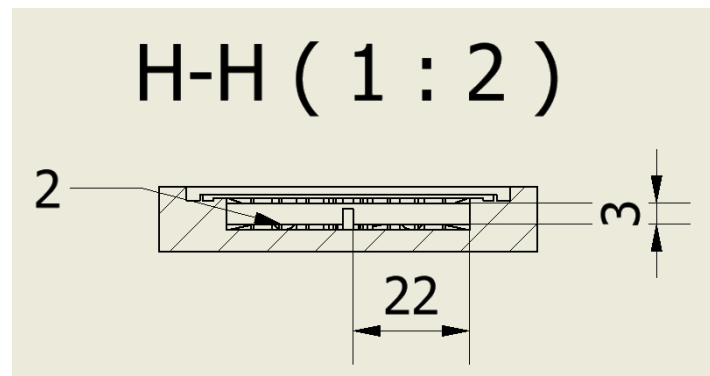


1. Separador 2 Electrodo 3 Canal de flujo 4 salida de gases de producción 5 Entrada de electrolito

Fuente: Autor

Los Canales de flujo permiten mantener siempre un flujo laminar, por eso se encuentran a la entrada y a la salida del electrolizador.

Imagen 15 Área del electrodo



Fuente: Autor

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE GASES PRODUCIDOS

Para diseñar el sistema de almacenamiento y medición de los gases producidos, se estima previamente la tasa de producción, lo que permite dimensionar adecuadamente los sistemas de almacenamiento, tanto de los productos (hidrogeno y oxígeno) como de la mezcla.

5.1. ESTIMACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN (FLOW-BY)

Teniendo un electrolito alcalino (KOH) los protones son reducidos en el cátodo para desarrollar H_2 y en el ánodo el agua es oxidada para desarrollar O_2 . Estas reacciones son conocidas como HER (hydrogen evolution reaction) y como OER (Oxygen evolution reaction) (Davis, 2019) y se dan de la siguiente manera:

En el cátodo:



En el ánodo:



La reacción total:



Para calcular la masa que se produce en el electrodo se usa la ley de Faraday (Daniel et al., 2019) que se presentan de la siguiente manera:

$$n = \frac{It}{vF} \quad (22)$$

Donde: n es la masa producida (moles), F es la constante de Faraday (Columbios), v es el número de valencia del ion de la sustancia en el cátodo, I es la corriente (Amperios) y t es el tiempo (segundos) que dura el experimento.

La corriente que circula por el electrodo se calcula como el área del electrodo por la densidad de corriente, la cual para electrolizadores Flow-By con la geometría seleccionada es reportada en "Framework for evaluating the performance limits of membraneless electrolyzers" (Pang et al., 2020) como $400 \frac{mA}{cm^2}$, el área de 5 mm de alto por el calibre (ancho) del electrodo que es de 1 mm. El tiempo asignado es de 30 minutos,

tiempo el cual se consideró suficiente para correr el experimento dado que solo se necesitan muestras de dos ml para análisis cromatográficos.

$$I = 400 \frac{mA}{cm^2} \cdot 0,1cm \cdot 0,5cm$$

$$I = 20 mA$$

Tabla 6 valores para ecuación de Faraday flow by

Termino (símbolo)	Magnitud
Corriente (I)	20 mA
Número de valencia (v)	2
Constante de Faraday	$96485 \frac{C}{mol}$
Tiempo	1800 s

Remplazando los valores en la ecuación (22) se tiene que:

$$n = 2,8 \times 10^{-4} moles$$

Para obtener la cantidad de hidrogeno producido en gramos este se multiplica por la masa molar de la molécula H_2 (Brown, 2008).

$$m(g) = n \cdot M_{H_2} \quad (23)$$

$$m = 5,64 \times 10^{-4} g$$

Una vez calculado la masa producida, se procede calcular el volumen ocupado por el hidrogeno gaseoso, necesario para el dimensionamiento de almacenamiento de productos; para ello, se aplica la ley de gases ideales de la siguiente forma:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (24)$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} \quad (25)$$

Donde: P es la presión atmosférica, n es el número de moles antes calculadas, R es la constante universal de los gases, V es el volumen ocupado por el gas y T es la temperatura a la que se encuentra el fluido. Los valores de presión y temperatura atmosférica son tomados desde el observatorio ambiental de Bogotá, con su sensor más próximo a la

universidad en la calle 60 con carrera 7 (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2024).

Tabla 7 Valores para ecuación de gases ideales flow by

Termino (símbolo)	Magnitud
Presión (P)	75,19 kPa
Constante universal de gases (R)	$8,314 \frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K}$
Temperatura (T)	25 °C
Moles (n)	$2,8 \times 10^{-4} \text{ moles}$

Se obtiene un volumen esperado de producción de $9,23 \times 10^{-6} m^3$ lo que equivale a 9,23 mL. Sabiendo la relación entre la producción de oxígeno y de hidrogeno, en la que por cada mol de hidrogeno se genera media de oxígeno diatómico (ecuación 21) se halla su producción de la siguiente manera:

$$n_{O_2} = \frac{n}{2} \quad (26)$$

$$V_{O_2} = \frac{n_{O_2} \cdot R \cdot T}{P} \quad (27)$$

El volumen ocupado por el oxígeno será de 4,61 mL.

5.2. ESTIMACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN (FLOW THROUGH)

El desarrollo matemático para la estimación de la tasa de producción en los electrolizadores Flow through es el mismo que en los electrolizadores Flow by, desarrollados anteriormente. Los valores de área del electrodo son de 22 mm de base por 3 mm de altura (ya que se usa el área trasversal al flujo) y la densidad de corriente es de $600 \frac{mA}{cm^2}$ la cual es la más alta reportada en las diferentes referencias bibliográficas (Hadikhani et al., 2021). Entonces:

$$I = 600 \frac{mA}{cm^2} \cdot 0,3cm \cdot 2,2cm$$

$$I = 396 mA$$

Tabla 8. Valores para ecuación de Faraday Flow Through

Termino (símbolo)	Magnitud
Corriente (I)	396 mA
Electrones de valencia (v)	2

Constante de Faraday (F)	$96485 \frac{C}{mol}$
Tiempo (t)	900 s
Masa molar (M)	$2,0159 \frac{g}{mol}$

Aplicando la ecuación (22) para obtener las moles producidas en el tiempo de 15 minutos (tiempo suficiente para producir más de dos mililitros de hidrogeno para pruebas cromatográficas) se tiene:

$$n = 1,85 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

Aplicando la ecuación (23) se obtiene la producción en gramos:

$$m = 3,72 \times 10^{-3} g$$

Aplicando la ley de los gases ideales (25) se calcula el volumen producido:

$$V = 60,9 \text{ mL}$$

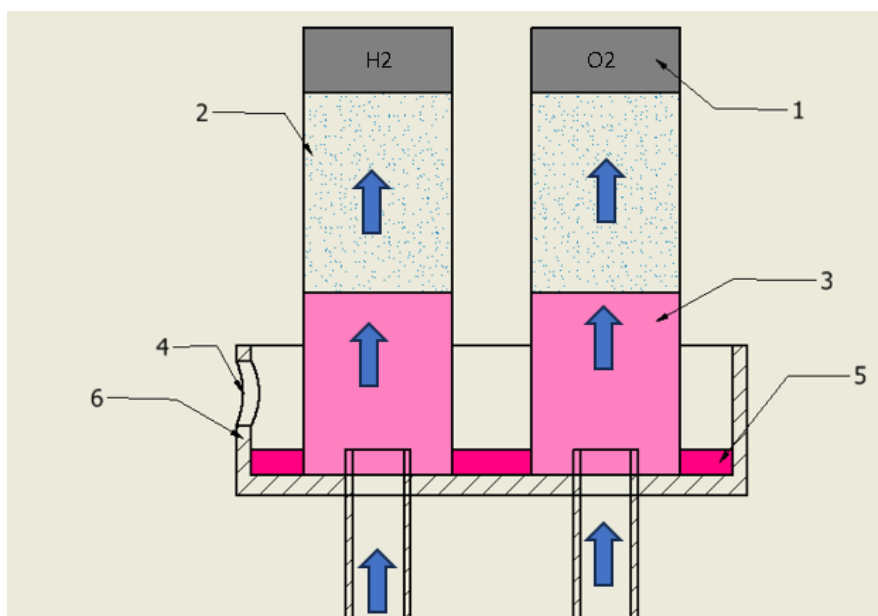
Aplicando las ecuaciones (26) y (27) se obtiene el volumen producido para el oxígeno:

$$V_{O_2} = 30,4 \text{ mL}$$

5.3. DISEÑO DE ALMACENAMIENTO

Los gases de producción no se almacenan en ningún tipo de recipiente a presión dado el riesgo explosivo que conlleva una posible mezcla de oxígeno e hidrogeno; por lo tanto, el diseño del almacenamiento se basa en un sistema de atrapamiento de gas por medio de líquido, en la que el recipiente se encuentra lleno de electrolito, a medida que se produce el gas (hidrogeno u oxigeno) este desplaza al electrolito (Imagen 16). A medida que el gas desplaza al electrolito, su volumen aumenta en la base de la pieza recolectora hasta llegar al rebosadero donde es conducido hacia un tanque de recolección de electrolito.

Imagen 16 Almacenamiento de gases de producción

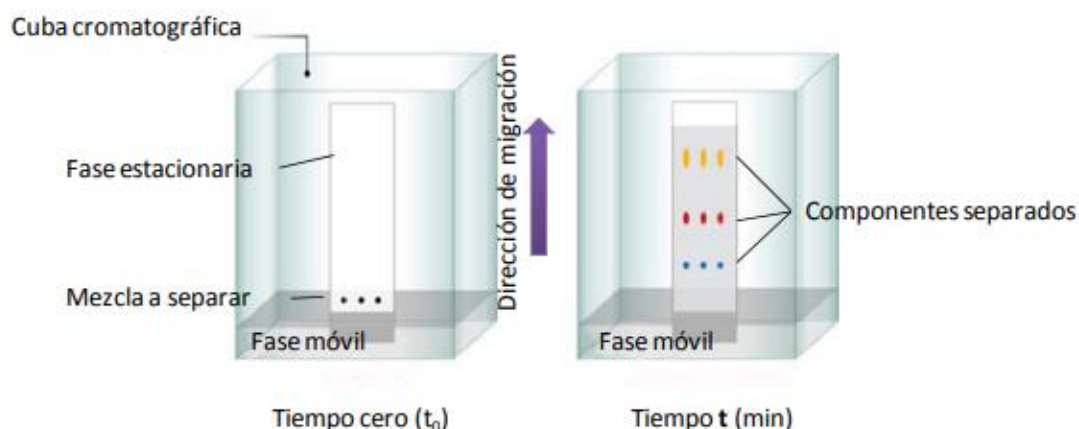


1. Embolo 2. Gas 3. Electrolito 4. Rebosadero 5. Electrolito en la base 6. Base del recolector
Fuente: Autor

5.4. PUREZA DEL HIDROGENO

La cromatografía es un proceso de separación en el que los componentes de una mezcla, disueltos en una fase móvil, se desplazan a través de una fase estacionaria con diferentes velocidades. Durante el proceso, los componentes interactúan momentáneamente con la fase estacionaria, lo que hace que se detengan temporalmente en su movimiento. Mientras tanto, los componentes que permanecen en la fase móvil continúan avanzando a la misma velocidad que ésta. La separación de los componentes no ocurre en una sola fase, sino que es el resultado del continuo intercambio entre ambas fases. Los componentes se separan cuando uno de ellos interactúa con la fase estacionaria de manera diferente, moviéndose más rápido o más lento que los demás. El tiempo que cada componente pasa en la fase estacionaria depende de su afinidad por esta fase bajo las condiciones experimentales específicas (Sgariglia et al., 2010)

Imagen 17 Representación gráfica de separación de componentes por cromatografía



Adaptado de “CROMATOGRFÍA: CONCEPTOS Y APLICACIONES” (figura) por Sgariglia et al., (2010)

La pureza del hidrogeno producido se determina gracias a la prueba de cromatografía de gases, dado que es la manera más precisa para determinar cuan pura es una muestra; es por eso, que el diseño del almacenamiento de productos tiene la capacidad para recoger muestras de cada experimento, generalmente se inyectan muestras superiores a $1 \mu L$ (Sparkman et al., 2011) en el equipo de cromatografía para el análisis.

6. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE MEZCLA

Ya definida la velocidad del fluido, se puede determinar la capacidad de los tanques de almacenamiento de la mezcla (agua-electrolito). Siguiendo las mismas pautas de determinar los parámetros críticos del sistema, se analizará para los dos tipos de electrolizadores.

6.1. ELECTROLIZADOR FLOW-THROUGH

Teniendo en cuenta los datos ya calculados como la velocidad del fluido (tabla 9), se procede a calcular el volumen del tanque de almacenamiento

Tabla 9. Datos del electrolizador Flow through

Termino (Símbolo)	Valor (unidad)
Base del electrodo (B)	22 mm
Altura del electrodo (H)	3 mm
Velocidad de la mezcla (v)	$0,53 m \cdot s^{-1}$

Retomando la definición de caudal, es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. Se calcula como la velocidad por el área de la sección transversal (Mott, 1996).

$$Q = v \cdot A \quad (28)$$

Donde Q es el caudal (en metros cúbicos sobre segundo ($m^3 \cdot s^{-1}$)), v es la velocidad del fluido (en metros sobre segundo ($m \cdot s^{-1}$)) y A es el área de sección transversal por el cual se mueve el fluido (en metros cuadrados (m^2)). Con esto presente, se puede hallar el caudal necesario para cada prueba como:

$$Q = v \cdot B \cdot H \quad (29)$$

Reemplazando los valores de la tabla 9 en la ecuación (29) se obtiene:

$$Q = 0,53 \frac{m}{s} \cdot 22 \times 10^{-3} m \cdot 3 \times 10^{-3} m$$

$$Q = 3,45 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 2,094 \frac{L}{min}$$

Sabiendo que la prueba dura 15 minutos, se obtiene el volumen del tanque de almacenamiento de mezcla de la siguiente manera:

$$V = Q \cdot t \quad (30)$$

$$V = 2,094 \frac{L}{min} \cdot 15 min$$

$$V = 31,49 L$$

Por lo que se necesitaría como mínimo un tanque con una capacidad de 32 litros para almacenar la mezcla de forma segura y con mezcla suficiente para correr una prueba.

6.2. ELECTROLIZADOR FLOW-BY

Para calcular el volumen mínimo del tanque que contiene la mezcla tanto de admisión como de recepción del rebosadero, el procedimiento es igual que el anterior. En la tabla 10 se muestran los datos necesarios.

Tabla 10. Datos necesarios para el electrolizador Flow-by

Termino (Símbolo)	Valor (unidad)
Base (B)	4 mm
Altura (H)	5 mm
Velocidad de la mezcla (v)	0,314 m $\cdot$ s ⁻¹

Aplicando la ecuación (29) para hallar el caudal, se tiene que:

$$Q = 0,314 \frac{m}{s} \cdot 4 \times 10^{-3} m \cdot 5 \times 10^{-3} m$$

$$Q = 6,28 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0,377 \frac{L}{min}$$

Teniendo en cuenta que cada prueba dura treinta minutos para tener un volumen considerable de productos (hidrogeno y oxigeno), el volumen mínimo del tanque debe ser de:

$$V = Q \cdot t$$

$$V = 0,377 \frac{L}{min} \cdot 30 min = 11,3 L$$

Por lo tanto, se necesita un tanque de por lo menos 12 L para almacenar suficiente mezcla para una prueba. Se puede observar que la condición crítica de volumen para los tanques de almacenamiento se encuentra en el electrolizador Flow-Through, ya que necesita un volumen mayor de mezcla para realizar una prueba.

7. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICO

Realizando una revisión bibliográfica sobre los diferentes trabajos relacionados a electrolizadores sin membrana, se obtienen diferentes valores para los voltajes y densidades de corriente. En el artículo de hadikhani, se utilizan voltaje entre 3V y 3,2 V obteniendo una densidad de corriente entre $300 \frac{mA}{cm^2}$ y $600 \frac{mA}{cm^2}$ (Hadikhani et al., 2021). Por otra parte, J.T Davis utilizó 3V, teniendo como consecuencia una densidad de corriente de $150 \frac{mA}{cm^2}$ (Davis, 2019). O'Neil utiliza para sus estudios 2,5 V por lo que obtiene una densidad de corriente de $300 \frac{mA}{cm^2}$. Dado que, el sistema debe tener la capacidad de funcionar con cualquier tipo de electrolizador, se toman los valores más altos de voltaje y de densidad de corriente los cuales son el caso crítico.

$$J = 300 \frac{mA}{cm^2}$$

$$V = 3,2 V$$

Para hallar la corriente mínima suministrada por la fuente, se multiplica por el área del electrolizador Flow through (27):

$$I = J \cdot A_{ft} \quad (31)$$

$$I = 396 mA$$

Para hallar la potencia mínima de la fuente (28); además, se multiplica por dos porque los electrolizadores Flow through son dos electrodos paralelos al flujo:

$$P = I \cdot V \cdot 2$$

(32)

$$P = 2,53 \text{ W}$$

VII. SELECCIÓN DE EQUIPOS

Una vez realizados todos los cálculos necesarios para el diseño del banco de pruebas, se procede a seleccionar los equipos correspondientes para cada uno de los módulos descritos previamente. Como se calculó previamente, las condiciones críticas del sistema están determinadas por el electrolizador de tipo "Flow Through", por lo que la selección de los equipos se basará en los criterios establecidos para este.

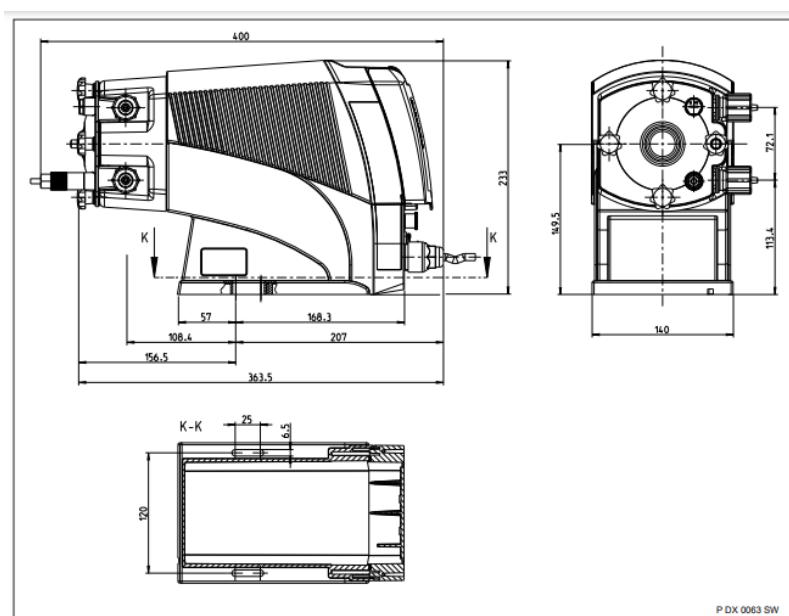
1. SISTEMA DE FLUJO DE ELECTROLITO

La condición crítica en el sistema de flujo de electrolito es la velocidad del fluido. Junto con las bajas pérdidas de energía, esta es una de las principales variables a considerar al seleccionar la bomba. En este caso, se opta por una bomba peristáltica, ya que su diseño elimina el riesgo de corrosión debido al contacto directo entre la bomba y la mezcla (agua-electrolito). Además, se elige una bomba peristáltica con control digital para tener un mayor control sobre la velocidad del fluido y asegurar que esta se mantenga constante en todo momento.

Se ha optado por la bomba peristáltica DULCO flex Control, DFXa, suministrada por la distribuidora Prominent. Esta bomba garantiza un caudal constante de hasta 65 litros por hora, con una presión de trabajo de 7 bares (700 kPa) hasta 30 litros por hora, y de 5 bares (500 kPa) a su capacidad máxima de 65 litros por hora.

Se utiliza manguera de polipropileno de 3/8" de pulgada para el transporte de la mezcla. Esto dada su buena compatibilidad química con el hidróxido de potasio a cualquier temperatura (inferior a su temperatura de fusión) dado que hay reacciones de electrolisis que pueden llegar a alcanzar los 60 °C.

Imagen 18. Representación general bomba Dulco flex

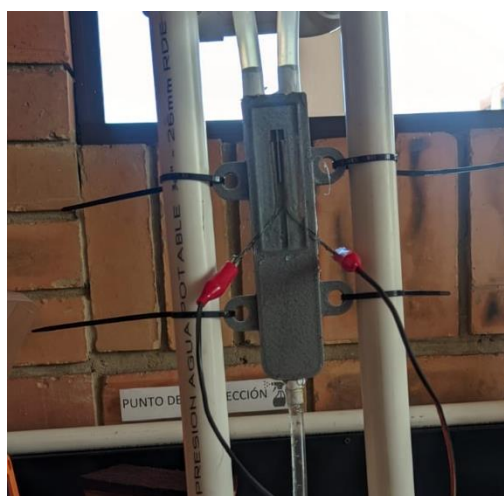


Adaptado de “Instrucciones de uso Bomba de dosificación peristáltica DULCO flex Control, DFXa” por Prominent

2. CELDA ELECTROLIZADORA

Se decidió fabricar el electrolizador Flow-by debido a su simplicidad en el modelado, el uso de materiales de fácil acceso y la disponibilidad de electrodos de láminas de acero al níquel de 1 mm de calibre, fáciles de adquirir. El modelo 3D fue diseñado en Autodesk Inventor, tomando como referencia el modelo propuesto por Pang et al. (2020). La celda se fabricó mediante impresión 3D en ABS, con un refuerzo de tres filamentos. En su parte superior, incorpora un cristal de 5 mm de grosor, que permite observar con detalle las burbujas generadas por la reacción, ya que son esenciales para la creación de modelos computacionales para estudiar el comportamiento del electrolizador.

Imagen 19. Electrolizador



Fuente: Autor

La celda debe mantenerse en posición vertical para asegurar su funcionamiento adecuado, por lo que se diseñó una base que la sostiene, así como al recolector de productos. La base fue fabricada en PVC de 3/4" de pulgada y tiene una altura de 40 cm. Es desmontable, lo que permite adaptarla según las necesidades, y suficientemente liviana para facilitar su manipulación.

Imagen 20. Base para el electrolizador y recolector



Fuente: autor

3. ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO

Como ya se ha mencionado, el almacenamiento del producto se basa en un sistema de atrapamiento de gas por medio de desplazamiento de líquido. Para todo el sistema de almacenamiento se creó una base con dos aperturas en la parte inferior que da conexión a la tubería que viene desde el electrolizador. La base también cuenta con un rebosadero, permitiendo que el sistema funcione.

Imagen 21. Recolector



Fuente: Autor

Por otro lado, los recipientes utilizados para almacenar el gas mediante columnas de agua son jeringas de 70 ml, de fácil adquisición y bajo costo. Lo más destacable de estas jeringas es que su émbolo, al estar fabricado en material polimérico (caucho), permite extraer muestras para realizar diversos estudios sobre los productos tales como cromatografías de gases.

Imagen 22. Almacenamiento de gases de producción



Fuente: Autor

4. ALMACENAMIENTO DE MEZCLA

Comercialmente, los tanques de polipropileno están disponibles en capacidades de 20 y 50 litros. Aunque el de 50 litros es considerablemente mayor al volumen requerido, es el único que cumple plenamente con las especificaciones de capacidad. Estos tanques son fáciles de adquirir y económicos, debido a su alta demanda en el ámbito doméstico por sus múltiples usos. Además, su compatibilidad química con el hidróxido de potasio elimina el riesgo de fugas en la mezcla, lo que garantiza un almacenamiento seguro.

Imagen 23. Tanques de almacenamiento de mezcla



Fuente: Autor

5. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICO

Las fuentes de alimentación eléctrica que se encuentran comercialmente tienen una potencia de 30 watts. Además, esta debe poder regular el voltaje o la corriente (depende de la aplicación) de salida, por lo que se eligió una fuente regulada WEP 303D de 30 Voltios/ 3 Amperios, una referencia económica y que cumple con los requisitos del proyecto.

Imagen 24. Fuente de poder



Fuente: Autor

VIII. PROTOTIPO Y PUESTA EN MARCHA

1. PRESUPUESTO FINAL

Este proyecto fue financiado por la universidad a través de su programa de desarrollo e investigación FODEIN, lo que permitió un buen presupuesto de inversión para la construcción y desarrollo del proyecto. A continuación, se muestra el presupuesto usado:

Tabla 11. Tabla de presupuesto

Artículo	Cantidad	Valor total
Caneca de polipropileno de 50 L	2	\$ 60.000
Manguera de polipropileno de 3/8" x 3 metros	1	Incluido con bomba peristáltica
Fuente de poder PS-303D	1	\$ 295.000
Bomba peristáltica DULCO flex Control 65 lph	1	\$ 6'638.000
Electrolizador impreso en ABS	1	\$ 90.000
Jeringas de 50 ml	2	\$ 3.000
Pieza de recolección impresa en ABS		\$ 50.000
Tubo de PVC 3/4" x 3m	1	\$ 7.000
TOTAL	-	\$ 7'143.000

Imagen 25. Banco de pruebas



Fuente: autor

2. PROTOCOLO DE EJECUCIÓN DE PRUEBAS

2.1. PRECAUCIONES

El hidróxido de potasio puede ser peligroso si no se maneja adecuadamente. Es fundamental utilizar los elementos de seguridad apropiados, como gafas de protección, guantes y mascarilla, ya que el contacto con la piel o los ojos puede provocar lesiones graves, como quemaduras o úlceras. Entre los síntomas derivados del contacto con el hidróxido de potasio se incluyen ardor, dolor intenso y, si entra en los ojos, pérdida de visión. En caso de contacto, se debe enjuagar inmediatamente la zona afectada con abundante agua durante varios minutos.

2.2. EJECUCIÓN DE PRUEBAS

Asegúrese de que todas las conexiones de las mangueras estén correctamente instaladas y selladas con teflón. Una vez confirmado que el sistema está libre de fugas, proceda a conectar la salida de la fuente a cada uno de los electrodos. Es importante encender la bomba antes que la fuente de alimentación, ya que se debe purgar el sistema para evitar la presencia de burbujas. Durante este proceso de purgado, la bomba hará circular la mezcla a alta velocidad, lo que también permitirá llenar los recipientes de almacenamiento del producto.

Con las conexiones, los recipientes de almacenamiento y la fuente preparados, proceda a programar la bomba con la velocidad adecuada para el experimento y ajuste el voltaje o amperaje según sea necesario. Las burbujas generadas pueden observarse a través del vidrio frontal de la celda (electrolizador), lo que le permitirá determinar si es necesario realizar un estudio HSV para el modelado computacional CDF.

Al finalizar las pruebas, es esencial limpiar todos los equipos e instrumentos con un trapo y agua limpia para evitar riesgos a personas ajenas al banco de pruebas, dado que este se encuentra en el área de soldadura. Los equipos, como la bomba y la fuente, deben ser almacenados bajo llave por razones de seguridad. La llave debe ser solicitada al encargado de los laboratorios del día.

Si la mezcla utilizada ya no es necesaria, la universidad tiene un convenio con una empresa especializada en el manejo de residuos químicos. Esta mezcla debe ser almacenada en galones para su tratamiento posterior.

2.3. TASA DE PRODUCCIÓN Y PUREZA

El sistema permite la recolección de muestras de cada uno de los recipientes de almacenamiento de gases para su posterior análisis. En el caso de la pureza, las muestras pueden ser enviadas al laboratorio para realizar estudios cromatográficos, con el fin de determinar el porcentaje de pureza del hidrógeno producido.

Por otro lado, el fenómeno de cruce gaseoso, estrechamente relacionado con la tasa de producción y la pureza, puede ser analizado mediante videografía de alta velocidad (HSV). Esta técnica, combinada con algoritmos de procesamiento de imágenes y principios de ingeniería electroquímica, permite cuantificar y caracterizar de manera precisa el rendimiento del electrolizador. La aplicación de HSV es esencial para evaluar

la eficiencia de la evolución de los gases, considerando variables como el tiempo operativo, la densidad de corriente y, finalmente, la tasa de producción de hidrógeno.

El sistema ha sido diseñado específicamente para facilitar la toma de videos mediante HSV, lo que permite estudiar tanto la tasa de producción como el cruce de gases. Esta técnica ofrece una visión detallada y en alta resolución del proceso, permitiendo observar con claridad la formación y comportamiento de las burbujas dentro del electrolizador.

La eficiencia de evolución de gases se define como:

$$GEE = \frac{V_{HSV} \cdot \eta \cdot F}{i \cdot A_e \cdot MW_{H_2} \cdot \rho} \quad (33)$$

Donde V_{HSV} es el volumen de H_2 en el flujo de mezcla medido empíricamente por el volumen de las burbujas tomado por el HSV en un periodo de tiempo, η es el numero de electrones transferidos por molécula de H_2 , F es la constante de Faraday, i es la densidad de corriente, A_e es el área del cátodo, MW_{H_2} es el peso molecular del H_2 , y ρ_{H_2} es la densidad de H_2 .

3. VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Se realizaron pruebas para validar la funcionalidad del diseño en dos ocasiones:

- La primera prueba de validación del diseño y arranque del sistema se hizo con agua sin ningún tipo de electrolito que aumentara su conductividad eléctrica. Las pruebas se realizaron alrededor de 20 minutos, con una producción aproximada de menos de un mililitro en el recipiente que almacena el hidrogeno. Esta prueba solo era para determinar errores y posibles fallos.
- La segunda prueba se realizó utilizando agua sin destilar, mezclada con hidróxido de potasio en una proporción de 4 litros de agua por 60 g de hidróxido de potasio (0,5 M). Las pruebas se extendieron durante 20 minutos, obteniendo muestras de 4 mililitros en el contenedor de oxígeno y 2 mililitros en el recipiente de hidrógeno. El sistema de rebose funcionó adecuadamente, permitiendo que el electrolito desplazado por los gases generados se redirigiera al segundo tanque de almacenamiento. Además, no se observaron fallas en los componentes del sistema, como el electrolizador, las tuberías ni el sistema de recolección, que estuvieron en contacto con la mezcla.
- Se pudieron observar las burbujas generadas durante el proceso de electrólisis, lo que confirma que el cristal utilizado en la parte frontal del electrolizador cumple su función correctamente, lo cual es relevante para futuras pruebas de HSV para modelado computacional.

Imagen 26. Burbujas de producción



Fuente: Autor

IX. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto fue diseñar y construir un banco de pruebas para el estudio de la producción de hidrógeno mediante electrólisis utilizando electrolizadores sin membranas. A lo largo del desarrollo, se lograron todas las metas planteadas, incluyendo la construcción de un sistema funcional que cumplió con los estándares de seguridad, así como la realización de pruebas que confirmaron su buen funcionamiento.

Las pruebas realizadas demostraron la producción de hidrógeno y oxígeno en cada uno de los electrodos, y el sistema de almacenamiento de gases funcionó correctamente, permitiendo la recolección de muestras para estudios de laboratorio.

Un desafío importante fue la incompatibilidad del material PLA utilizado en el electrolizador, que se resolvió con la elección de un material más adecuado para soportar las altas temperaturas de la electrólisis.

Este banco de pruebas no solo facilita la evaluación de la producción de hidrógeno, sino que también sienta las bases para futuros desarrollos, especialmente en el campo de los electrolizadores sin membrana, cumpliendo con los requerimientos planteados por el grupo de investigación GEAMEC de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

En conclusión, el proyecto alcanzó todos los objetivos establecidos, permitiendo no solo la creación del banco de pruebas, sino también la aplicación de conocimientos clave en el área de la mecánica de fluidos, lo que contribuirá a la investigación y desarrollo de electrolizadores sin membrana.

X. REFERENCIAS

- Agueda Casado, E., GÓMEZ MORALES, T., & MARTÍN NAVARRO, J. (2012). *Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Brijaldo, M. H., Castillo, C., & Pérez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 23(2), e30111155. <https://doi.org/10.25100/iyv.v23i2.11155>
- Brown, T. (s/f). *Química: la ciencia central*.
- Bueche, F. (2021). *Ciencias físicas*. Reverte.
- Coulson, J. M., Richardson, J. F., & Backhurst, J. R. (1983). *Ingeniería química. Diseño de reactores químicos* (Vol. 3). Reverté.
- Daniel, B. C. C., Leonardo, A. T., Stiven, P. M. F., Carlos, L. W., & Fabio, H. F. M. (2019). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA GENERADOR DE HIDRÓGENO PARA EMBARCACIONES PESQUERAS. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, 7(12), 92. <https://doi.org/10.5380/relainep.v7i12.70709>
- Davis, J. T. (2019). *Membraneless Electrolyzers for Solar Fuels Production*.
- De Ercilla, S. B. (2003). *Física general*. Editorial Tébar.
- Diaz Saenz, C. (2020). *Análisis técnico económico de tecnología de electrolisis tipo PEM para la producción de hidrógeno en Colombia*. <http://hdl.handle.net/1992/48973>
- Duarte, C. A., & Niño, J. R. (2004). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Univ. Nacional de Colombia.
- Esposito, D. V. (2017). Membraneless Electrolyzers for Low-Cost Hydrogen Production in a Renewable Energy Future. En *Joule* (Vol. 1, Número 4, pp. 651–658). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.003>
- Hadikhani, P., Hashemi, S. M. H., Schenk, S. A., & Psaltis, D. (2021). A membrane-less electrolyzer with porous walls for high throughput and pure hydrogen production. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(9), 2419–2432. <https://doi.org/10.1039/D1SE00255D>
- Harper, G. E. (1990). *Fundamentos de electricidad: Instrumentos eléctricos* (Vol. 5). DO NOT USE.
- Haynes M, W. (2014). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (W. M. Haynes, Ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17118>
- Himmelblau, D. M. (1997). *Principios básicos y cálculos en ingeniería química*. Pearson Educación.

- Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- Isgró, M. (2015). *EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO: SU OBTENCIÓN POR ELECTRÓLISIS*.
<http://hdl.handle.net/20.500.12272/3266>
- Jul, C., Sánchez Delgado, M., & Rodríguez Mayor, M. L. (2018). Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. En *An. Real. Acad. Doct* (Vol. 3).
<https://www.radoctores.es/doc/2V3N1-CLEMENTE%20-%20produccion%20de%20hidrogeno.pdf>
- Lamigueiro, O. P. (2011). *Energía Solar Fotovoltaica*.
<https://www.researchgate.net/publication/249012821>
- Macarulla, J. M., & Goñi, F. M. (1994). *Bioquímica humana. Curso básico*. (Vol. 5). Reverté.
- Malek, A., Lu, X., Shearing, P. R., Brett, D. J. L., & He, G. (2022). Strategic comparison of membrane-assisted and membrane-less water electrolyzers and their potential application in direct seawater splitting (DSS). En *Green Energy and Environment*. KeAi Publishing Communications Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.06.006>
- Merino, F. A. (2006). *Manual de termodinámica*. Vision Libros.
- Mírez, J. (2012). *SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA*.
https://www.researchgate.net/publication/286625730_SISTEMAS_DE_ALMACENAMIENTO_DE_ENERGIA
- Mott, R. L. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*. Pearson Educación.
- Mustafa-Moraes, N., Holanda-Bezerra, U., Moya-Rodríguez, J. L., & Cabral-Leite, J. (2016). El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las centrales térmicas. Estudio de caso. *DYNA (Colombia)*, 83(199), 218–224.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.51384>
- O’Neil, G. D., Christian, C. D., Brown, D. E., & Esposito, D. V. (2016). Hydrogen Production with a Simple and Scalable Membraneless Electrolyzer. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(11), F3012–F3019.
<https://doi.org/10.1149/2.0021611jes>
- Pang, X., Davis, J. T., Harvey, A. D., & Esposito, D. V. (2020). Framework for evaluating the performance limits of membraneless electrolyzers †. *Energy Environ. Sci*, 13, 3663. <https://doi.org/10.1039/d0ee02268c>
- Pérez, J. V., & Pérez, S. V. (2014). *Electromagnetismo: Serie Universitaria Patria*. Grupo Editorial Patria.
- Rashid, M. M., Al Mesfer, M. K., Naseem, H., Danish, M., & others. (2015). Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water

- electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 4(3), 2249–8958.
- Rodriguez, R. M., Silva, G. Da, & Urbina, L. (2022). Estudio del proceso de electrólisis para la producción de Hidrógeno Verde, a partir del agua de mar. *Tekhné*, 25(3), 01–22. <https://doi.org/10.62876/TEKHN.V25I3.5542>
- Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá. (2024, julio 9). *Observatorio Ambiental de Bogotá*. Presión Atmosférica. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/home/map>
- Senner, A. (1992). *Principios de electrotecnia*. Reverte.
- Sgariglia, M. A., Soberon, J. R., Sampietro, D. A., & Vattuone, M. A. (2010). *Cromatografía: conceptos y aplicaciones*.
- Sparkman, O. D., Penton, Z., & Kitson, F. G. (2011). *Gas chromatography and mass spectrometry: a practical guide*. Academic press.
- Streblau, M., Aprahamian, B., Simov, M., & Dimova, T. (2014). The influence of the electrolyte parameters on the efficiency of the oxyhydrogen (HHO) generator. *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, 1–4.
- Trujillo, C. A. (2007). *Técnicas y medidas básicas en el laboratorio de química*. Universidad Nacional de Colombia.
- Xu, Y., Wang, C., Huang, Y., & Fu, J. (2021). Recent advances in electrocatalysts for neutral and large-current-density water electrolysis. *Nano Energy*, 80, 105545. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105545>