



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Química

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado



Maestría en Ingeniería Química

Título de tesis

“Modelación y simulación de los fenómenos hidrodinámicos en un sistema de electrólisis alcalina usando CFD”

que presenta:

I.Q. Graciela Luna Luna

para obtener el grado de:

Maestría en Ingeniería Química

Asesor de tesis:

Dra. Mayra Ruiz Reyes

Coasesor de tesis:

Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

H. Puebla de Z. octubre de 2021

*Dedicado a las personas
que nunca me dejaron caer.*

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por la oportunidad de continuar con mi formación académica, profesional y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para llevar a cabo mis estudios de maestría.

A la Doctora Mayra Ruiz Reyes y el Doctor Francisco Manuel Pacheco Aguirre, gracias por compartir su tiempo, dedicación y conocimiento, también les agradezco su paciencia y consejos a lo largo de este trabajo.

A mi comité evaluador, el Doctor Gamaliel Che y el Doctor Irving I. Ruiz López, por su tiempo, sugerencias y valiosas recomendaciones en la revisión de este trabajo.

Resumen

En el presente trabajo se llevó a cabo la modelación en 3-D y simulación del proceso de electrólisis alcalina considerando la hidrodinámica del sistema, utilizando COMSOL Multiphysics para realizar las simulaciones en CFD (Dinámica de Fluidos Computacional por sus siglas en inglés).

La primera parte del trabajo consistió en caracterizar el sistema, adquiriendo las medidas y capacidades del equipo objetivo que es un reactor estándar comercial de dos electrodos. El siguiente paso involucró la determinación de la función específica de los componentes que conforma al sistema de reacción. Por otro lado, este trabajo también aborda una parte experimental en donde inicialmente se pretende obtener datos como tamaño y distribución de burbujas en el sistema de electrólisis, estos experimentos se capturaron en videos HD con el fin de poder efectuar posteriormente un análisis de imagen.

Una vez que se tiene la información suficiente del reactor se procedió al desarrollo digital del modelo en 3D basado en la plataforma SolidWorks 2017 (CAD). El modelo desarrollado se exportó al software de simulación COMSOL Multiphysics en donde se establecieron los parámetros y variables necesarios para el modelo de flujo de fluidos que posteriormente permitió al software desarrollar múltiples soluciones.

Finalmente, el modelo fue capaz de reproducir el comportamiento detectado durante el proceso de electrolisis en el interior del reactor, las diferentes simulaciones realizadas permitieron observar el comportamiento del electrólito desde la alimentación hasta el momento de descarga del reactor, además de poder observar la trayectoria en la parte interna del reactor.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
NOMENCLATURA.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	9
HIPÓTESIS	11
OBJETIVOS.....	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos	11
1. CAPÍTULO I.....	12
1.1 Hidrógeno y formas de obtención.....	13
1.2 Electrólisis	14
1.2.1 Electrolizador	14
1.2.2 Electrolito.....	18
1.2.3 Burbujas	19
1.3 Simulación	21
1.3.1 CFD	22
1.3.1.1 Pre-proceso	24
1.3.1.2 Solucionador o procesamiento	25
1.3.1.3 Post-proceso	25
1.3.2 Malla computacional.....	25
1.3.2.1 Mallas estructuradas	26
1.3.2.2 Mallas no-estructuradas.....	26
2. CAPÍTULO II	28
2.1 Caracterización	29
2.1.1 Proceso	29
2.1.2 Electrolizador	31
2.2 Experimentación	32

2.3 Simulación	35
3. CAPÍTULO III	38
3.1 Caracterización del sistema.....	39
3.2 Experimentación	41
3.3 Simulación	45
CONCLUSIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA	54
APÉNDICE A	59
ANEXO	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Funcionamiento de un electrolizador PEM (Ursúa et al., 2012).....	15
Figura 1.2. Funcionamiento de un electrolizador SOEC (Ursúa et al., 2012).....	16
Figura 1.3. Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino (Ursúa et al., 2012).....	17
Figura 1.4. Movimiento ascendente de burbujas y recirculación del flujo en la parte central. (Abdelouahed et al., 2014).	19
Figura 1.5. Burbujas envolviendo al electrodo (Vogt & Balzer, 2005).	20
Figura 1.6. Disciplinas que involucran CFD (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).....	23
Figura 1.7. Estructuras de la matriz para una malla estructurada (Anderson Jr. et al., 2009)....	26
Figura 1.8. Estructuras de la matriz para una malla no-estructurada (Anderson Jr. et al., 2009).	27
Figura 2.1. Metodología general del trabajo.....	29
Figura 2.2. Módulo de electrólisis alcalina.....	30
Figura 2.3. Sistema de electrólisis a) vista lateral, b) vista frontal.....	31
Figura 2.4. Primera parte de experimentos.....	33
Figura 2.5. Segunda parte de experimentos.....	34
Figura 2.6. Arreglo experimental vista superior, a) y b), posición para grabar superficie de ánodo y cátodo respectivamente.....	34
Figura 2.7. a) Imagen obtenida de la cámara, b) Utilizando algoritmo de Python de localización de burbujas, c) Burbujas localizadas.	35
Figura 2.8. Diagrama de selección de COMSOL Multiphysics.	36
Figura 2.9. Diagrama de electrólisis.....	37
Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de la obtención de Hidrógeno.....	39
Figura 3.2. Sistema de electrólisis alcalina.....	40
Figura 3.3. Componentes del sistema de electrólisis.....	40
Figura 3.4. Diagrama lateral del sistema de reacción.....	41
Figura 3.5. Generación de gas a diferentes voltajes.....	42
Figura 3.6. Variación de voltaje y generación de burbujas.....	42
Figura 3.7. Cantidad de burbujas en el ánodo a) y cátodo b) en relación con el tiempo de cada prueba.	43

Figura 3.8. Cantidad de burbujas en el ánodo a) y cátodo b) en relación con el voltaje suministrado	43
Figura 3.9. Etapas de desarrollo de una burbuja.....	44
Figura 3.10. Generación continua de burbujas de gas a 1.7 V, a) t=0 seg., b) t=30 seg.	44
Figura 3.11. Generación de burbujas a) t = 0 seg, b) 8.1 seg, c)11.7 seg.....	45
Figura 3.12. Diagrama 3D de electrolizador en programa CAD, a) perfil, b) vista explosionada.	46
Figura 3.13. a) electrolizador, b) dibujo exportado a COMSOL Multiphysics, c) malla generada en COMSOL Multiphysics.....	46
Figura 3.14. Simulaciones de hidrodinámica, campos de velocidad de entrada a) vista lateral b) vista frontal.....	47
Figura 3.15. Interior del electrolizador 3D en SolidWorks.....	48
Figura 3.16. Interior del electrolizador 3D, a) SolidWorks, b) exportado a COMSOL Multiphysics	48
Figura 3.17. Interior del electrolizador 3D en COMSOL Multiphysics a) asignación de material, b) malla gruesa.....	49
Figura 3.18. Interior del electrolizador 3D en COMSOL Multiphysics con línea de flujo: campo de velocidad, magnitud de velocidad (m/s).....	49
Figura 3.19. Electrolizador con separación.....	50
Figura 3.20. Secuencia de imágenes que muestran el comportamiento de dos burbujas	50
Figura 3.21. Secuencia de imágenes que muestran la interfaz de dos burbujas antes y después de que la burbuja golpee la superficie	51
Figura 3.22. Secuencia de imágenes que muestran la interfaz de ocho burbujas.....	52
Figura 3.23. Comportamiento de las burbujas en la parte superior del reactor.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha de componente: Placa de acrílico.	59
Tabla 2. Ficha de componente: Empaque (O-ring).	60
Tabla 3. Ficha de componente: Electrodo.	61

NOMENCLATURA

Letras romanas

A	área del electrodo
I	corriente, A
i	densidad de corriente
p	parámetro relacionado con la resistencia óhmica
q	parámetro relacionado con la resistencia óhmica
r	parámetro relacionado con la resistencia óhmica del electrolito
s	coeficiente de sobretensión en electrodos
t	tiempo
T	temperatura, ° C
u	velocidad
U	voltaje, V

Letras griegas

μ :	viscosidad
ρ :	densidad

Subíndices

H_2	hidrógeno puro
H_2O	agua pura
O_2	oxígeno puro
rev	reversible

Acrónimos

<i>DC</i>	Corriente eléctrica directa
<i>CFD</i>	Dinámica de Fluidos Computacional
<i>KOH</i>	Hidróxido de potasio
<i>PEM</i>	Electrolizador de Membrana de Intercambio de Protones
<i>SOEC</i>	Celda Electrolítica de Óxido Sólido
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sodio

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles han provocado un aumento en la generación de gases nocivos que dañan al ambiente, por lo que se buscan combustibles alternos como una opción más factible para la disminución de los contaminantes. Una de las propuestas es el uso de hidrógeno generado a partir de electrólisis del agua en sistemas de reacción conocidos como reactores electrolíticos, su versatilidad reside en la simplicidad operacional.

La producción de hidrógeno (H_2) a partir de la electrólisis ha sido ampliamente estudiada debido a que constituye la técnica más efectiva para la disociación del agua (Nikolaidis & Poullikkas, 2017), este proceso se realiza en una unidad conocida como electrolizador, el cual tiene una disposición que consiste en dos electrodos (un cátodo y un ánodo), los cuales usualmente se encuentran inmersos en una solución electrolítica de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH), la cual permite una mejor transferencia de cargas eléctricas entre los electrodos (Milewski et al., 2014), debido a que la reacción es endotérmica, la energía requerida es proporcionada por una corriente eléctrica directa (DC) (Ursúa et al., 2009).

No obstante, aunque los electrolizadores se han utilizado durante décadas los estudios realizados a este tipo de reactores es desde la perspectiva de la termodinámica de la reacción, el comportamiento eléctrico del sistema, así como los materiales empleados para los electrodos, sin embargo, todavía hay una necesidad de mejorar aspectos como la eficiencia ya que durante la reacción se pueden causar diferentes problemas en el electrolizador, tales como: corrosión de materiales y disminución de la eficiencia, esta última causada por diferentes factores (Carreras & Amores, 2014), como lo menciona Ph Mandin et al., en 2009 surge la necesidad de realizar un estudio más extenso considerando los fenómenos hidrodinámicos que se llevan a cabo dentro del sistema, ya que la eficiencia está estrechamente relacionada con el comportamiento hidrodinámico de las cortinas de burbujas, debido a que durante el proceso de electrólisis se generan burbujas en ambos electrodos, las cuales aceleran el flujo de electrolito cerca del electrodo y mejoran la agitación, sin embargo, también modifican la aceleración dentro del sistema causando perturbaciones en el campo eléctrico y de esta manera afectando la densidad de corriente eléctrica.

Asimismo, las burbujas actúan como aislantes eléctricos en movimiento, lo que afecta la distribución de densidad de corriente eléctrica y a su vez aumenta la caída de voltaje a través del reactor (Hreiz et al., 2015b).

Debido a que el estudio de este tipo de sistemas es complicado, se ha optado por encontrar otro tipo de solución a estos problemas, convirtiendo al modelado en una herramienta útil de mejora y optimización para fomentar el diseño adecuado de electrolizadores alcalinos (Carreras & Amores, 2014), del mismo modo, la simulación en CFD es un gran complemento para la solución de los modelos propuestos.

HIPÓTESIS

El modelo propuesto y resuelto bajo un esquema de simulación de CFD para el sistema de reacción de electrólisis alcalina proporcionará información para realizar un análisis del sistema, además, permitirá estudiar el efecto de los fenómenos hidrodinámicos involucrados durante el proceso, de esta manera se podrá estudiar el impacto de la hidrodinámica.

OBJETIVOS

Objetivo general

Modelar y simular los fenómenos hidrodinámicos que se llevan a cabo en un sistema de reacción de electrólisis alcalina usando CFD.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el sistema de reacción.
2. Modelar la hidrodinámica del sistema de reacción y determinar el método de solución.
3. Simular los fenómenos hidrodinámicos del sistema de reacción.
4. Comparar resultados de las simulaciones con pruebas experimentales.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordan los conceptos relativos a la electrólisis, así como el funcionamiento de los reactores electrolíticos frecuentemente utilizados y las diferentes formas de obtención de hidrógeno.

Del mismo modo, se identifican trabajos de diversos autores que retoman aspectos importantes de la hidrodinámica.

En última instancia se brinda una breve explicación de los términos utilizados en CFD, así como los estudios realizados en esta área.

1.1 Hidrógeno y formas de obtención

El hidrógeno (H_2) es un combustible limpio que se le puede dar diversos usos como por ejemplo, para la movilidad limpia en vehículos de pila de combustible y motores de combustión interna o como punto de partida para la producción de combustibles sintéticos, al combinarlo con recursos renovables como celdas solares o sistemas de energía eólica, desempeñará un papel importante para el desarrollo sostenible de los sistemas de energía y movilidad en el futuro (Barco-Burgos et al., 2020; Shen et al., 2011).

En lo que respecta a las ventajas de uso de hidrógeno y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, dependerán de cómo se produzca (Rand & Dell, 2005), debido a que existe una amplia variedad de procesos disponibles para su producción este dependerá de las materias primas utilizadas, por lo tanto podrían dividirse en dos categorías principales, (1) tecnologías convencionales y (2) tecnologías renovables (Koroneos et al., 2004; Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

- 1) Tecnologías convencionales: son aquellas que procesan los combustibles fósiles e incluye los métodos de reformado de hidrocarburos y pirólisis. El principal problema con este tipo de tecnologías es que el carbono generado en tales procesos se descarga a la atmósfera lo que contribuye al calentamiento global (Hosseini & Wahid, 2016).
- 2) Tecnologías renovables: son aquellas que producen hidrógeno a partir de recursos renovables como son biomasa o agua. La obtención de H_2 por medio de agua se refiere a métodos como: la termólisis, la fotoelectrólisis y la electrólisis (Hosseini & Wahid, 2016).

A pesar de que existen varias formas para la producción de H_2 como se observó en los puntos anteriores, la principal materia prima utilizada son los hidrocarburos (Nikolaidis & Poullikkas, 2017), los cuales se consideran tecnologías de transición y limitadas, por otro lado, se acepta que el agua será la fuente de hidrógeno sostenible del futuro, principalmente porque se considera que el proceso de electrólisis es fácil de integrar con fuentes de energía renovables (Ursúa et al., 2012).

1.2 Electrólisis

La electrólisis constituye la técnica más efectiva para la separación del agua en los elementos que la componen (Nikolaidis & Poullikkas, 2017), además presenta ventajas sobre los demás procesos dentro de las que se pueden mencionar, la alta pureza del H₂, considerando además que puede alcanzar el 99 % en volumen, una vez que se han eliminado las impurezas de oxígeno, y a su vez se considera un proceso sencillo (Gardner, 2009; Pletcher & Li, 2011).

La electrólisis consiste en aplicar energía eléctrica al agua a través de dos electrodos (un cátodo y un ánodo), los cuales se recomienda sean resistentes a la corrosión, tener una buena conductividad eléctrica, y exhibir buenas propiedades catalíticas (Ursúa et al., 2012), dichos electrodos causan la disociación de las moléculas de agua en los gases hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) (Bhandari et al., 2014; Ursúa et al., 2009), la energía mínima requerida (termodinámicamente) para romper los enlaces entre H₂ y O₂ a 25 °C y 1 atm es de 1.23 V, por lo tanto se recomienda un voltaje mayor (Amores et al., 2014; Shen et al., 2011; Zeng & Zhang, 2010), usualmente el sistema donde se lleva a cabo el proceso de electrólisis es mejor conocido como electrolizador (Milewski et al., 2014).

1.2.1 Electrolizador

La celda de electrólisis o electrolizador es el elemento básico del sistema de producción de hidrógeno electrolítico (Ursúa et al., 2009) y se pueden clasificar en tres tipos los cuales son:

- Electrolizador de Membrana de Intercambio de Protones (PEM)
- Celda electrolítica de óxido sólido (SOEC)
- Electrolizador alcalino

En el electrolizador de Membrana de Intercambio de Protones (PEM por sus siglas en inglés, Proton Exchange Membrane) el agua se introduce en el ánodo, donde se divide en protones (iones de hidrógeno, H⁺) que a su vez viajan a través de la membrana hasta el cátodo para formar H₂, mientras que el oxígeno se queda en el agua (Barbir, 2005), el funcionamiento se muestra en la Figura 1.1. Las celdas PEM ofrecen un alta eficiencia estando en aproximadamente el 80%, teniendo a su vez una mayor compacidad en comparación con las

celdas de tipo alcalino (Barco-Burgos et al., 2020); sin embargo, el problema principal en este tipo de electrolizador son sus altos costos de inversión, relacionados principalmente con la necesidad de electrodos, membranas poliméricas y componentes especializados para resistir la corrosión, además de presentar vidas más cortas en comparación con la tecnología alcalina (Barco-Burgos et al., 2020; Ursúa et al., 2012).

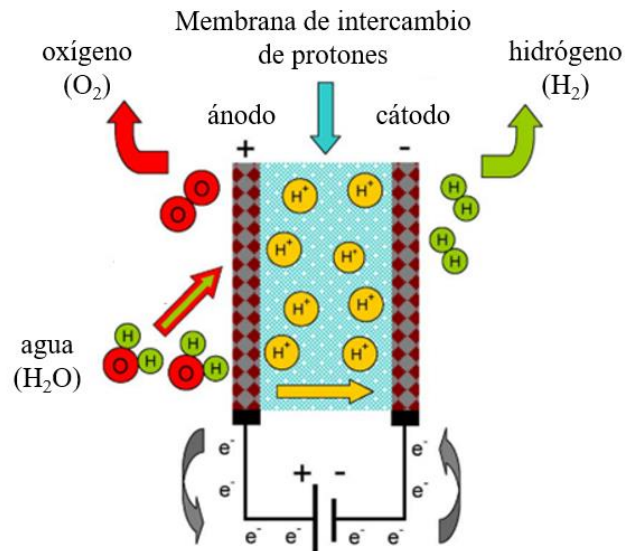


Figura 1.1. Funcionamiento de un electrolizador PEM (Ursúa et al., 2012).

En el electrolizador de óxido sólido (SOEC por sus siglas en inglés, Solid Oxide Electrolyzer Cell), el agua se introduce en el cátodo donde se divide en H_2 que se separa del agua en una unidad de separación externa e iones de hidróxido (OH^-) que a su vez viaja a través del electrolito acuoso al ánodo para formar O_2 (Carmo et al., 2013), en la Figura 1.2 se muestra el funcionamiento de esta celda.

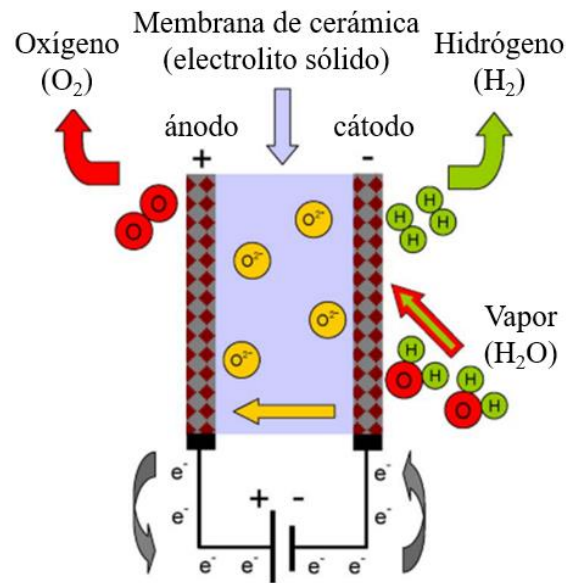
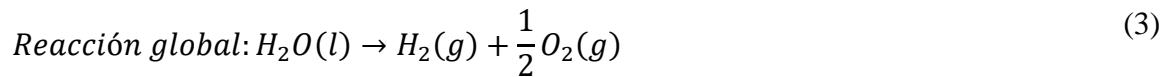
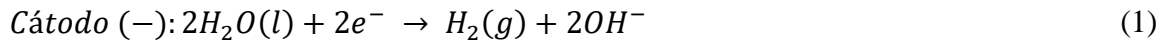


Figura 1.2. Funcionamiento de un electrolizador SOEC (Ursúa et al., 2012).

Este tipo de celdas se caracterizan por tener una eficiencia del 90% y ofrecer una alta estabilidad térmica y química con un consumo de energía reducido; sin embargo, tienen limitaciones asociadas con la rápida degradación de los materiales, tiempos de operación cortos y altos costos de fabricación (Barco-Burgos et al., 2020).

Los sistemas SOEC constituyen un concepto avanzado que permite la electrolisis del vapor debido a las altas temperaturas (500 °C – 1000 °C) que se manejan, lo que permite una mayor eficiencia en comparación con los electrolizadores alcalinos o PEM (Ghorbani & Vijayaraghavan, 2019; Ursúa et al., 2009), no obstante, los electrolizadores más utilizados hoy en día son los alcalinos debido a sus características ventajosas (Ursúa et al., 2012), por ejemplo, su vida útil puede llegar a ser de hasta 30 años, con una revisión general aproximadamente cada 7 o 15 años para reemplazar, reactivar los electrodos y sustituir los diafragmas (Bhandari et al., 2014). Por otro lado, los electrolizadores alcalinos son una tecnología madura, que ofrece una gran sencillez y eficiencia moderada que van desde el 59% al 70% (Barco-Burgos et al., 2020).

Las reacciones que toman lugar en el electrolizador alcalino se muestran en las ecuaciones correspondientes al cátodo (1) ánodo (2) y la reacción global (3) (Bakker & Vermaas, 2019a; Koroneos et al., 2004; Ursúa et al., 2009).



En cuanto al consumo ideal de electricidad requerida para producir un kg de H₂ es de 33 kW h; no obstante el valor aumenta con la densidad de corriente eléctrica que circula a través de la celda al considerar el incremento de las pérdidas (Carvajal Osorio et al., 2011), dichas consideraciones las toman en cuenta fabricantes como Norsk Hydro que comercializan electrolizadores alcalinos con tasas de producción por año de hasta 380.000 kg H₂ teniendo un consumo energético del sistema de 53,4 kW h / kg H₂ (Diéguez et al., 2008).

Al igual que los electrolizadores mencionados previamente, la celda de electrolisis alcalina consta de dos electrodos, los cuales en este caso están separados por un diafragma hermético (Bhandari et al., 2014) como se muestra en la Figura 1.3

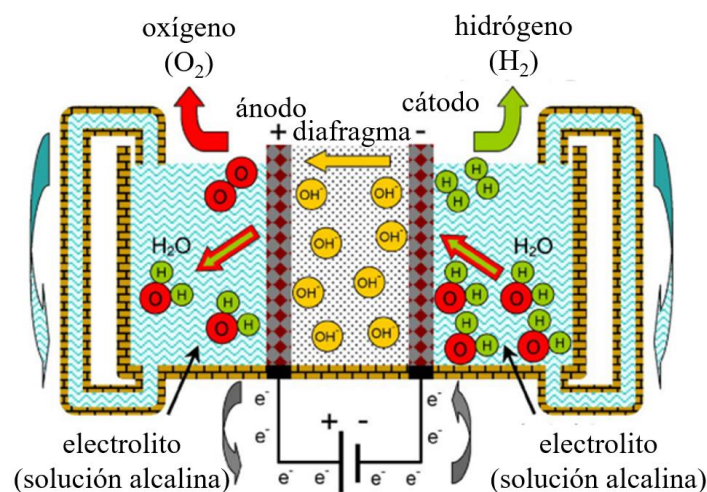


Figura 1.3. Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino (Ursúa et al., 2012).

La distancia típica entre los electrodos dada por el diafragma es de aproximadamente 1 mm, lo que se conoce como configuración de espacio cero (Ursúa et al., 2012), dicha configuración hace que la eficiencia energética aumente de un 15 hasta un 30%, así mismo, este tipo de electrolizador se caracterizan por el uso de una solución acuosa alcalina de 25 a 35% en peso de hidróxido de potasio (KOH) lo cual permite maximizar la conductividad iónica (Haug et al., 2017; Ursúa et al., 2012).

1.2.2 Electrolito

Los electrolitos sirven para modificar la conductividad eléctrica durante una reacción (Milewski et al., 2014), esto es, cambiar la naturaleza no conductiva del agua pura (Yuvaraj & Santhanaraj, 2014). Los electrolitos más usados para la electrólisis son compuestos alcalinos como el hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) (Ursúa et al., 2009).

Ulleberg en 2003 y Ursúa en 2009 identificaron que la concentración adecuada de electrolito de hidróxido de potasio acuoso (KOH), se encuentra en soluciones de 20-30% en peso debido a que en este rango se tiene la conductividad óptima, a pesar de todo, debido al comportamiento altamente corrosivo de los electrodos su uso es limitado en la práctica (Yuvaraj & Santhanaraj, 2014).

Otro de los aspectos a considerar es la conductividad iónica y la reacción superficial de un electrolito que aumentan directamente con la temperatura, dado que la electrólisis del agua a alta temperatura requiere menos energía para alcanzar cualquier densidad de corriente eléctrica dada, en comparación con un proceso a baja temperatura (Yuvaraj & Santhanaraj, 2014).

Por consiguiente autores como Haug, en 2017 realizaron experimentos que involucraban la variación de la temperatura (50 -80 °C), así como del caudal (20, 40 y 100% del caudal de bombeo) y la concentración de electrolito (28.9 - 34.2 % peso de KOH), para evaluar la pureza de los gases (H₂ y O₂) desprendidos durante el proceso de electrolisis, y lograron observar al final de las pruebas que un aumento de temperatura y una disminución de la velocidad de flujo reducen la impureza del gas, en su lugar, surge un problema debido a que la resistencia óhmica en el electrolito se incrementa por formación de burbujas de gas, estudios que previamente se

han realizado analizando la producción de gas y la manera en que afectan las burbujas al proceso (Ulleberg, 2003).

1.2.3 Burbujas

El consumo de energía durante la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua sigue siendo un problema importante en la práctica, debido a que las burbujas de gas tanto de H_2 como de O_2 que se forman durante la electrólisis del agua aumentan significativamente la resistencia de la celda, reduciendo así la eficiencia energética (Bakker & Vermaas, 2019b).

Abdelouahed, en 2014 plantearon que por su nula conductividad dichas burbujas de gas afectan significativamente la distribución de corriente eléctrica, aunado a esto Vogt & Balzer, en 2005 indican que las burbujas durante su crecimiento y al momento de desprenderse causan agitación como se observa en la Figura 1.4, provocando que la hidrodinámica sea modificada por las diversas fuerzas ejercidas por las burbujas durante el crecimiento.

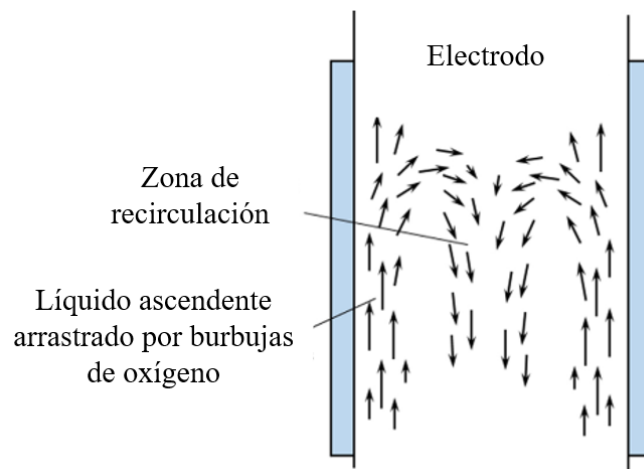


Figura 1.4. Movimiento ascendente de burbujas y recirculación del flujo en la parte central.

(Abdelouahed et al., 2014).

Asimismo Bakker & Vermaas en 2019 mencionan que el aumento en la formación de burbujas de H_2 y O_2 en los electrodos y en el electrolito conduce a una mayor resistencia dentro del sistema y por ende a una mayor pérdida energética.

Por trabajos anteriores se conoce que las burbujas ejercen un efecto sustancial diversos aspectos del electrolizador como son: en el sobrepotencial, en la densidad de corriente eléctrica limitante y en la resistencia óhmica. (Zhu et al., 2018), esto se debe de acuerdo a Vogt & Balzer, (2005) a que las burbujas que se adhieren a la superficie del electrodo aíslan una fracción de la superficie, haciéndola inactiva y aumentando la densidad de corriente eléctrica real.

Desde el punto de vista del flujo hidrodinámico y de dos fases, durante el desprendimiento de gases, una fracción de la superficie del electrodo se cubre con burbujas de gas que permanecen adheridas, como se observa en la Figura 1.5.

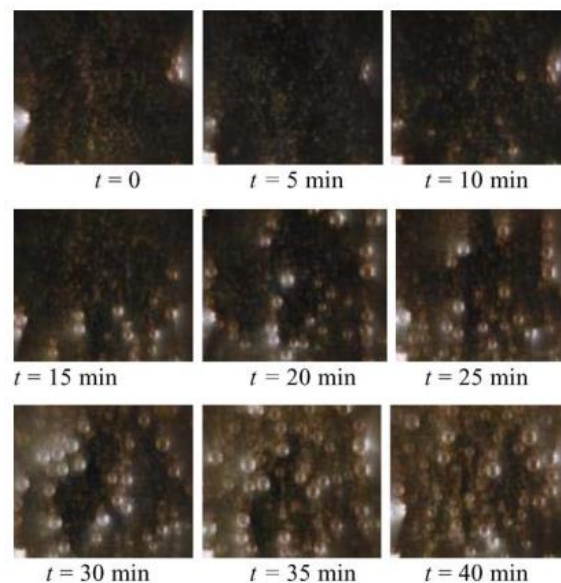


Figura 1.5. Burbujas envolviendo al electrodo (Vogt & Balzer, 2005).

Después de comprender que las burbujas generan problemas dentro de los sistemas de reacción, se han propuesto diferentes trabajos con el uso de presión para analizar sus efectos, Philippe Mandin et al., (2014), efectuaron experimentos en un sistema de electrólisis alcalina modificando la densidad de corriente eléctrica y la gravedad. Para llevar a cabo los experimentos en microgravedad hicieron uso del avión NOVESPACE® Airbus A300, teniendo

una aceleración máxima en el rango de -0.05 G a + 0.05 G, en dichos experimentos no se distinguieron burbujas después de 20 seg comenzado el proceso, debido a que no hubo suficiente activación de electrodos, por otro lado, las pocas burbujas que se produjeron se acumularon en ausencia de flujo natural en los electrodos provocando que el potencial aumentara.

Posteriormente, Bakker & Vermaas en 2019 también decidieron utilizar la presión como una variable a considerar, pero en este caso se buscaba provocar el desprendimiento de las burbujas, los experimentos consistieron en realizar cambios intermitentes (pulsos) de presión en una celda electroquímica, resultando un medio eficaz para eliminar las burbujas de la superficie del electrodo y de este modo reducir el voltaje de celda.

1.3 Simulación

La modelación en complemento con la simulación son herramientas importantes que se han convertido en una actividad central en las disciplinas de ciencia e ingeniería, no solamente por que ayudan a tener un mejor entendimiento del funcionamiento del mundo real, sino porque permiten predecir el comportamiento de sistemas antes de que estos sean construidos (Chaturvedi, 2010), gastando menos tiempo, dinero y esfuerzo en la investigación experimental (Olivier et al., 2017).

Por consiguiente el modelado de electrolizadores es una poderosa herramienta de diseño para desarrollar nuevos avances de electrolizadores alcalinos (Amores et al., 2014). Los modelos se basan en diferentes criterios específicos, algunos de estos pueden ser: termodinámico, electroquímicos, térmicos (Olivier et al., 2017), como es el caso de Ulleberg.

Ulleberg en 2003 planteo un modelo matemático que describe el comportamiento eléctrico de una celda electrolítica alcalina acoplada a celdas fotovoltaicas, considerando las relaciones electroquímicas y la transferencia de calor (ecuación (4)).

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A}I + s \log\left(\frac{t}{A}I + 1\right) \quad (4)$$

Posteriormente Amores en 2014 complementa el modelo regulando la concentración del electrolito y acoplado la influencia de la distancia entre los electrodos (ecuación (5)).

$$U = U_{rev} + (r + p + q)i + s \log(t \cdot i + 1) \quad (5)$$

A pesar de esto, el modelo indicado con anterioridad solo toma en consideración los términos electroquímicos (Amores et al., 2014).

En este sentido, resolver los modelos no es una tarea fácil, por lo que se ha optado por integrarlo con simulaciones en diferentes programas, las cuales a su vez permiten desarrollar diferentes estudios de manera más extensa haciendo el esfuerzo para minimizar el número de parámetros requeridos (Ulleberg, 2003), otros estudios en este sentido hacen uso una herramienta excelente y poderosa de bajo costo como es el CFD para ayudar a los ingenieros en el diseño, tomando en cuenta que el CFD permite obtener información a la que no se puede acceder mediante experimentos, lo que resulta particularmente interesante en este contexto, dadas las dificultades inherentes a las mediciones experimentales de la velocidad, tamaño y espacio de la burbuja (Hreiz et al., 2015a).

1.3.1 CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), es el análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como reacciones químicas por medio de simulaciones numéricas y el desarrollo de algoritmos de simulación adecuados basados en computadora. Esta técnica es muy poderosa por lo que puede abarcar una amplia gama de áreas de aplicación tanto industriales como no industriales (Kajishima & Taira, 2017) (H.K., Versteeg;W., 2007).

La historia de la CFD, inicio en la década de 1960, donde la industria aeroespacial comenzó a integrar técnicas de CFD en el diseño y fabricación de aviones (H.K., Versteeg;W., 2007), posteriormente en la década de 1970, se convirtió en un acrónimo de una combinación de física, matemáticas y, ciencias de la computación (ver Figura 1.6) empleadas para simular flujos de fluidos (Blazek, 2015).

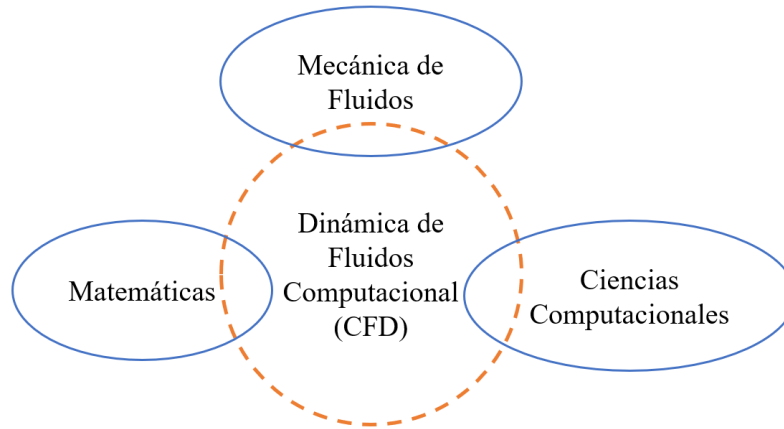


Figura 1.6. Disciplinas que involucran CFD (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

El CFD se utiliza a menudo como una herramienta para apoyar la investigación y el desarrollo en ciencia e ingeniería (Kajishima & Taira, 2017), se ha vuelto tan fuerte que hoy en día puede verse como una "tercera dimensión" en la dinámica de fluidos, siendo las otras dos dimensiones los casos clásicos de experimento y teoría puros. (Anderson Jr. et al., 2009), ya que la física del flujo en CFD se analiza y predice resolviendo numéricamente las ecuaciones que gobiernan y reproduciendo el campo de flujo con el uso de computadoras (Kajishima & Taira, 2017).

El uso de simulaciones CFD se ha difundido y cada vez más se están convirtiendo en un componente vital en el diseño de productos y procesos industriales (H.K., Versteeg;W., 2007; Kajishima & Taira, 2017), todo esto gracias al rápido aumento de la velocidad de las supercomputadoras y debido al desarrollo de una variedad de técnicas de aceleración numérica como las multi redes (Blazek, 2015), puesto que las soluciones de CFD generalmente requieren la manipulación repetitiva de miles, o incluso millones, de datos, haciendo esto una tarea que no es humanamente posible sin la ayuda de una computadora. (Anderson Jr. et al., 2009).

Las simulaciones también se han convertido en una herramienta valiosa en la investigación fundamental debido a su capacidad para analizar fenómenos complejos que pueden ser difíciles de estudiar con medidas experimentales o análisis teóricos (Kajishima & Taira, 2017).

Hoy en día, las aplicaciones CFD se pueden encontrar en los campos del diseño de aeronaves, turbomáquinas, automóviles y barcos. Además, el CFD también se aplica en meteorología y en recuperación de petróleo (Blazek, 2015), igualmente se aplica en el análisis de flujos

biomédicos y biológicos, en este caso haciendo análisis de como la sangre fluye a través de arterias y venas (H.K., Versteeg;W., 2007), también en ingeniería civil y arquitectura, flujos a gran escala en astrodinámica, pronóstico del tiempo y oceanografía (Kajishima & Taira, 2017)

En lo que corresponde a la electrólisis se tiene en cuenta que el campo de flujo de electrolitos se calcula usando las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que las burbujas se tratan como puntos de masa y sus trayectorias se rastrean individualmente usando la segunda ley de Newton (Abdelouahed et al., 2014).

Por su parte (El-Askary et al., 2015) al considerar que no hay fusión de burbujas ni ruptura con propiedades físicas constantes, un flujo isotérmico entre otras, resuelve la ecuación de continuidad y de momento en FORTRAN con el método SIMPLE, obteniendo como resultado que se puede tener una mejor producción disminuyendo la velocidad del flujo principal y que para a mejorar el proceso de producción de hidrógeno es necesario aumentar la densidad de corriente y reducir la distancia de separación entre el cátodo y el ánodo de la celda electroquímica.

En lo que respecta a la solución de un problema, la secuencia y estructura para usuarios de CFD están estructurados en torno a algoritmos numéricos (Xamán & Gijón-Rivera, 2016), sin embargo, con el fin de proporcionar un fácil acceso a su poder de resolución, todos los paquetes CFD comerciales incluyen sofisticadas interfaces de usuario para ingresar parámetros de problemas y examinar los resultados. Sin embargo, todos los códigos contienen tres partes fundamentales: (1) Pre-proceso, (2) Solucionador y (3) Post-proceso (H.K., Versteeg;W., 2007; Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

1.3.1.1 Pre-proceso

Generalmente consiste en la etapa de preparación de datos de entrada a un programa CFD por medio de una interfaz amigable para el operador, en el caso de un usuario de software comercial consiste en (H.K., Versteeg;W., 2007), (Xamán & Gijón-Rivera, 2016): (1) definición de la geometría o dominio computacional de la región de interés, (2) generar una malla numérica adecuada, siendo esta la división del dominio en varios subdominios más pequeños que no se superponen, (3) seleccionar o especificar los fenómenos físicos y químicos que se pretenden

modelar, (4) definir las propiedades físicas del medio y (5) especificar las condiciones de contorno adecuadas(H.K., Versteeg;W., 2007), (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

1.3.1.2 Solucionador o procesamiento

Esta etapa de CFD constituye la parte central del software, está asociada con el aspecto de la solución del problema, en el cual se resuelve el modelo matemático utilizando la computadora, existen en estos programas tres corrientes distintas como técnicas de solución numérica: diferencia finita, elemento finito y métodos espectrales (H.K., Versteeg;W., 2007), aquí intervienen conceptos de otras disciplinas como el análisis numérico, fundamentos de matemáticas discretas, desarrollo de software, en los diversos programas esto consiste en que el usuario de software solo manda las instrucciones de ejecución y espera los resultados (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

1.3.1.3 Post-proceso

Esta etapa de CFD es el elemento visualizador que permite aglomerar la multitud de datos de resultados en gráficos. Esta etapa es de vital importancia para el análisis de resultados y dependiendo de la capacidad de resolución del visualizador, ayudará al usuario o desarrollador a un mejor entendimiento del fenómeno t lo llevará a conclusiones exitosas (Xamán & Gijón-Rivera, 2016). Al igual que en el preprocesamiento, recientemente se ha realizado una gran cantidad de trabajo de desarrollo en el campo del post-procesamiento(H.K., Versteeg;W., 2007). Actualmente, algunos visualizadores disponibles permiten realizar animaciones del fenómeno bajo estudio, también, en un visualizador se pueden representar la malla numérica, mapas de contornos de iso-líneas y campos de velocidad (Anderson Jr. et al., 2009).

1.3.2 Malla computacional

Una malla computacional es una colección de puntos distribuida sobre la geometría de interés, que se utiliza para dar la solución numérica de un grupo de ecuaciones diferenciales parciales (H.K., Versteeg;W., 2007).

Las mallas se clasifican de acuerdo con el tipo de estructura en dos tipos: mallas estructuradas y mallas no-estructuradas. La principal diferencia radica en la forma de agrupar los datos que describen la malla (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

1.3.2.1 Mallas estructuradas

Las mallas estructuradas consisten generalmente en cuadriláteros (2D) y hexaedros (3D), los cuales son formados por un grupo de coordenadas y conexiones que naturalmente son mapeados en elementos de una matriz (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

A su vez pueden clasificarse en mallas ortogonales y no-ortogonales. Las mallas ortogonales son aquellas en las que todas las líneas que configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90° como se puede ver en la Figura 1.7.

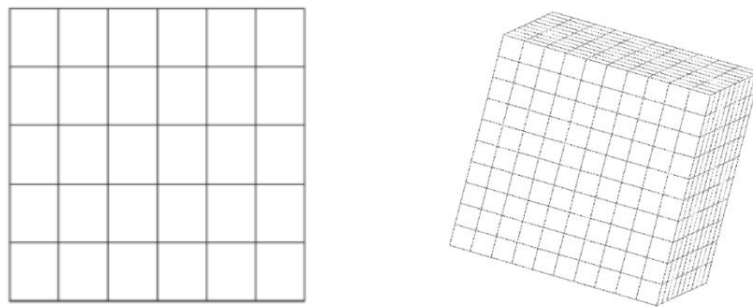


Figura 1.7. Estructuras de la matriz para una malla estructurada (Anderson Jr. et al., 2009).

1.3.2.2 Mallas no-estructuradas

En las mallas no-estructuradas los volúmenes y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, los volúmenes o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente (Anderson Jr. et al., 2009).

Los volúmenes de la malla son una mezcla de cuadriláteros o triángulos en 2d y de tetraedros y hexaedros en D. Este tipo de mallas ofrecen mayor flexibilidad en el tratamiento de geometrías más complejas, considerando que su principal ventaja reside en que los triángulos (2D) o los tetraedros 3d), los cuales se pueden adaptar con gran facilidad a la geometría establecida,

independientemente de la complejidad del dominio (H.K., Versteeg;W., 2007), (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

Otra de las ventajas que tiene este tipo de mallas es el tiempo requerido por una computadora para generar el mallado, ya que es menor que el requerido para un mallado estructurado, sin, embargo, se representa la desventaja de que el espacio de memoria en una computadora para almacenar un mallado no-estructurado es mayor que el correspondiente para un mallado estructurado(Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

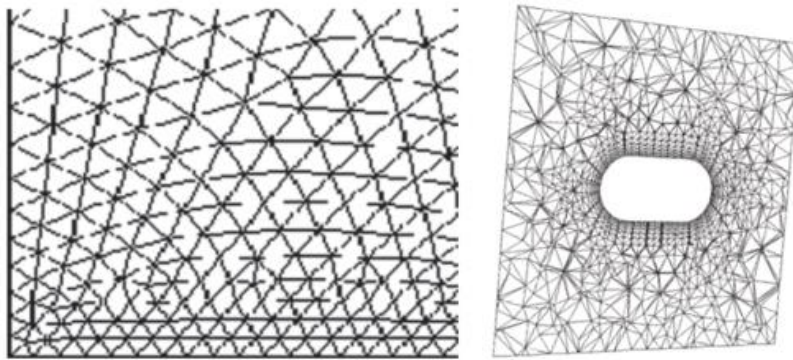


Figura 1.8. Estructuras de la matriz para una malla no-estructurada (Anderson Jr. et al., 2009). La ventaja de una malla no-estructurada es que los puntos y conexiones no poseen ninguna estructura global. Es posible, entonces, agregar nodos o elementos como la geometría lo requiera. Por lo tanto, el uso de una malla no-estructurada es factible en la discretización de geometrías complejas. Sin embargo, la carencia de una estructura global en una malla no-estructurada hace que la aplicación de los algoritmos de solución de barrido de línea sean más difíciles de aplicar que en las mallas estructuradas, impactando directamente en el desarrollo del código computacional haciéndolo más complejo e incrementando el tiempo de cómputo en la solución de problemas en la que se aplique este tipo de discretización.

La exactitud de una solución numérica, depende, en parte, de las propiedades establecidas de la malla computacional, las características deseadas están relacionadas a la ortogonalidad, espaciado de la malla, suavidad y alineamiento de las líneas de malla y las líneas de corriente (Xamán & Gijón-Rivera, 2016).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se detalla la metodología general que se utilizó para desarrollar el presente trabajo, donde se aborda la caracterización desde un punto de vista de la mecánica y operación del proceso, conformando de esta manera la integración y el análisis tanto de las especificaciones de las corrientes del proceso como los fenómenos presentes en el reactor.

Posteriormente, se describe la parte experimental, que permitió la adquisición de datos que aportan información para finalmente contrastar con los resultados obtenidos en las simulaciones generadas.

En la Figura 2.1 se muestra la síntesis de la metodología llevada a cabo para el desarrollo de este proyecto, la cual se dividió en tres puntos importantes, la caracterización, experimentación y simulación, posteriormente se describe a detalle cada uno de estos aspectos.



Figura 2.1. Metodología general del trabajo.

2.1 Caracterización

En esta sección, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para caracterizar el sistema de electrólisis localizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP, partiendo de los aspectos generales que involucran la geometría y disposición de todos y cada uno de los componentes que conforman el sistema de reacción, así como el detalle geométrico y funcional que cumplen, destacando particularmente las regiones del equipo en donde el flujo, la presión o la temperatura juegan un papel fundamental.

2.1.1 Proceso

Para poder describir el proceso de electrólisis alcalina mostrado en la Figura 2.2, se desarrolló la filosofía del proceso, para posteriormente identificar las regiones que están involucradas,

como son los equipos en donde se llevan a cabo las operaciones importantes en el proceso, como son las corrientes de alimentación y descarga, incluyendo elementos de servicios y accesorios como las válvulas, posteriormente se realizó el diagrama de flujo correspondiente considerando el sistema estándar ISA y los típicos de ingeniería de procesos en esta labor.



Figura 2.2. Módulo de electrólisis alcalina.

En el sistema se identificaron 3 partes importantes, el primero consistió en analizar el proceso y determinar cada una de las secciones que lo conforman como son: las líneas que permiten la alimentación de electrolito y descarga de gases (H_2 y O_2), las conexiones que suministran la energía desde la fuente de poder hasta el electrolizador y los tanques de almacenamiento, la segunda parte de esta descripción pretende analizar al proceso considerando la preparación inicial del equipo, el arranque del proceso y el paro del electrolizador destacando en cada una de las etapas aquellas instrucciones que son importantes dado el riesgo que resulta por el manejo de hidrógeno y oxígeno. La última parte considera la identificación de los elementos que conforma del electrolizador alcalino.

2.1.2 Electrolizador

En lo que respecta al electrolizador, el equipo se describió a detalle, así como el arreglo mecánico que conforma al electrolizador que posterior al proceso de caracterización mecánico se modelo en dos etapas para su estudio mediante CFD.

Es importante mencionar que la caracterización propuesta se basa en la metodología usada por Valerga et al., en 2015 donde se considera la ingeniería inversa como el desarmando del equipo en sentido contrario a la dirección de su ensamblado, se utiliza en varios procesos ya que los productos ensamblados contienen partes generalmente ocultas a simple vista y de este modo no solo se analiza lo referente a geometrías, sino también a materiales y funcionalidad, en lo referente a este caso se tiene la diferencia del uso de técnicas para escaneo del objeto en estudio.

Para realizar el desensamble del electrolizador mostrado en la Figura 2.3 fue necesario en primer lugar desconectar los cables de alimentación de energía, posteriormente, se comprobó que el electrolizador estuviera vacío, para después retirar las líneas de alimentación de electrolito, así como la descarga de gas.

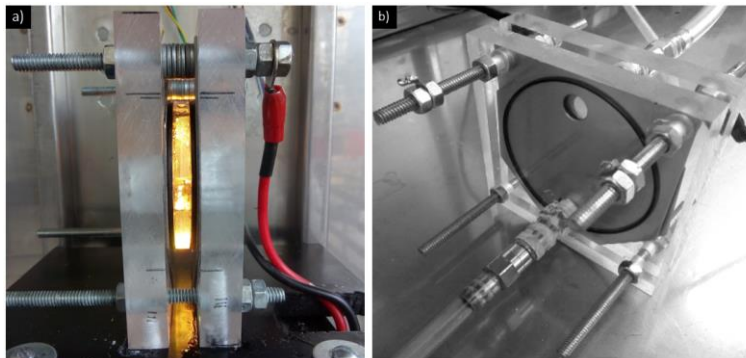


Figura 2.3. Sistema de electrólisis a) vista lateral, b) vista frontal.

Al comprobar que el electrolizador ya no tenía ninguna conexión se prosiguió a retirar las tuercas mediante el uso de una llave inglesa marca MASTERGRIP # 11, de este modo se pudieron separar cada uno los componentes que conforman al electrolizador.

Una vez desensamblado el electrolizador fue posible determinar el número de componentes, su geometría, así como las dimensiones (largo, ancho, alto) y funcionamiento de cada una de las piezas. Las medidas fueron tomadas con un vernier marca Calipers y los datos se registraron en una bitácora para generar fichas de registro de cada pieza, a partir de esta información se generó el diseño 2 y 3D que se ocupó en el modelo para las simulaciones.

2.2 Experimentación

La parte experimental tuvo como objetivo generar información de las diferentes variables y parámetros presentes o destacables durante la operación del reactor, estos experimentos también fueron usados para determinar la distribución, tamaño, forma y densidad de burbujas en la superficie de los electrodos (cátodo y ánodo) mediante el uso del análisis de imagen.

Con la finalidad de obtener el diámetro, así como determinar la cantidad y distribución de burbujas generadas en los electrodos, además de observar su comportamiento en la parte central del sistema se propusieron dos tipos de pruebas experimentales, haciendo las variaciones de voltaje con la fuente de poder BK PRECISION 1550, para los experimentos se planteó el llevarlos a cabo por triplicado, donde, en cada uno de ellos el sistema operó por lotes con un tiempo de operación de 1 minuto, para evitar que la temperatura sea una variable que considerar, en estos experimentos se emplearon soluciones de hidróxido de potasio (KOH) a 1 M a 25 °C y 1 atm.

Para llevar a cabo las corridas de las primeras pruebas experimentales, se instaló el electrolizador de acuerdo con las condiciones determinadas previamente, en este paso se consideró fundamental la potencia eléctrica operativa que establece el voltaje inicial de 1.2 V, la expectativa de cada prueba respecto del tiempo es de aproximadamente 1 min, este es el tiempo que ha sido observado en donde la operación del equipo alcanza un estado pseudo estable, posterior a la corrida efectuada el sistema es apagado, se sustituyen los electrodos (placas metálicas) para evitar interferencias que alteren los datos que se buscan por fenómenos como la corrosión, electrodeposición o pasivación, se carga con nueva solución electrolítica y se repite el proceso aumentando 0.1 el voltaje hasta llegar a 2.0, estos datos se consideraron en

vista de que, las celdas prácticas funcionan a tensiones de 1.8 - 2.6 V, como resultado de la sobretensión y las pérdidas óhmicas (Nikolic et al., 2010).

Una vez establecidos los criterios de la simulación se efectuaron 2 tipos de pruebas con sus correspondiente 3 réplicas, observándose de este modo los fenómenos hidrodinámicos predominantes del sistema que incluye: los flujos transitorios en el sistema y la formación crecimiento desprendimiento y trayectoria de las burbujas de gas (O_2 e H_2) que fueron comparadas con las pruebas de análisis de imagen lo que arroja una correspondencia importante con un fenómeno altamente estocástico del sistema de reacción.

A continuación, se muestran el diagrama de flujo (Figura 2.4) correspondiente a esta primera sección de experimentos.

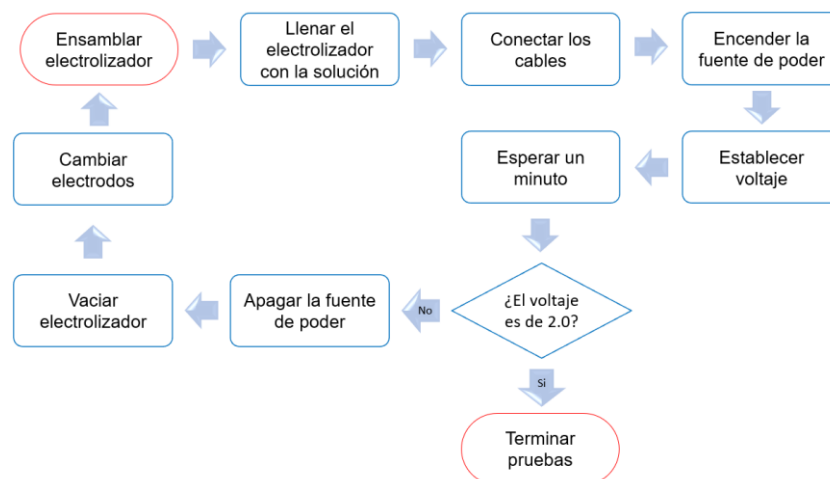


Figura 2.4. Primera parte de experimentos.

En lo que respecta a la segunda parte experimental el electrolizador se cargó con la solución electrolítica de hidróxido de potasio (KOH) a 1 M a 25 °C, se conectaron los cables eléctricos y estableció el voltaje de 1.2, posteriormente se esperaba un minuto y aumentaba la potencia eléctrica con un tamaño de paso de 0.1 hasta alcanzar los 2.0 V. El diagrama que resume el método seguido se observa en la Figura 2.5.

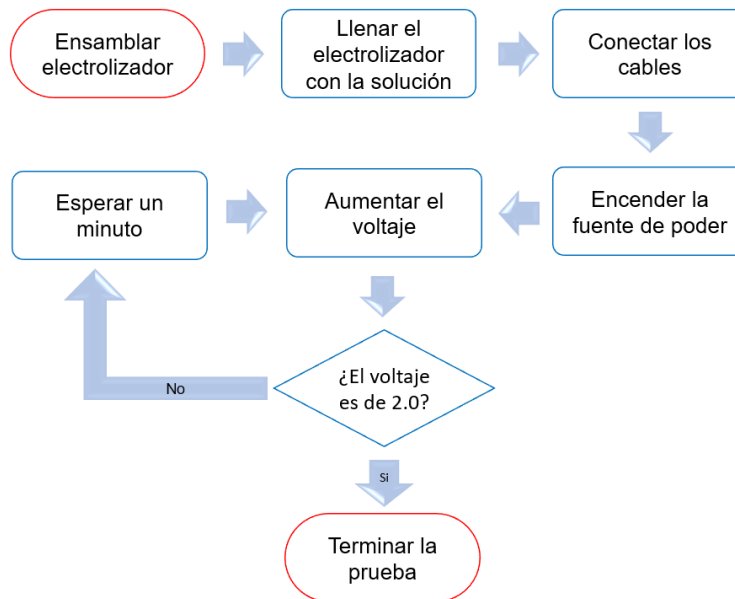


Figura 2.5. Segunda parte de experimentos.

Para cada una de las pruebas se llevó a cabo la adquisición y procesamiento de video utilizando una cámara SONY HANDYCAM MOD. HDR-CX404, donde, para facilitar la visualización se optó por utilizar un LED (LED Schott KL2500) que iluminaba desde la parte posterior del reactor como se observa en la Figura 2.6. Cabe mencionar que la parte más complicada involucra la ubicación de la cámara que satisface la imagen de la superficie defina del electrodo, el arreglo se presenta en la Figura 3.9.

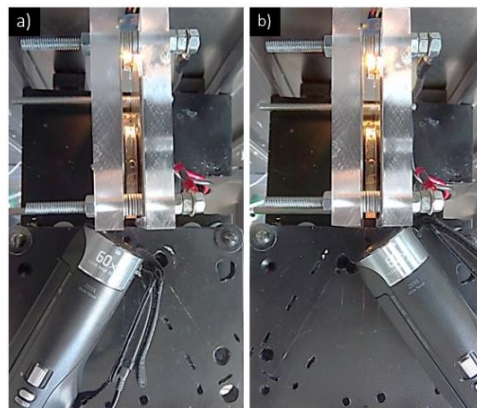


Figura 2.6. Arreglo experimental vista superior, a) y b), posición para grabar superficie de ánodo y cátodo respectivamente.

El análisis de los videos adquiridos inició con el procesamiento de estos, para obtener fotogramas con una velocidad de 30 FPS (Fotogramas por segundo) y de esta manera facilitar su análisis. Consecutivamente se desarrolló un programa basado en el software Python y OpenCV para determinar la distribución, tamaño, forma y densidad de burbujas en la superficie de los electrodos, donde se localizaban las burbujas y eran marcadas para posteriormente poder ser medidas.

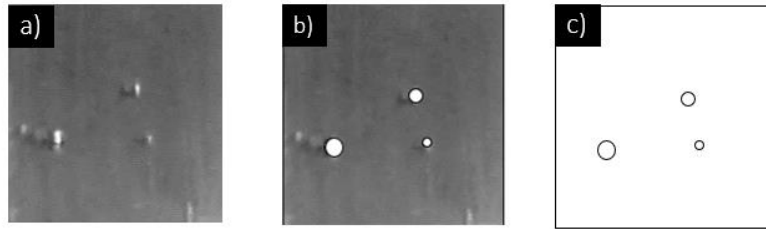


Figura 2.7. a) Imagen obtenida de la cámara, b) Utilizando algoritmo de Python de localización de burbujas, c) Burbujas localizadas.

2.3 Simulación

Las simulaciones del electrolizador se llevaron a cabo en un equipo DELL G7 con un procesador Intel Core i7, con una memoria RAM de 16.0 GB, utilizando el programa para CFD, COMSOL Multiphysics, el cual permite seleccionar entre asistente de modelo o modelo en blanco, en ambos casos se requiere un componente (dibujo) en 2D o 3D para realizar el estudio, sin embargo, realizar dibujos 2D o 3D así como la colocación de objetos y detalles en COMSOL Multiphysics es complicado debido a que es un programa que se maneja por coordenadas, por tal motivo, se optó por utilizar un programa CAD especializado en ello siendo este SolidWorks, ya que cuentan con una amplia variedad de opciones en cuanto al diseño, además permite la creación de archivos compatibles con COMSOL, esto se realizó debido a que uno de los principales desafíos para modelar y simular un sistema mediante CFD parte de la construcción de la geometría y las dimensiones involucradas, debido a que para realizar las simulaciones es necesario primero dibujar un modelo en 2 o 3D, en este caso se utilizó una correspondencia física de 1:1 del objeto al cual se realizó el estudio, sin embargo, la escala se puede modificar dependiendo del efecto que se espere encontrar o las modificaciones que se necesiten realizar

en el objeto de estudio, ya que la construcción de una geometría afecta la convergencia numérica durante la solución del modelo.

Después de seleccionar el tipo de archivo y las dimensiones en las que se trabajó, es necesario establecer la física y posteriormente el estudio, que puede ser estacionarios o no estacionario, en la Figura 2.8 se muestra las selecciones que se pueden realizar.

Para poder observar cual es el comportamiento del electrolito en la entrada y descarga del electrolizador se realizaron simulaciones considerando en su totalidad el electrolizador, como menciona H.K., Versteeg;W., (2007) para realizar la simulación primero es necesario seleccionar la física considerando esta como la etapa de pre-proceso, en este caso del árbol de opciones que ofrece COMSOL Multiphysics se optó por la sección de flujo de fluidos y fluido.

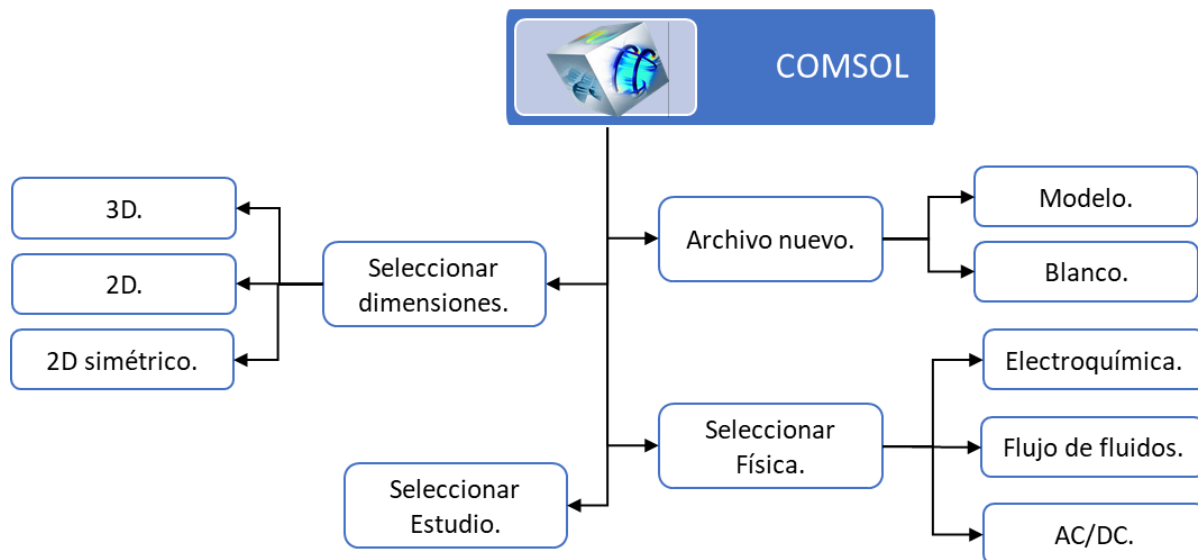


Figura 2.8. Diagrama de selección de COMSOL Multiphysics.

Posteriormente se realizó un diagrama donde se analizaron las zonas que se crean y al realiza un aumento en la sección II, se observó que en el lugar donde se lleva a cabo la reacción se puede identificar inicialmente la existencia de tres regiones diferente como se observa en el acercamiento de la Figura 2.9: el aire en la parte superior, las burbujas de gas en un inicio sin

movimiento y por último el electrolito que rodea la burbuja, es por eso que se optó por hacer un análisis de esta sección y observar cual es el comportamiento de las burbujas en esta brecha.

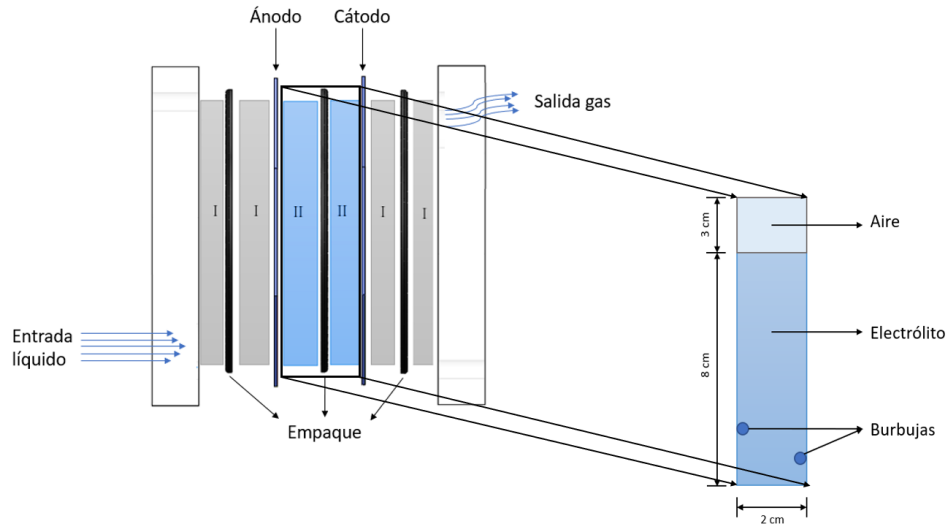


Figura 2.9. Diagrama de electrólisis.

En esta simulación propuesta de una interfaz de flujo de dos fases, conjunto de niveles, el transporte de masa y momento se rige por las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles, incluida la tensión superficial la cual se muestra a continuación.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

Donde, ρ es densidad, \mathbf{u} es velocidad, t es igual al tiempo, p es la presión y μ la viscosidad, además de que \mathbf{F}_{st} es la tensión superficial.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

En este capítulo se abordan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la sección anterior, los cuales comprenden: la caracterización del proceso y electrolizador, experimentación y simulaciones realizadas en el programa de CFD, COMSOL Multiphysics.

3.1 Caracterización del sistema

El proceso de electrólisis en conjunto considera típicamente al menos 5 regiones principales, la zona de almacenamiento, acondicionamiento, reacción, separación, disposición de producto.

En la Figura 3.1 se muestra el DFP (diagrama de flujo de proceso) en donde se identifican los diferentes equipos ocupados para la obtención de hidrógeno y oxígeno, donde se puede destacar el electrolizador alcalino.

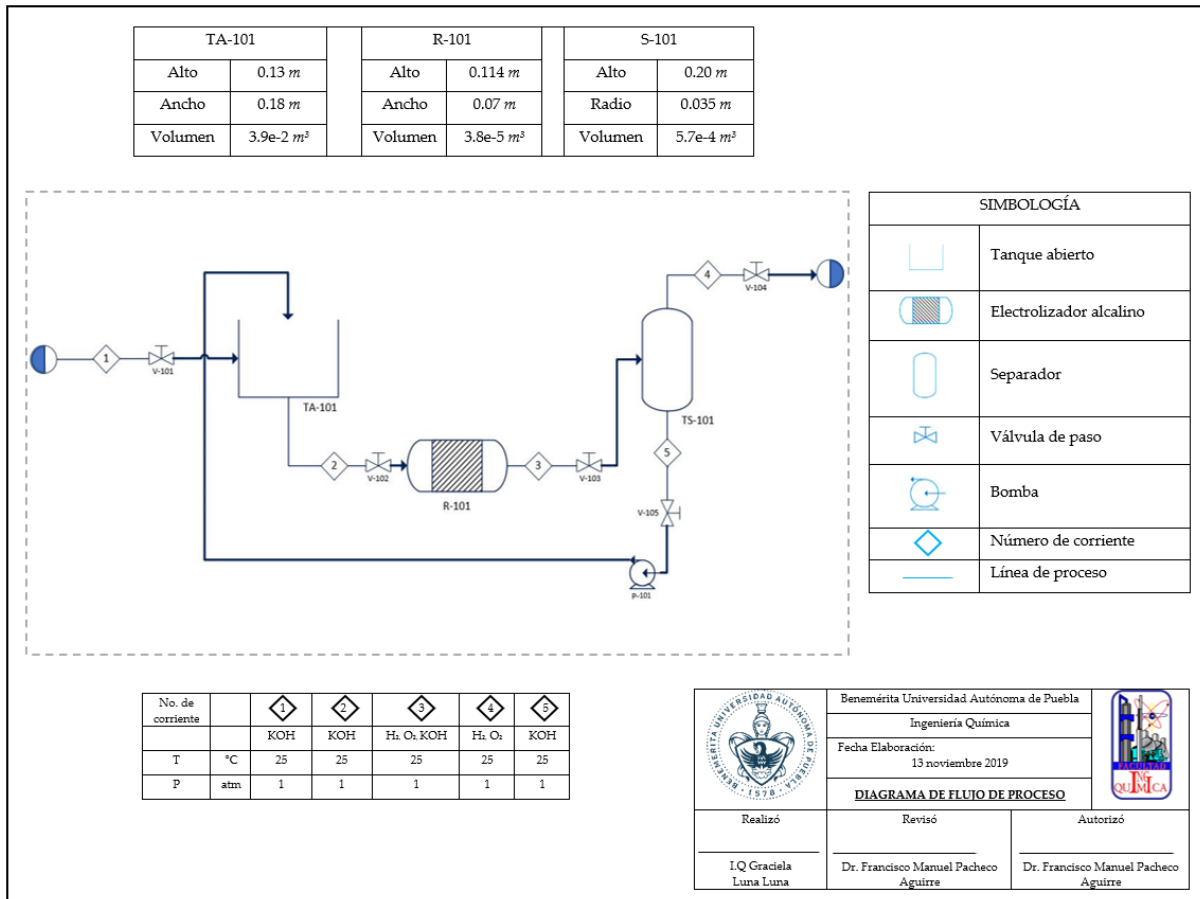


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de la obtención de Hidrógeno.

El sistema de electrólisis se muestra en la Figura 3.2, la alimentación se localiza en la parte inferior de una de las placas de acrílico, mientras que el desalojo de los gases se realiza por la parte superior de la otra placa, tiene una capacidad de 28 ml, consta de dos placas de acrílico que evitan el contacto de los dos electrodos (ánodo y cátodo) de acero inoxidable 316 con el

exterior, en el centro se encuentra un tubo de acrílico de 0.5 cm de ancho que permite observar lo que sucede en el interior y dos empaques en cada extremo del tubo para evitar dañar los electrodos, además de prevenir fugas. Para mantener todas las piezas en su lugar se utilizan 4 tornillos, 12 tuercas y 12 rondanas, en los tornillos situados en la parte superior se colocan los cables que permiten el paso de la energía eléctrica necesaria para llevar a cabo la reacción, estos componentes se muestran en la Figura 3.3.

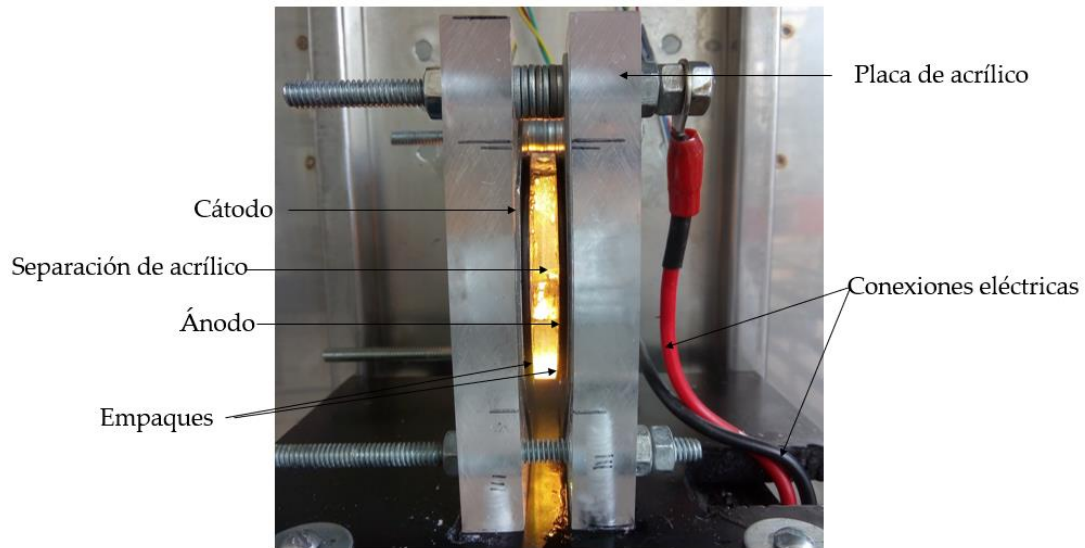


Figura 3.2. Sistema de electrólisis alcalina.

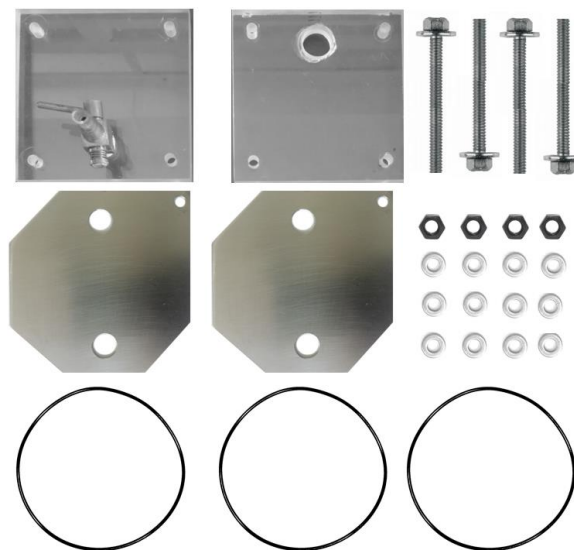


Figura 3.3. Componentes del sistema de electrólisis.

Al poner a funcionar el sistema se pueden identificar dos zonas como se muestra en la Figura 3.4, la primera (I) área de no reacción, corresponde a la sección que se encuentra entre la placa de acrílico y el electrodo (ánodo y cátodo), mientras que la zona de reacción (II) es la que se encuentra entre el ánodo y cátodo.

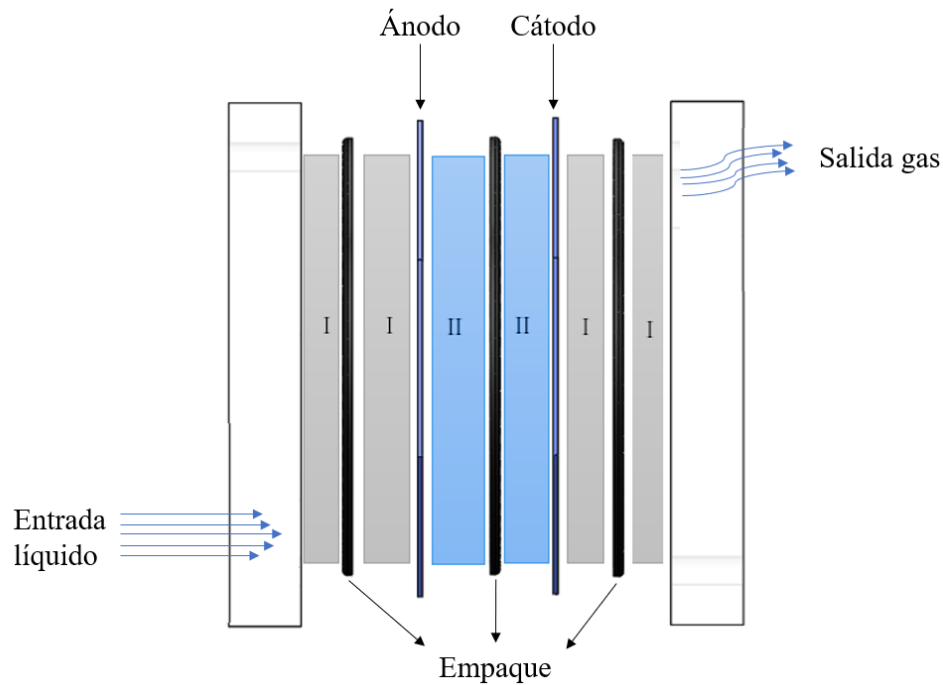


Figura 3.4. Diagrama lateral del sistema de reacción.

Las fichas generadas a partir de la adquisición de datos se muestran en las tablas de apéndice.

3.2 Experimentación

En lo que corresponde a los experimentos realizados con un aumento de voltaje se tienen los siguientes resultados.

Como se observa en la Figura 3.5, la generación de gas se incrementa al momento en que el voltaje aumenta, teniendo el mayor crecimiento con voltajes iguales o mayores a 2.0 V.

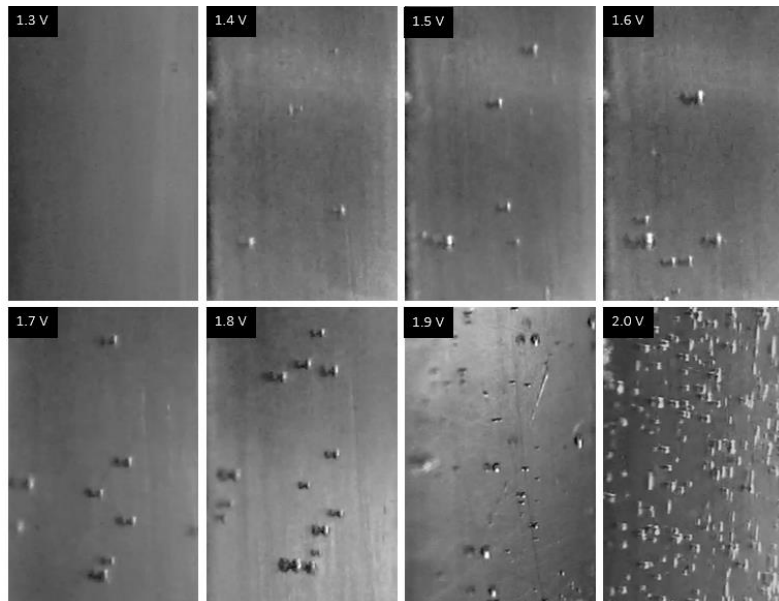


Figura 3.5. Generación de gas a diferentes voltajes.

También como se observa en la Figura 3.6, no hay una arreglo o generación predecible, sin embargo, al incrementar el voltaje el tamaño de la burbuja se mantiene casi homogéneo, mientras que a voltajes menores a 1.9 el tamaño es muy variado, esto puede deberse a que al tener mayor energía el desprendimiento se dé con mayor rapidez.

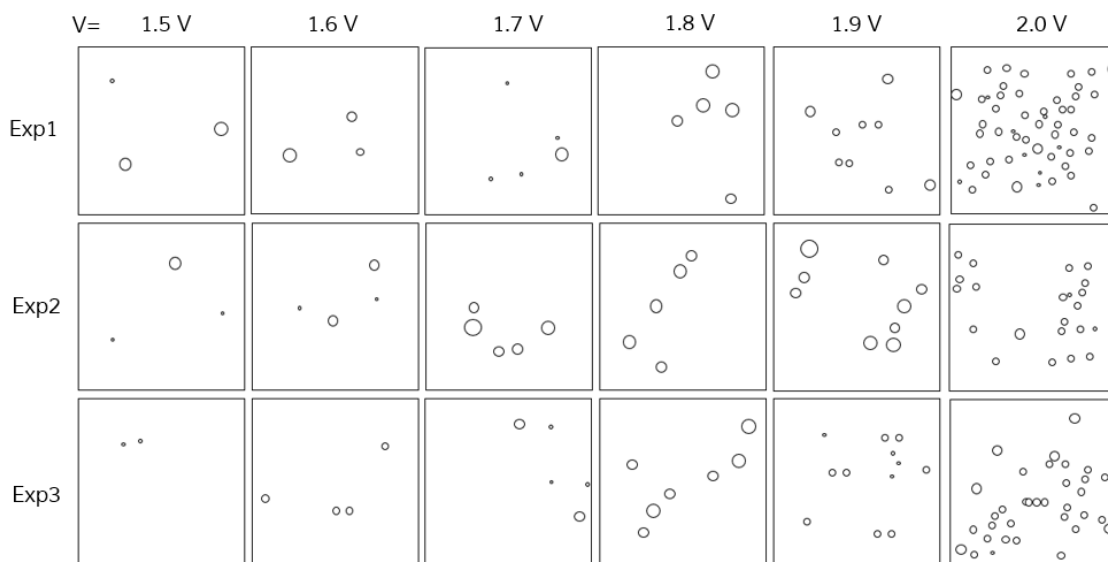


Figura 3.6. Variación de voltaje y generación de burbujas.

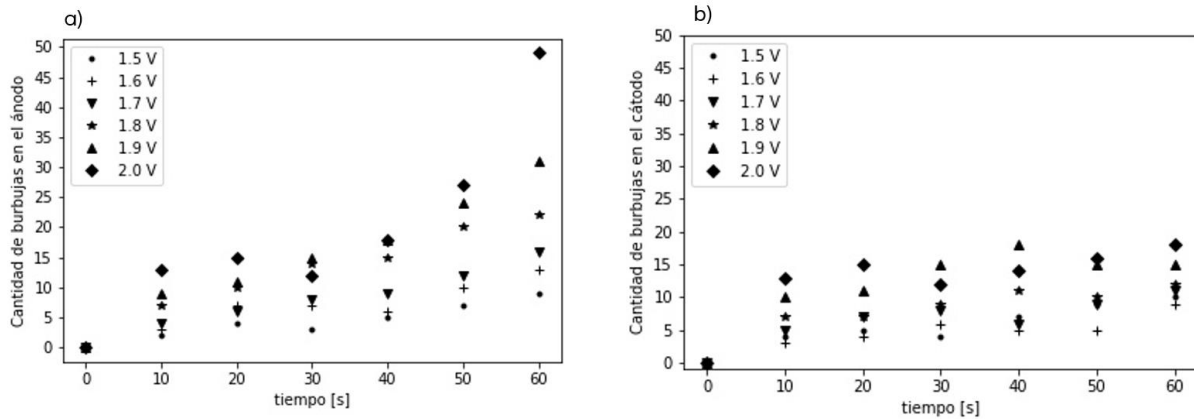


Figura 3.7. Cantidad de burbujas en el ánodo a) y cátodo b) en relación con el tiempo de cada prueba.

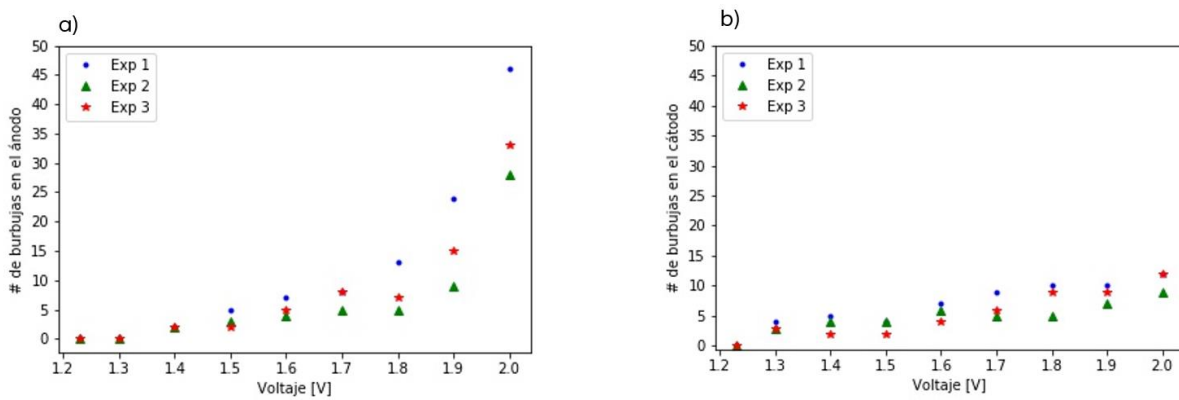


Figura 3.8. Cantidad de burbujas en el ánodo a) y cátodo b) en relación con el voltaje suministrado

Posteriormente se identificaron las etapas que presenta una burbuja, esto va desde la formación (a), crecimiento (b-d) hasta el desprendimiento (e) como se puede ver en la Figura 3.9, se comprobó que los tiempos en cada etapa cambio dependiendo del voltaje que fue suministrado.

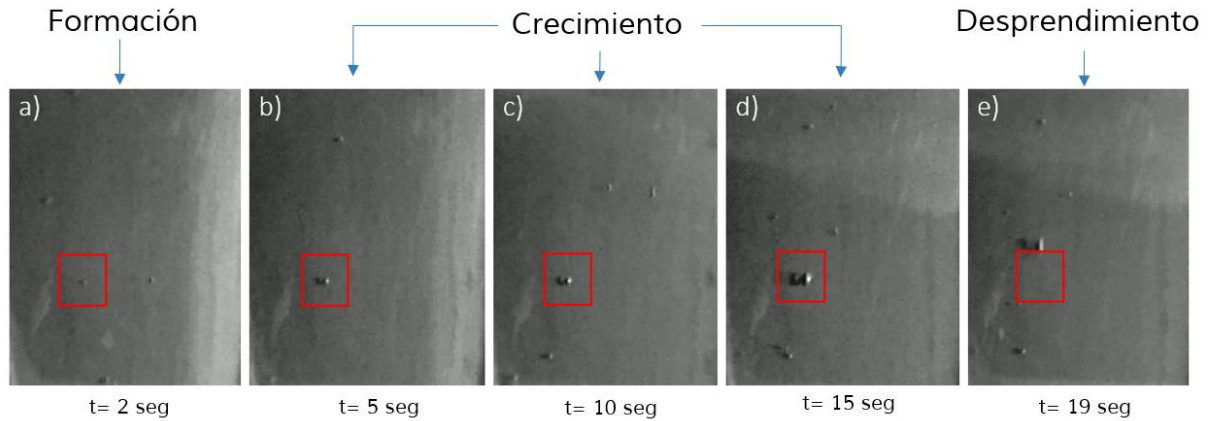


Figura 3.9. Etapas de desarrollo de una burbuja.

Del mismo modo se identificó la generación continua de gas, la cual se puede dar en diferentes zonas de la placa, no obstante, los lugares donde este fenómeno es más propensos a que suceda es en ralladuras, marcas o imperfecciones. Tal fenómeno se da desde que el sistema es energizado y no se detiene hasta que el sistema se apaga.

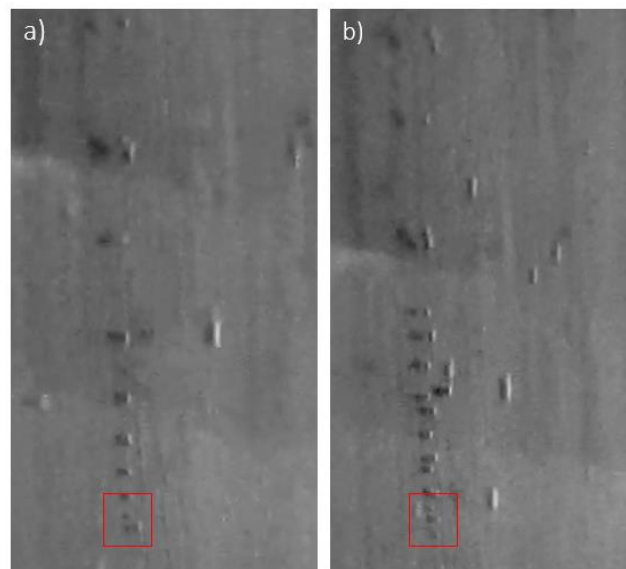


Figura 3.10. Generación continua de burbujas de gas a 1.7 V, a) t=0 seg., b) t=30 seg.

En la Figura 3.11 se muestra la progresión que tienen las burbujas en la parte anódica en los primeros 11 segundos comenzando la cuenta desde que fue puesto en marcha el sistema con un voltaje de 2 V.

En a) se observa que la placa no contiene ninguna burbuja considerando este como el tiempo cero, después de 8.1 segundos en b) se vislumbran las primeras burbujas, como puntos diminutos sobre la placa, a continuación, después de 11 segundos (c) la placa se ve cubierta de burbujas en su totalidad.

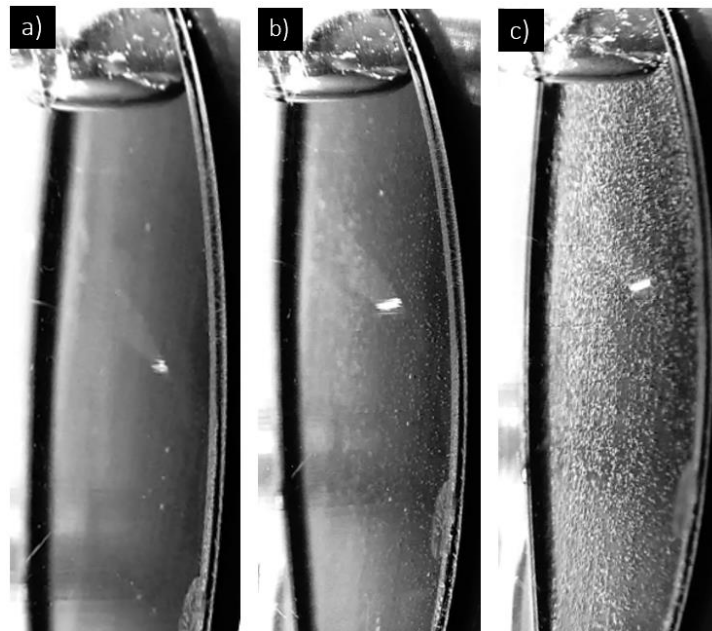


Figura 3.11. Generación de burbujas a) $t = 0$ seg, b) 8.1 seg, c) 11.7 seg.

3.3 Simulación

Debido a que el primer paso para realizar la simulación es el diseño o dibujo, este se realizó en un programa CAD con las medidas previamente definidas, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.12, donde se identifican cada una de las piezas que conforman al sistema de reacción.

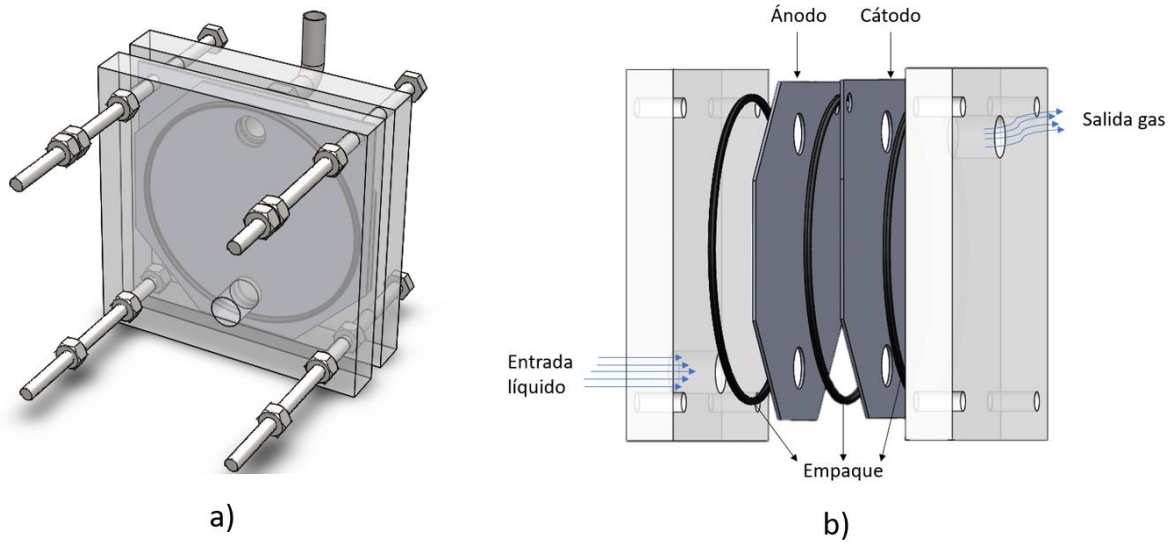


Figura 3.12. Diagrama 3D de electrolizador en programa CAD, a) perfil, b) vista explosionada.

En la siguiente figura se presenta el electrolizador con el dibujo exportado a COMSOL (b) y el malleo posteriormente generado (c), para dar solución a las ecuaciones de transporte que el programa genera de manera automática al seleccionar el estudio a realizar.

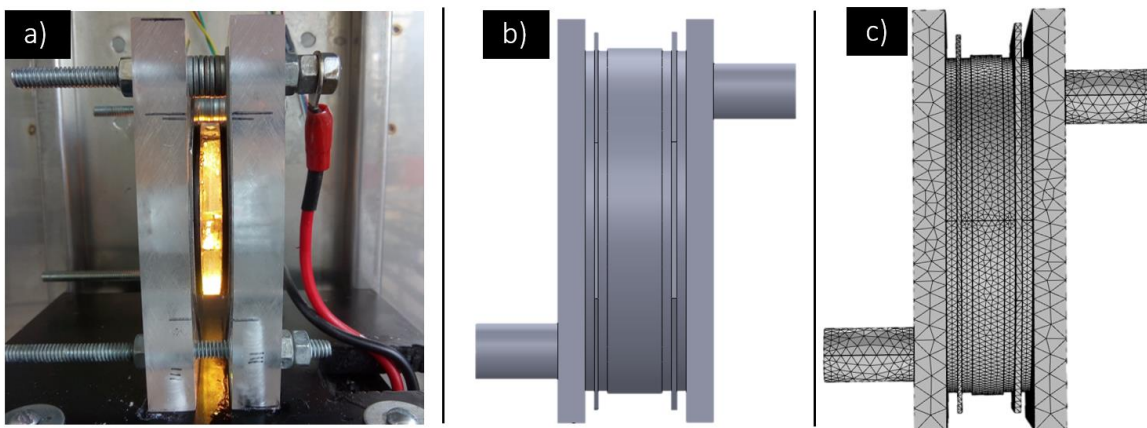


Figura 3.13. a) electrolizador, b) dibujo exportado a COMSOL Multiphysics, c) malla generada en COMSOL Multiphysics.

La solución se muestra a continuación, donde se puede observar como el líquido limita su avance por el empaque circular, a su vez permitiendo de esta manera una distribución homogénea en toda el área de reacción, también se puede confirmar que se tienen secciones de estancamiento en la zona de contacto entre la placa de acrílico y los electrodos, lo que podría suponer un efecto negativo a la eficiencia del electrolizador.

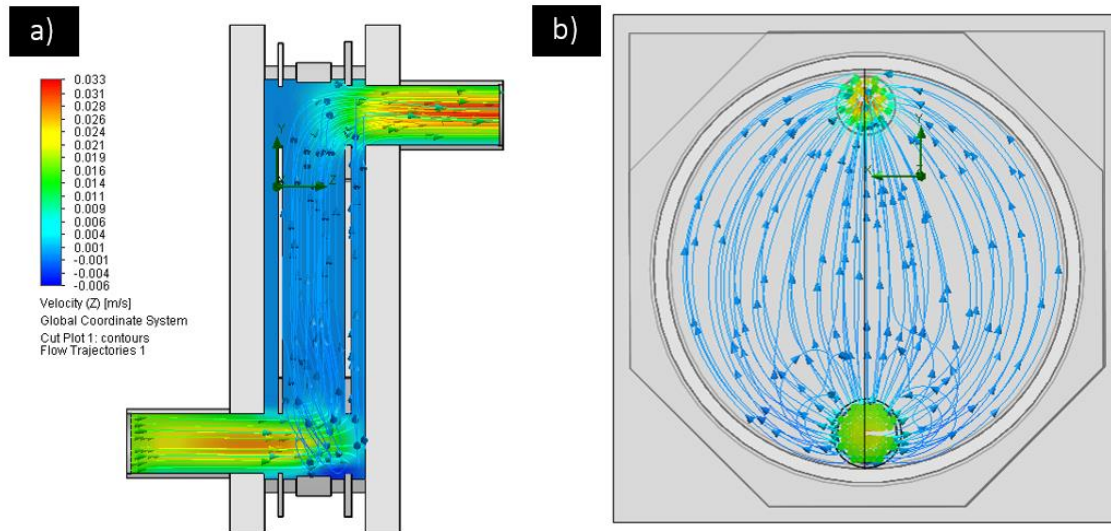


Figura 3.14. Simulaciones de hidrodinámica, campos de velocidad de entrada a) vista lateral
b) vista frontal.

Debido a que el sistema requiere especificar la sección que pertenece al fluido y posteriormente resolver todo el sistema respetando las fronteras se identificó que era mejor dibujar únicamente la parte interna correspondiente al líquido como se observa en la Figura 3.15 a), de esta manera es posible disminuir el tiempo de malleo y por ende el tiempo de computo, el diseño simplificado se muestra a continuación.

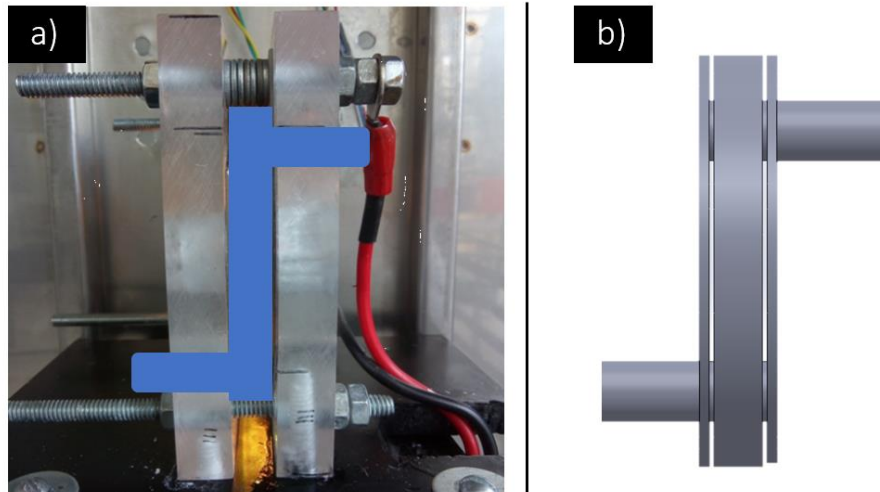


Figura 3.15. Interior del electrolizador 3D en SolidWorks.

El dibujo realizado en SolidWorks y exportado a COMSOL manteniendo las medidas reales del sistema se observa a continuación.

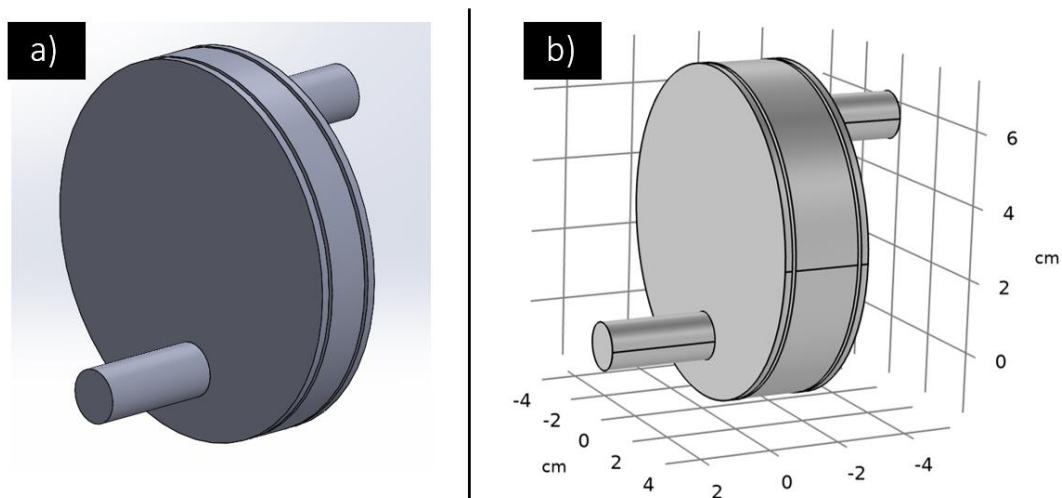


Figura 3.16. Interior del electrolizador 3D, a) SolidWorks, b) exportado a COMSOL Multiphysics

Después de seleccionar el interior y asignarle como material agua, el modelo cambia de color indicando que fue asignado correctamente el material, como se observa en Figura 3.17 a), mientras que la malla se puede ver en b).

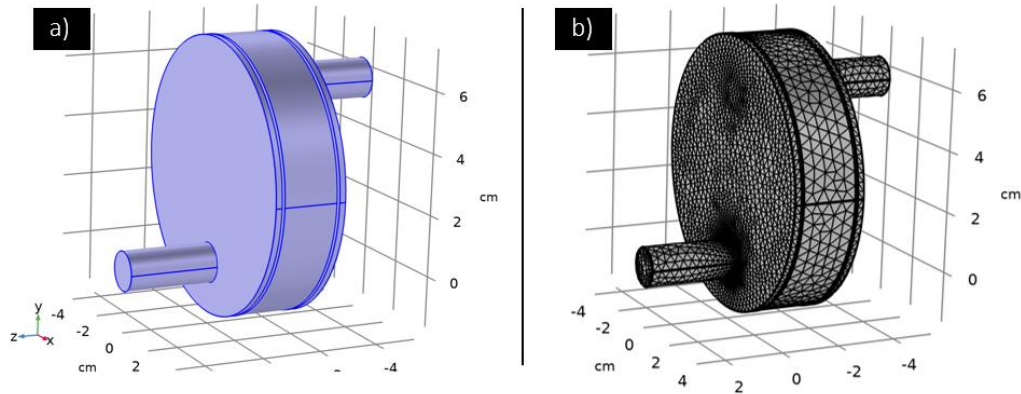


Figura 3.17. Interior del electrolizador 3D en COMSOL Multiphysics a) asignación de material, b) malla gruesa.

Al realizar estas modificaciones fue posible reducir el tiempo de malleo y computo, sin afectar los resultados, observando que las líneas de flujo tienen el mismo comportamiento previamente vistos.

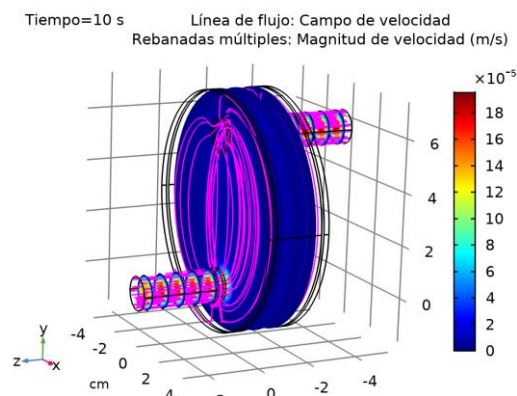


Figura 3.18. Interior del electrolizador 3D en COMSOL Multiphysics con línea de flujo: campo de velocidad, magnitud de velocidad (m/s).

Después de analizar el comportamiento del fluido en el interior del reactor, en las siguientes simulaciones se propuso colocar burbujas en las posiciones y con la distribución que se obtuvo en las pruebas experimentales, contemplando únicamente la brecha donde se lleva a cabo la reacción y las burbujas dentro de electrolizador.

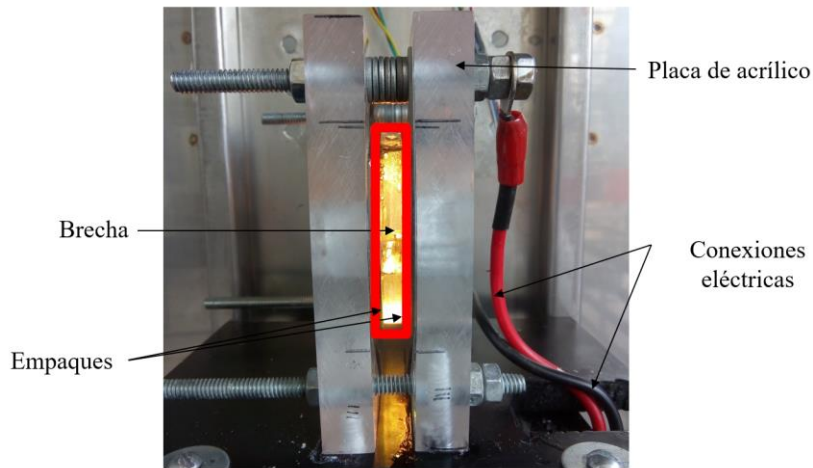


Figura 3.19. Electrolizador con separación.

En estas simulaciones se pudieron observar el tiempo de ascenso de la burbuja y a su vez la trayectoria que sigue.

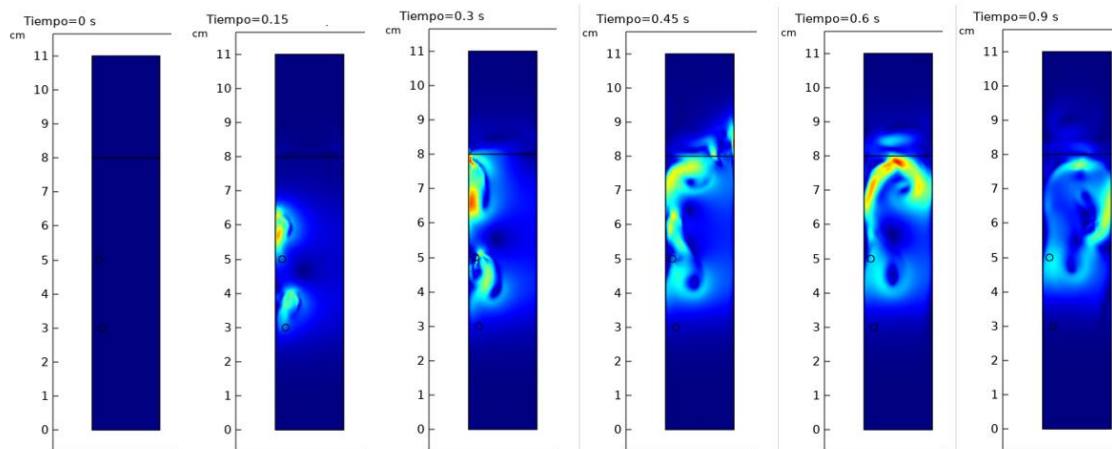


Figura 3.20. Secuencia de imágenes que muestran el comportamiento de dos burbujas

A continuación, se muestra otra secuencia de imágenes de dos burbujas después de su desprendimiento, considerando que el color azul es el electrolito y el rojo el aire que puede estar dentro del reactor, es posible identificar como las burbujas no tienen la capacidad de salir del electrolito.

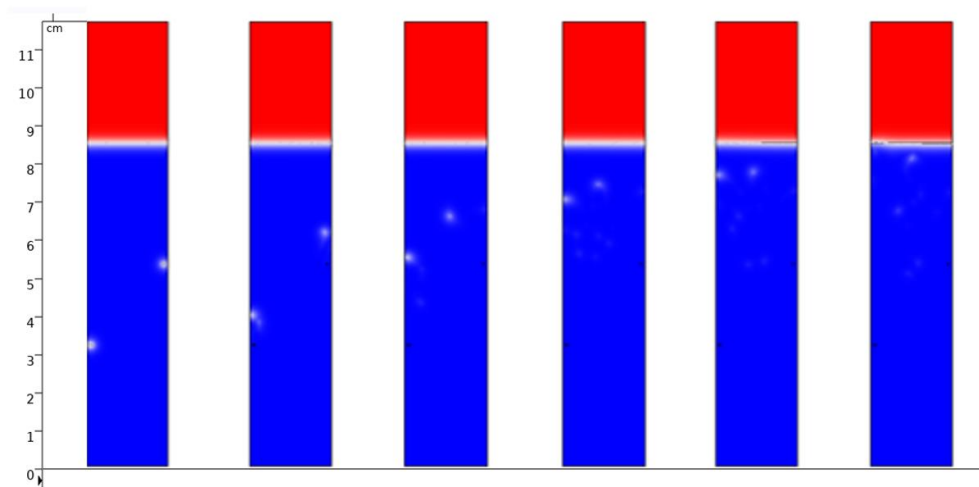


Figura 3.21. Secuencia de imágenes que muestran la interfaz de dos burbujas antes y después de que la burbuja golpea la superficie

En seguida se realizó una variación con ocho burbujas, esta referencia se adquirió de los datos experimentales, teniendo en cuenta que el comportamiento obtenido que se tiene sería el correspondiente al de un voltaje de 1.8 V. Como se ve en la Figura 3.22, las burbujas de la parte inferior se alejan más del electrodo izquierdo, sin embargo, al llegar a la superficie crea una turbulencia mayor en comparación con la de 2 burbujas.

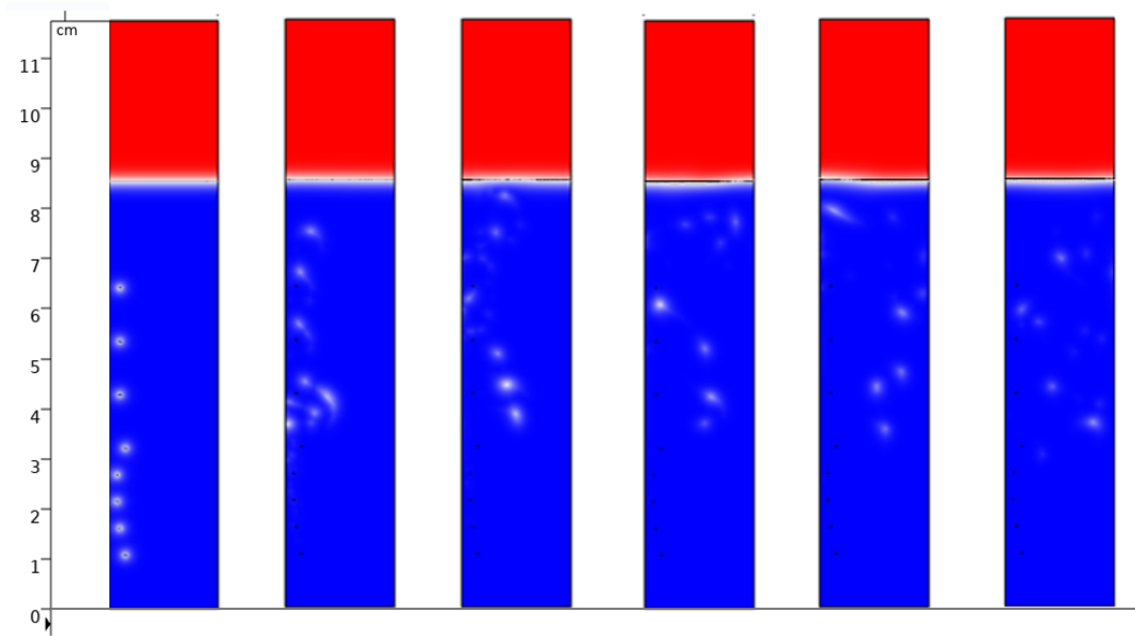


Figura 3.22. Secuencia de imágenes que muestran la interfaz de ocho burbujas.

CONCLUSIONES

En lo que respecta a la caracterización del sistema de reacción fue posible desarrollar un modelo basado en un software CAD con una correspondencia equivalente del 100% con respecto de la mecánica del reactor original, lo que incluye la capacidad de identificar los volúmenes específicos, componentes y accesorios del reactor lo que deriva en la capacidad de simular los sistemas de reacción además de manipular digitalmente al reactor incrementando el número de etapas de reacción, procedimiento extremadamente útil considerando que la reacción original tienen una clara dependencia con la superficie de reacción.

El modelo desarrollado aditivamente con la plataforma de software en CFD (SolidWorks y COMSOL Multiphysics) permitió simular la hidrodinámica del sistema de reacción y comparar los fenómenos identificables visualmente entre el sistema de reacción experimental y el sistema simulado, para con ello proponer una malla más específica, considerando una de las limitantes el poder de cómputo.

Finalmente, el modelo es capaz de reproducir los fenómenos más evidentes del proceso de electrolisis en el interior del reactor lo que físicamente es un procedimiento complejo dados los espacios y condiciones de operación, por lo que fue posible desarrollar un modelo sujeto a las restricciones metodológicas persistente hoy en día, con lo que fue posible comparar resultados de las simulaciones con pruebas experimentales.

Como recomendación se propondría incrementar la precisión y exactitud del modelo cuantitativamente planteando un sistema de ecuaciones que permitan aproximar de manera más precisa, por ejemplo, la concentración de gases y equilibrio dinámico entre las fases y los componentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelouahed, L., Hreiz, R., Poncin, S., Valentin, G., & Lopicque, F. (2014). Hydrodynamics of gas bubbles in the gap of lantern blade electrodes without forced flow of electrolyte: Experiments and CFD modelling. *Chemical Engineering Science*, *111*, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.01.028>
- Amores, E., Rodríguez, J., & Carreras, C. (2014). Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(25), 13063–13078. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.001>
- Anderson Jr., J. D., DeGroot, J., Dregrez, G., Dick, E., Grunemann, R., & Vierendeels, J. (2009). *Computational Fluid dynamics AN INTRODUCTION* (J. F. Wendt (ed.); Third Edit). Springer.
- Bakker, M. M., & Vermaas, D. A. (2019a). Gas bubble removal in alkaline water electrolysis with utilization of pressure swings. *Electrochimica Acta*, *319*, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.06.049>
- Bakker, M. M., & Vermaas, D. A. (2019b). Gas bubble removal in alkaline water electrolysis with utilization of pressure swings. *Electrochimica Acta*, *319*, 148–157.
- Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, *78*(5), 661–669. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.003>
- Barco-Burgos, J., Eicker, U., Saldaña-Robles, N., Saldaña-Robles, A. L., & Alcántar-Camarena, V. (2020). Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure. *Fuel*, *276*(April), 117910. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117910>
- Bhandari, R., Trudewind, C. A., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review. *Journal of Cleaner Production*, *85*, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>
- Blazek, J. (2015). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications: Third Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19038-1>
-

-
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Carreras, C., & Amores, E. (2014). *Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production*. 9. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.001>
- Carvajal Osorio, H., Babativa, J. H., & Alonso, J. A. (2011). Estudio sobre producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. *Ingeniería Y Competitividad*, 12(1), 31–42. <https://doi.org/10.25100/iyc.v12i1.2700>
- Chaturvedi, D. K. (2010). *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink*. Taylor and Francis Group.
- Diéguez, P. M., Ursúa, A., Sanchis, P., Sopena, C., Guelbenzu, E., & Gandía, L. M. (2008). Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: Experimental study and mathematical modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24), 7338–7354. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.051>
- El-Askary, W. A., Sakr, I. M., Ibrahim, K. A., & Balabel, A. (2015). Hydrodynamics characteristics of hydrogen evolution process through electrolysis: Numerical and experimental studies. *Energy*, 90, 722–737. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.108>
- Gardner, D. (2009). Hydrogen production from renewables. *Renewable Energy Focus*, 9(7), 34–37. [https://doi.org/10.1016/s1755-0084\(09\)70036-5](https://doi.org/10.1016/s1755-0084(09)70036-5)
- Ghorbani, B., & Vijayaraghavan, K. (2019). A review study on software-based modeling of hydrogen-fueled solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13700–13727. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.217>
- H.K., Versteeg; W., M. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics THE FINITE VOLUME METHOD. En *Pearson Education Limited* (Second edi, Número 2). Person Education Limited.
- Haug, P., Koj, M., & Turek, T. (2017). Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 9406–9418.
-

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.111>

- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- Hreiz, R., Abdelouahed, L., Fünfschilling, D., & Lopicque, F. (2015a). Electrogenerated bubbles induced convection in narrow vertical cells: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, *100*, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.035>
- Hreiz, R., Abdelouahed, L., Fünfschilling, D., & Lopicque, F. (2015b). Electrogenerated bubbles induced convection in narrow vertical cells: PIV measurements and Euler-Lagrange CFD simulation. *Chemical Engineering Science*, *134*, 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.04.041>
- Kajishima, T., & Taira, K. (2017). *Computational Fluid Dynamics Incompressible Turbulent Flows*. Springer.
- Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., & Moussiopoulos, N. (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, *29*(14), 1443–1450. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.016>
- Mandin, Ph, Wüthrich, R., & Roustan, H. (2009). Electrochemical engineering modelling of the electrodes kinetic properties during two-phase sustainable electrolysis. En *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 27, Número C). Elsevier Inc. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70293-7](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70293-7)
- Mandin, Philippe, Derhoumi, Z., Roustan, H., & Rolf, W. (2014). Bubble over-potential during two-phase alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, *128*, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.068>
- Milewski, J., Guandalini, G., & Campanari, S. (2014). Modeling an alkaline electrolysis cell through reduced-order and loss-estimate approaches. *Journal of Power Sources*, *269*, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.138>
- Nikolaidis, P., & Poulidakas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 597–611.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>

Nikolic, V. M., Tasic, G. S., Maksic, A. D., Saponjic, D. P., Miulovic, S. M., & Marceta Kaninski, M. P. (2010). Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis - Energy saving. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(22), 12369–12373. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.069>

Olivier, P., Bourasseau, C., & Bouamama, P. B. (2017). *Low-temperature electrolysis system modelling : A review*. 78(February), 280–300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.099>

Pletcher, D., & Li, X. (2011). Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(23), 15089–15104. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.080>

Rand, D. A. J., & Dell, R. M. (2005). The hydrogen economy: A threat or an opportunity for lead-acid batteries? *Journal of Power Sources*, 144(2), 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.017>

Shen, M., Bennett, N., Ding, Y., & Scott, K. (2011). A concise model for evaluating water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22), 14335–14341. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.029>

Ulleberg, Ø. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers a system.pdf. *Hydrogen Energy*, 28, 21–33. http://ac.els-cdn.com/S0360319902000332/1-s2.0-S0360319902000332-main.pdf?_tid=9de625b8-a749-11e2-af8d-00000aab0f6b&acdnat=1366194721_e2bd5a3ec87dd1ed6fb5af4c9b55380e

Ursúa, A., Gandía, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *IEEE*, 100(2), 410–426.

Ursúa, A., Marroyo, L., Gubía, E., Gandía, L. M., Dieguez, P. M., & Sanchis, P. (2009). Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. *International Association for Hydrogen Energy*, 34, 3221–3233.

Valerga, A. P., Batista, M., Bienvenido, R., Fernández-Vidal, S. R., Wendt, C., & Marcos, M. (2015). Reverse Engineering Based Methodology for Modelling Cutting Tools. *Procedia Engineering*, 132(December), 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.607>

- Vogt, H., & Balzer, R. J. (2005). The bubble coverage of gas-evolving electrodes in stagnant electrolytes. *Electrochimica Acta*, 50(10), 2073–2079. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.09.025>
- Xamán, J., & Gijón-Rivera, M. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*.
- Yuvaraj, A. L., & Santhanaraj, D. (2014). A systematic study on electrolytic production of hydrogen gas by using graphite as electrode. *Materials Research*, 17(1), 83–87. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000153>
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>
- Zhu, J., Zhang, X., Lv, P., Wang, Y., & Wang, J. (2018). An experimental investigation of convective mass transfer characterization in two configurations of electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.172>

APÉNDICE A

Tabla 1. Ficha de componente: Placa de acrílico.



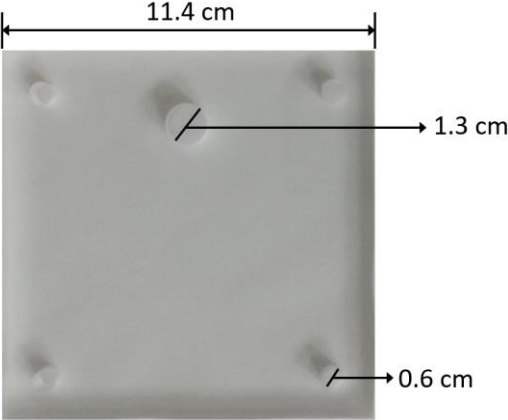
	<p>Ficha de componentes Sistema de electrólisis</p>	
<p>Nombre: Placa de acrílico</p>	<p>No. de componente 1/3</p>	
<p>Descripción: Placa de geometría cuadrada con cinco perforaciones. Las cuatro perforaciones pequeñas (0.6 cm) es el lugar donde se colocan los tornillos que sirve como soporte. La perforación central superior permite la alimentación del flujo de electrolito al sistema, y desalojo de gas.</p>		
<p>Imagen:</p> 	<p>Material: Acrílico</p> <p>Espesor: 1.5 cm Lado: 11.4 cm</p> <p>Función: Actúa como barrera aislante de los electrodos y el exterior, además da soporte al sistema.</p>	

Tabla 2. Ficha de componente: Empaque (O-ring).



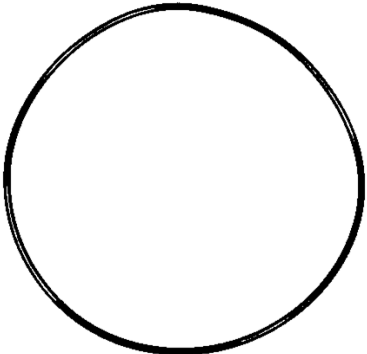


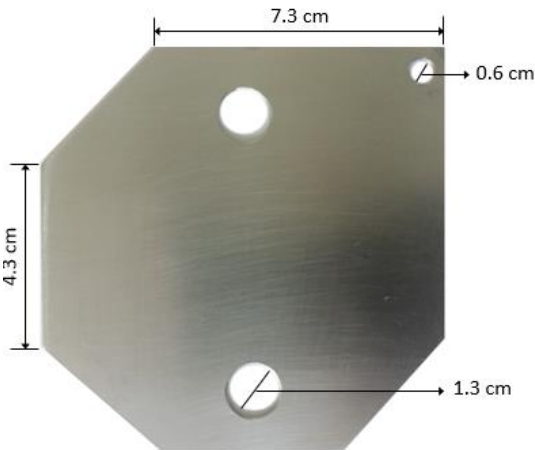
	Ficha de componentes Sistema de electrólisis	
Nombre: Empaque (O-ring)		No. de componente 2/3
Descripción: Anillo elástico eficaz para evitar la pérdida o fuga de líquidos o gases.		
		Material: Goma
		Espesor: 0.2 cm Diámetro: 9.0 cm
		Función: Sirve como junta hermética entre ánodo, cátodo y la placa de acrílico, así mismo evita que los electrodos entren en contacto.

Tabla 3. Ficha de componente: Electrodo.

	<p>Ficha de componentes Sistema de electrólisis</p>	
<p>Nombre: Electrodo</p>		<p>No. de componente 3/3</p>
<p>Descripción: Placas de geometría irregular, con tres perforaciones, la perforación pequeña (0.6 cm) es el lugar donde se coloca el tornillo que sirve como soporte y al mismo tiempo permite la transferencia de energía. La perforación inferior permite el flujo de electrolito dentro del sistema, mientras que el superior es la zona de desalojo de gas.</p>		
<p>Imagen:</p> 		<p>Material: Acero inoxidable 316</p> <p>Espesor: 0.1 cm</p> <p>Función: Actúa como ánodo o cátodo según la posición donde sea colocado. Es el lugar donde se lleva a cabo la reacción.</p>

ANEXO

En lo que respecta a los resultados con un voltaje establecido se tiene la Figura 3.23 donde se muestra el avance que tienen las burbujas de oxígeno al momento de que se pone en marcha el sistema a partir de voltajes superiores a 2 V.

Se observó que la placa se llena en su totalidad de burbujas y la mayoría de estas burbujas se desprenden y comienzan a ascender. Al momento de llegar a la parte superior del sistema se presentan dos casos: en el primero las burbujas de gas logran vencer la tensión superficial de la solución y salen del sistema, en el segundo las burbujas no son lo suficientemente rápidas para poder salir, por lo que, cierto número de ellas chocan con la superficie del líquido y retornan hacia el centro de las placas, generando un remolino entre el ánodo y el cátodo. Este movimiento de ascenso-golpe-remolino, se ve incluso hasta cuando el sistema está totalmente mezclado, además, la distancia hasta donde se extienden el remolino depende de la cantidad de energía que sea suministrada y el tiempo que tarda en desarrollarse podría considerarse instantáneo ya que se desarrolla en menos de 20 segundos.

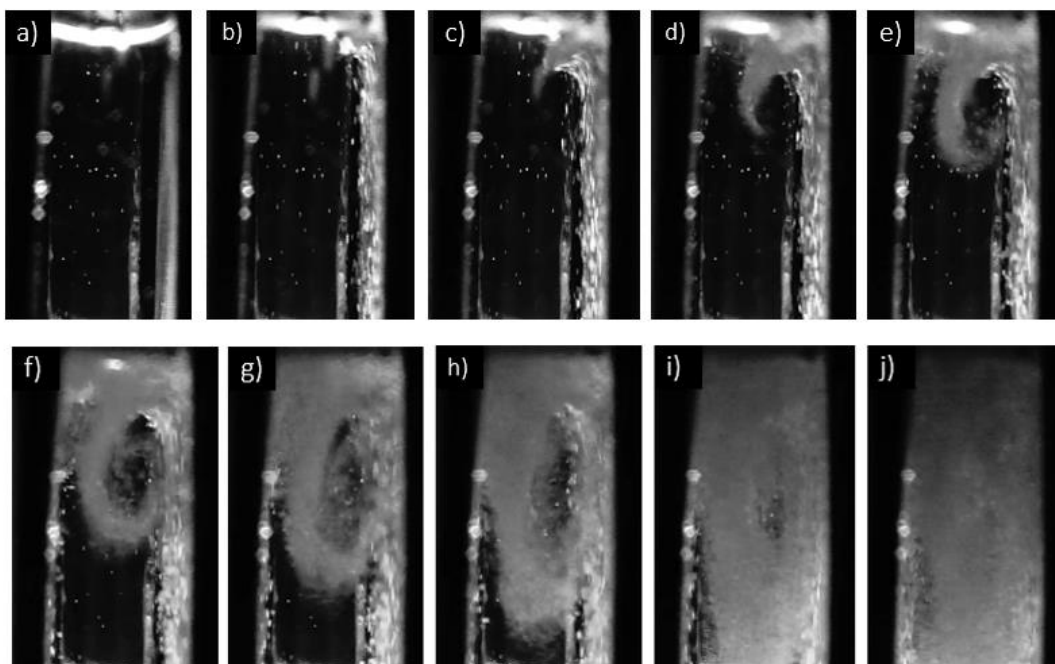


Figura 3.23. Comportamiento de las burbujas en la parte superior del reactor

En estas pruebas se identificó que cada vez que el sistema se ponía en marcha en el ánodo se lograba distinguir un cambio en la superficie de reacción, como se ve en la Figura 3.23 (a), entonces se realizó un ajuste para observar de mejor manera lo que ocurría en esa zona.