



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS CONCEPTUAL, CONSTRUCTIVO Y EXPERIMENTAL DE UN
ELECTROLIZADOR CON DIFERENTES ELECTRODOS, PARA LA
OBTENCION DE HIDRÓGENO DESDE AGUA PURA Y SALADA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

OCTAVIO ESTEBAN SOTO ALEGRE

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO ANDRÉS MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE SILVA SANCHEZ
RODRIGO MORENO VIEYRA

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: OCTAVIO ESTEBAN SOTO ALEGRE
FECHA: ENERO 2020
PROFESOR GUIA: PATRICIO MENDOZA ARAYA

ANÁLISIS CONCEPTUAL, CONSTRUCTIVO Y EXPERIMENTAL DE UN ELECTROLIZADOR CON DIFERENTES ELECTRODOS, PARA LA OBTENCION DE HIDRÓGENO DESDE AGUA PURA Y SALADA

La civilización desde tiempos inmemoriales ha dependido de combustibles fósiles para calefaccionar, cocinar, iluminar y transportarse, con la contaminación que la combustión de los hidrocarburos genera.

Existen algunas alternativas a la dependencia de los combustibles fósiles. El Hidrógeno es una opción, pero en la actualidad se produce a partir de hidrocarburos. Una alternativa limpia para obtenerlo es la electrolisis.

El presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un electrolizador experimental para la producción de hidrógeno electrolítico. Este dispositivo es el encargado de convertir la energía eléctrica en hidrógeno y oxígeno. La idea es explorar el comportamiento de una celda electrolítica con agua pura, agua potable y agua salada.

En este trabajo se presentan las curvas características corriente voltaje para diferentes distancias entre electrodos. Se estudia como varían estas curvas en función de la salinidad. Se experimenta con distintos electrodos, para ver cuál de ellos permite una obtención de hidrógeno más eficiente.

Como resultado del trabajo, se obtiene hidrógeno a partir de agua pura, agua potable y agua salada. El electrodo que obtuvo mayor eficiencia es el fabricado con acero 316L. Se comprueba que un electrodo rectangular en posición horizontal es ligeramente más eficiente que en la posición vertical. Hay mayor eficiencia a: menor voltaje, menor separación entre electrodos y mayor salinidad del agua.

Agradecimientos:

A Dios por permitirme vivir y hacer realidad muchos de mis sueños.

A mi padre Octavio y madre Adela por guiarme durante toda mi vida, a mi señora Romina por la paciencia y apoyo que me ha brindado. A mi sobrina Sofía que dio una gotita de su tiempo para contribuir a este trabajo. A Eduardo Correa que siempre ha confiado en mi trabajo y entregó el soporte y facilidades para terminarlo. A Ricardo García y Andrés Cortes por su ayuda desinteresada en el proyecto.

A Ernesto Bianchi Souter que me dio la oportunidad de desarrollar este tema, me aconsejó durante años y me impulsó a finalizarlo. A Patricio Mendoza, por tomar este desafío y guiarme exitosamente. A Bernardita Pezoa por toda la ayuda brindada en el departamento de eléctrica.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcances	5
1.5. Estructura del documento.....	5
2. Marco teórico y estado del arte	7
2.1. El hidrógeno.....	7
2.2. Electrólisis.....	8
2.1.1. Electrolizador alcalino	9
2.1.2. Electrolizador PEM (membrana de intercambio de protones)	10
2.1.3. Electrolizador SOE (óxido sólido)	11
2.2. Termodinámica	13
2.3. Ecuación de estado gases ideales	14
2.4. Hidrogeno obtenido y eficiencia de la celda electrolítica.....	15
2.5. Modelamiento teórico de la electrólisis del agua	16
2.6. Almacenamiento del hidrógeno	17
2.6.1. Gas comprimido en cilindros de alta presión	17
2.6.2. Líquido en tanques a baja temperatura (a 20,15 K)	18
2.6.3. Hidrógeno adsorbido en materiales con una gran área superficial específica.....	18
2.6.4. Hidrógeno absorbido mediante hidrocarburos metálicos.....	18
2.7. Transporte del hidrógeno	18
2.7.1. Transporte en camiones cisterna o estanques	18
2.7.2. Transporte en barcos	19
2.7.3. Transporte por gasoducto	19
3. Metodología	20
3.1. Diseño plasmado en planos	21
3.2. Construcción del electrolizador	21
3.3. Caracterización del electrolizador	21
3.4. Evaluación	21
3.5. Análisis de riesgos.....	22

4.	Diseño y construcción del electrolizador	23
4.1.	Diseño del electrolizador	23
4.1.1.	Limitaciones físicas de elementos del electrolizador	23
4.1.2.	Diseño de la celda.	24
4.1.3.	Construcción de la celda.....	25
5.	Caracterización y evaluación del electrolizador	27
5.1.	Caracterización del electrolizador	27
5.1.1.	Obtención de curvas Corriente-voltaje (agua desionizada).....	28
5.1.2.	Obtención de curvas Corriente-voltaje (agua potable)	31
5.1.3.	Obtención de curvas Corriente-voltaje (agua salada).....	32
5.1.4.	Obtención de eficiencia de producción de hidrógeno	34
5.2.	Evaluación del electrolizador.....	39
5.2.1.	Curvas con agua desionizada.....	39
5.2.2.	Curvas con agua potable	39
5.2.3.	Curvas con agua salada	40
6.	Conclusiones	43
6.1.	Trabajo futuro	44
7.	Bibliografía	46
8.	Anexos.....	48
8.1.	Tablas y planos.....	48

1. Introducción

1.1. Motivación

Desde tiempos antiguos el ser humano ha necesitado alguna fuente de energía para sobrevivir a las inclemencias del entorno que lo rodea (frio, oscuridad y más adelante la necesidad de transporte). En la edad de piedra se utilizó la energía proveniente del fuego producido con leña, para calefaccionar, cocinar alimentos e iluminar [1].

En la edad de los metales el fuego además sirvió para dar forma a las herramientas y armas manuales. Más adelante el carbón mineral reemplazo a la leña y no solo se utilizó para fundir metal, sino que también para calentar el agua y generar vapor, que fue el encargado de liderar el movimiento de maquinarias en la revolución industrial. En la actualidad, la sociedad es dependiente del petróleo y gas para producir combustión.

Los párrafos anteriores nos muestran la dependencia de la especie humana sobre algún recurso natural o fósil para producir energía térmica a partir de su combustión (el fuego se produce por combustión de algún recurso natural o de algún recurso fósil con oxígeno y una fuente de calor inicial [2]). Esta energía térmica luego se puede transformar en energía cinética que se puede utilizar para mover motores (movimiento de maquinarias y transporte), producir energía eléctrica, etc.

Sin embargo, se tienen varios problemas con las energías dependientes de la combustión de combustibles fósiles o leña:

- El petróleo e hidrocarburos no se produce en todas partes del mundo y la cantidad de reservas mundiales son limitadas. En particular, Chile importa el 98,8 % del petróleo crudo [3], por lo tanto el precio local del insumo depende de las variaciones del precio internacional.
- Los hidrocarburos tienen dificultad para transportarse, pues deben llevarse desde el lugar de extracción hasta el lugar de consumo.
- La contaminación del aire producida por la combustión, que libera dióxido de carbono. Por lo cual sería ideal ocupar alguna fuente de energía cuya combustión sea más limpia.

Se necesita un combustible similar al petróleo o gas natural, cuya extracción y combustión no sea contaminante y que se encuentre disponible en buena parte del planeta.

El hidrógeno puede cumplir con estas condiciones, pero a diferencia de la leña, el carbón, el petróleo o el gas natural, no es un recurso natural o mineral. Su producción se efectúa a partir de otras materias primas (agua o hidrocarburos), utilizando alguna fuente de energía primaria (nuclear, renovable o no renovable).

La producción de hidrógeno se realiza actualmente por medio de diversos procesos. El 48% de la demanda global es suministrada por medio de reformado de vapor de gas

natural, un 30% por reformado de petróleo, un 18% por gasificación de carbón mineral, un 3,9% por electrolisis de agua y 0,1% por otros medios [4]. En total, un 96% de la producción de hidrógeno utiliza como insumo algún tipo de combustible fósil y además se efectúan a altas temperaturas, que generalmente se obtienen a partir de combustión de hidrocarburo. Por lo cual estos procesos no son muy amigables con el medio ambiente, la salud humana y el clima.

El hidrógeno se puede obtener de manera limpia por medio de la electrólisis del agua, desde un dispositivo electrolizador que utiliza como fuente de energía primaria la energía eléctrica (obtenida idealmente de alguna energía renovable). El hidrógeno gaseoso producido se puede:

- Almacenar en estanques para ocuparlo cuando sea necesario.
- Transportar desde un lugar a otro por diversos métodos. El más conocido es como gas comprimido, pero también se puede transportar por medio de gasoductos.
- Utilizar en una celda de combustible de hidrógeno, para producir el proceso inverso que convierte la energía química en energía eléctrica [5]. Esto puede servir para:
 - Fabricar generadores eléctricos portátiles e impulsar vehículos eléctricos
 - Producir electricidad e inyectarla a la red.
- Mezclar con oxígeno y efectuar la combustión para: mover motores de combustión interna, mover turbinas, soldar metales, calefaccionar y calentar agua. Por lo tanto el hidrógeno se puede utilizar como combustible en la mayoría de las aplicaciones donde los combustibles fósiles son usados en la actualidad, sin emisiones dañinas [6].

Un esquema de la interconexión de estos dispositivos [7] se muestra en la figura 1.

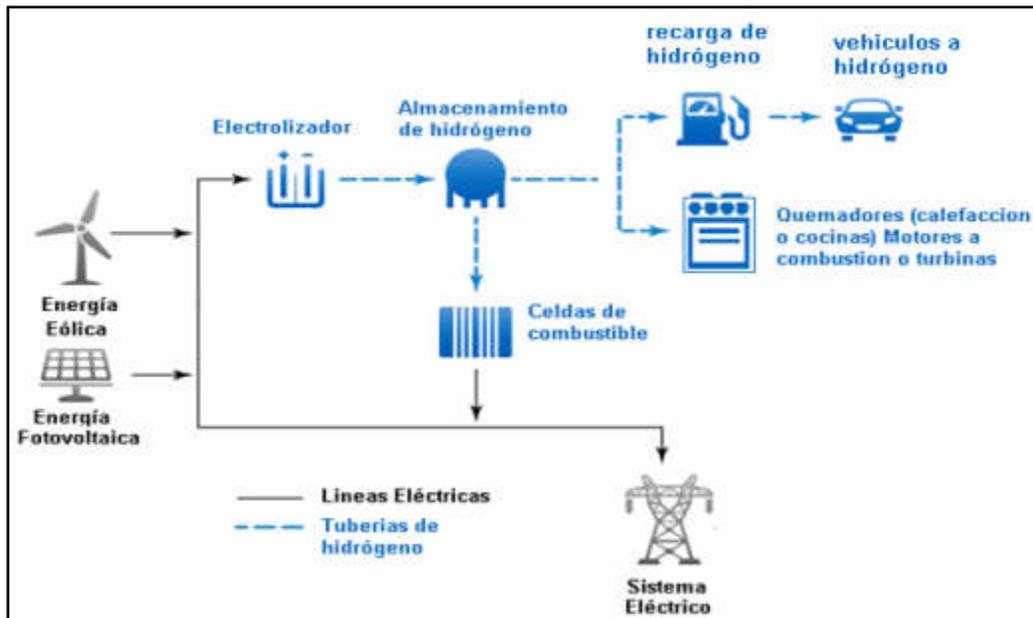


Figura 1: Esquema de interconexión de dispositivos para utilización del hidrógeno [7]

Dada la gran versatilidad del hidrógeno, resulta atractivo producirlo de manera limpia por medio de la electrólisis utilizando un insumo abundante como el agua y no desde los hidrocarburos.

El primer experimento documentado utilizando electrólisis fue en el año 1789 por Paets van Troostwyk y Deinman. Existen tres tipos de electrolizadores:

- Electrolizador Alcalino: El primero fue desarrollado en Suiza en el año 1902. Se instalaron varias plantas a gran escala en Noruega, pero la última cerró en 1992, debido a que producir hidrógeno por medio de reformado de gas tenía menor costo económico [8].
- Electrolizadores con membrana de intercambio de protones (electrolito sólido): se comenzaron a desarrollar en los inicios del programa espacial de Estados Unidos, alrededor de 1950.
- Electrolizadores de óxido sólido: Los primeros se comenzaron a fabricar en 1970, pero aun se encuentran en etapa de desarrollo.

Actualmente existen diversos organismos en el mundo, encargados del desarrollo, investigación y normativa del uso de hidrógeno y celdas de combustible en cada uno de sus países (USA, Alemania, España, etc). Ellos incentivan los diversos programas piloto que buscan conectar los sistemas de generación eléctrica eólica y fotovoltaica con los hidrolizadores, para producir hidrógeno de manera limpia.

El plan piloto más cercano está en Argentina. La planta Hychico cuenta con un parque eólico de 6,3[MW] y dos hidrolizadores capaces de producir 120 m³/h de hidrógeno. Este se almacena en unos estanques y luego es mezclado con gas natural para hacer funcionar un motor de combustión interna acoplado a un generador de 1,4[MW]. También desarrollaron un hidrógeno-ducto de 2,3 [km] de longitud para efectuar pruebas de transporte del gas [9].

En Alemania hay 43 estaciones de reabastecimiento de hidrógeno para vehículos con celda de combustible, en USA hay 73 y en Japón 90 [10]. Además los alemanes tendrán el 2020 una planta electrolizadora que producirá 1300 toneladas de hidrógeno al año [11] y el 2021 un servicio de trenes que funcionan en base a hidrógeno.

1.2. Descripción del problema

En nuestro país, a fines del año 2017, en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, un equipo liderado por el profesor Ernesto Bianchi construyó un electrolizador demostrativo, capaz de producir hidrógeno y oxígeno en proporción estequiométrica (dos unidades de volumen de hidrógeno por una de oxígeno). Las paredes del dispositivo son de acrílico transparente, por lo cual fue posible observar directamente la producción de gases. El autor de este trabajo participó en aquella experiencia, de la cual se observaron los siguientes problemas:

- Degradación de los electrodos producto de las reacciones electroquímicas que se producen en la superficie de estos.

- Contaminación del agua producto de la presencia de óxido férrico (desprendido desde los electrodos).
- Estanques y celda no aguantaron la presión del agua que se utilizó como insumo (presión de red de agua potable), por lo que se disminuyó la presión a la equivalente de una columna de agua de 0,6 metros (0,058 atm).
- Falta de un elemento separador de gases efectivo. Se utilizaron 2 tipos de separadores de gases y no funcionaron correctamente. Se recomienda el uso de una membrana semipermeable de comprobada efectividad.

Adicionalmente surgieron nuevas inquietudes producto de la experiencia efectuada:

- ¿Es posible producir hidrógeno con un electrolizador de construcción simple y de bajo costo?
- ¿Es posible aumentar la eficiencia del proceso?
- Los gases se producen en forma de burbuja en la superficie de los electrodos, pero no se desprenden de manera fácil desde ellos.
- ¿Qué efecto tiene la configuración física de los electrodos en el proceso de electrolisis? Generalmente se utilizan electrodos cuadrados o circulares. ¿Qué ocurre si se utilizan electrodos rectangulares?
- Si se utilizan electrodos rectangulares ¿Qué ocurre si se posicionan de manera vertical u horizontal? ¿De qué manera afecta esto a la eficiencia del proceso electroquímico?

Para dar respuesta a estas preguntas se desarrolla este trabajo, que consiste en diseñar y construir un electrolizador experimental, para producir hidrógeno a partir de la energía eléctrica obtenida de la energía solar fotovoltaica, energía eólica u otra energía limpia utilizando como insumo agua.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo principal de este estudio es diseñar y construir un electrolizador experimental para la producción de hidrógeno electrolítico. Este dispositivo es el encargado de convertir la energía eléctrica en hidrógeno y oxígeno.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos definidos para este estudio son:

- Presentar las diferentes tecnologías disponibles para la obtención de hidrógeno por medio de electrólisis.
- Presentar la teoría existente tras el proceso electrolítico para la obtención de hidrógeno.

- Diseñar y construir un electrolizador experimental que utilice un separador de gases para efectuar experiencias prácticas. El uso de este separador asegura la separación efectiva del hidrógeno y oxígeno producidos, además de facilitar la conducción iónica entre el ánodo y el cátodo.
- Efectuar experiencias y mediciones prácticas con el electrolizador construido para:
 - Determinar el efecto de la distancia entre los electrodos del electrolizador, en la eficiencia del proceso electroquímico.
 - Determinar el efecto de la configuración física de los electrodos del electrolizador, en la eficiencia del proceso electroquímico.
 - Comparar datos obtenidos en experiencias prácticas con datos teóricos
 - Determinar el efecto de la degradación de los electrodos en la eficiencia del proceso electroquímico.
 - Efectuar pruebas con agua desmineralizada, agua potable y con agua salada (con diferentes niveles de salinidad).

1.4. Alcances

El electrolizador es experimental y no industrial, debido a que debe permitir cambiar su configuración física (tamaño y material de electrodos) para determinar los cambios en la producción de hidrógeno.

Este trabajo incluye solamente el diseño, construcción y pruebas experimentales del electrolizador.

Producto de los problemas encontrados con el dispositivo construido anteriormente, el nuevo electrolizador debe:

- Asegurar una separación efectiva de los gases producidos (oxígeno e hidrógeno), para entregar gases de alta pureza e impedir la peligrosa recombinación de los gases.
- El diseño del electrolizador debe ser robusto para soportar la presión de los gases producidos y la presión del agua utilizada como insumo.
- Los materiales metálicos a utilizar en el armado del electrolizador deben ser resistentes a la corrosión (conectores, pernos, tuercas y golillas de acero inoxidable).

1.5. Estructura del documento

El trabajo se encuentra conformado de la siguiente forma:

La motivación, introducción al tema, objetivos y alcance del trabajo están contenidos en el capítulo 1.

El capítulo 2 se dedica a revisar el estado del arte y la teoría detrás del proceso de la electrolisis. Se incluye una revisión a los distintos tipos de almacenamiento y transporte del hidrógeno.

El capítulo 3 describe las actividades secuenciales y necesarias para realizar el trabajo. Estas son el diseño, construcción, caracterización y evaluación del electrolizador.

El capítulo 4 muestra el proceso de diseño y construcción del electrolizador.

El capítulo 5 contiene la Caracterización y evaluación del electrolizador. Aquí se muestran las curvas características corriente-voltaje para los diferentes casos en estudio, que luego se analizan para obtener las conclusiones.

El capítulo 6 se dedica a las conclusiones, discusión final y trabajo futuro. Se incluyen como anexo las tablas de los datos obtenidos en los experimentos y los planos del electrolizador.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1. El hidrógeno

En el universo, el hidrógeno es el combustible de las estrellas. La fusión nuclear del hidrógeno se produce en ellas y la cantidad de energía liberada es tal, que hace que sean un foco de luz y calor para los planetas que le orbitan. En el sol de nuestro sistema solar, se fusionan unos 600 millones de toneladas de hidrogeno por segundo, produciendo unas 596 millones de toneladas de helio. Las restantes 4 millones de toneladas, se convierten en energía (fotones) [12].

El hidrógeno es el elemento químico más simple y ligero de la tabla periódica (2,02 g/mol). Su densidad como gas (0,0834 kg / Nm³) es 15,9 veces más ligero que la densidad del oxígeno.

El hidrógeno es un combustible con un amplio rango de inflamabilidad en aire, de 4 a 75% en volumen [13]. Es también el combustible con el mayor contenido de energía por unidad de masa, siendo su mayor valor calorífico (HHV) de 141,86 MJ / kg, casi 3 y 2,5 veces más energético que la gasolina y el metano, respectivamente [14].

En nuestro planeta, no se encuentra en estado libre debido a que por su baja densidad, la gravedad terrestre no puede retenerlo y escapa al espacio [12].

La mayor parte del hidrógeno en la Tierra se encuentra combinado con otros elementos: con el oxígeno forma H₂O (agua); en la materia viva, se encuentra en los carbohidratos; en los combustibles fósiles, en forma de hidrocarburos y gas natural.

Para obtenerlo existen diversos métodos, los cuales se pueden clasificar según el tipo de energía utilizada en el proceso:

- Energía térmica
 - Termólisis
 - Gasificación
 - Pirolisis
 - Reformado por medio de vapor
 - Reformado auto térmico
 - Oxidación parcial

- Energía solar
 - Fotólisis
 - Foto fermentación

- Energía bioquímica
 - Fermentación oscura
 - Bio-fotólisis

- Energía eléctrica:
 - Electrólisis

En siguientes secciones se explican brevemente los métodos existentes de obtención de hidrógeno a través de electrólisis.

2.2. Electrólisis

La electrólisis del agua consiste en hacer circular una corriente continua a través del agua para separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre de manera controlada dentro de un dispositivo que se llama electrolizador.

El electrolizador está compuesto de dos terminales metálicos: ánodo y cátodo, separados a una cierta distancia, sumergidos en una solución o electrolito. El ánodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal positivo de la batería o fuente de poder en corriente continua. El cátodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal negativo. Se aplica una tensión DC en estos electrodos y se produce la reacción electroquímica en la superficie de ellos. En el ánodo se produce oxígeno y en el cátodo se produce hidrógeno [21]. El esquema básico del electrolizador se presenta en la figura 2.

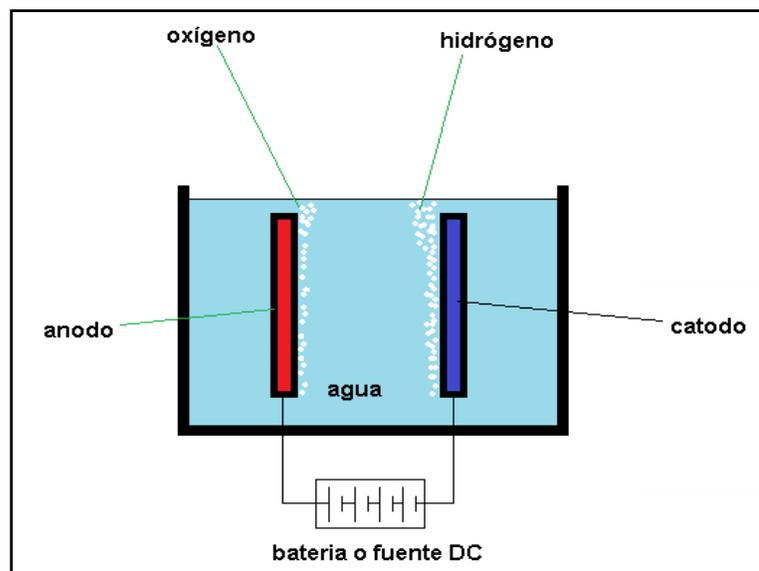


Figura 2. Esquema básico de un electrolizador

A continuación se presentan los 3 tipos de electrolizadores existentes. El principio de funcionamiento es el mismo, pero difieren en el electrolito y el separador de gases.

En todas las siguientes ecuaciones estequiométricas, el estado físico de los reactivos y de los productos se indica por medio de los símbolos (g), (l), (s) y (aq.) para indicar los estados gaseoso, líquido, sólido y acuoso respectivamente.

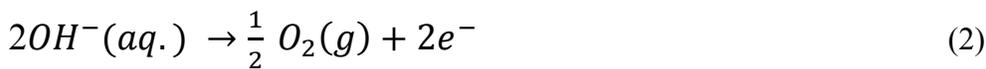
2.1.1. Electrolizador alcalino

El principio de funcionamiento de un electrolizador alcalino se ilustra en la figura 1. Está conformado por dos electrodos separados por una membrana o diafragma separador de gases. Este conjunto se encuentra sumergido en un electrolito líquido que suele ser una solución acuosa concentrada de agua destilada con KOH (hidróxido de potasio), del orden de 25-30% en peso, para aumentar su conductividad iónica [19].

Se produce hidrogeno gaseoso en la superficie del cátodo y los iones producidos son impulsados por el campo eléctrico hacia el ánodo según la siguiente reacción:



En el ánodo los iones producidos anteriormente se recombinan, para producir oxígeno y liberar electrones hacia el circuito eléctrico exterior [19]:



El principio de funcionamiento del electrolizador alcalino se muestra en la figura 3:

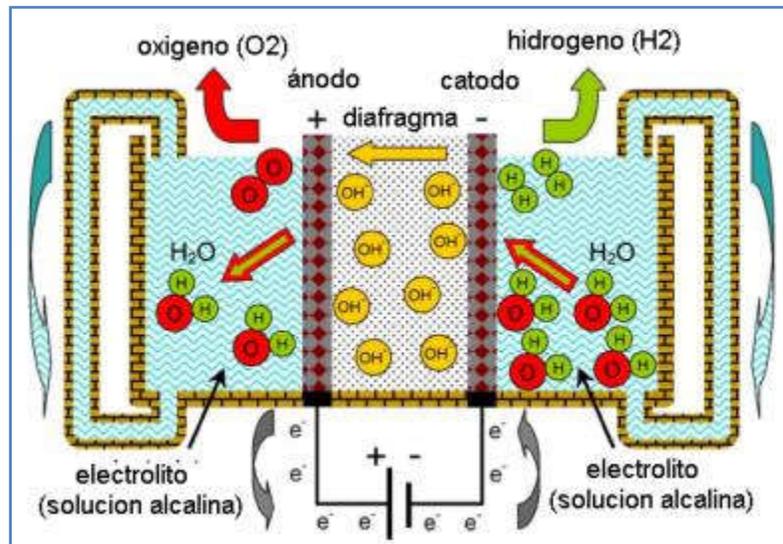


Figura 3. Esquema de funcionamiento electrolizador alcalino

La electrólisis alcalina es una tecnología madura y la más extendida a nivel comercial en el mundo, para la producción de hidrógeno hasta el rango de 1 [MW]. En el ánodo y cátodo utiliza elementos químicos no nobles como catalizadores, lo cual disminuye su costo de construcción. La vida útil de la celda se estima en 90.000 horas aproximadamente [22].

Las desventajas de esta tecnología son:

- Bajas densidades de corriente debido a altas pérdidas óhmicas a través del electrolito líquido y el diafragma.
- Grado de pureza de los gases producidos. El diafragma no impide completamente el cruce de gases producidos (La pureza del hidrógeno alcanza cerca del 99%).
- Baja presión de operación debido al electrolito líquido, que lo hace voluminoso para una configuración en serie (arreglo del estilo pila).
- Utilización de químicos en el electrolito NaOH (Hidróxido de Sodio) y KOH (Hidróxido de Potasio), que hacen la operación más complicada que en el caso de solo utilizar agua.

2.1.2. Electrolizador PEM (membrana de intercambio de protones)

En los electrolizadores PEM, el electrolito es una membrana polimérica delgada, que no permite que se mezclen los gases, ni permite la conducción electrónica. Está compuesta por grupos funcionales del ácido sulfónico (-SO₃H) que son responsables de la capacidad de conducción del protón (H⁺) a través de ella. La membrana más utilizada para la electrólisis del agua es Nafión [19].

El principio de funcionamiento del electrolizador PEM se muestra en la figura 4.

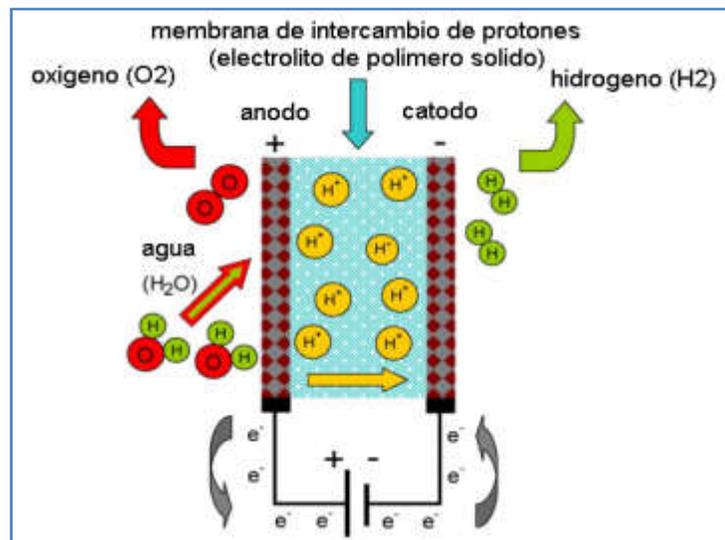
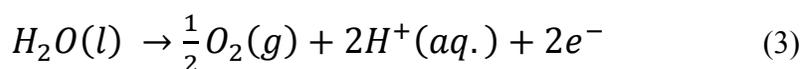


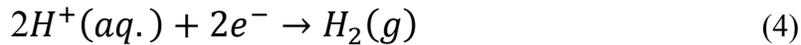
Figura 4. Esquema de funcionamiento electrolizador PEM

En el ánodo, se produce la siguiente reacción:



La molécula de agua se rompe y se produce oxígeno. Se liberan electrones al circuito eléctrico exterior y se liberan protones de hidrógeno. Estos protones son impulsados por el campo eléctrico a través de la membrana hacia el cátodo. Una vez en el cátodo, se

combinan con electrones del circuito eléctrico exterior y forman hidrógeno de acuerdo a la siguiente ecuación [19]:



Las ventajas de este proceso son [22]:

- Se alcanzan altas densidades de corriente debido a lo delgado de la membrana que es capaz de brindar buena conductividad de protones (0,1 S/cm).
- El transporte de protones a través de la membrana es rápido debido a que esta se diseño con ese propósito específico.
- Buen rango de carga parcial. La celda puede trabajar desde un 10% hasta el 100% de la potencia de entrada nominal.
- Diseño del sistema compacto debido al electrolito solido.
- Alta pureza del gas producido (99,999%) debido a que la membrana impide el cruce de gases producidos.
- Es ecológicamente limpio, debido a que no ocupa elementos químicos extras en el agua, como el caso del electrolizador alcalino.
- Los electrolizadores PEM son de tamaño reducido debido a la alta densidad de corriente que alcanza (mayor a 1A/cm²)

Las desventajas son:

- Alto costo de los componentes. La membrana Nafion es producida en USA y los electrodos son recubiertos por elementos químicos nobles como el platino e iridio.
- Baja durabilidad de los materiales si el ensamblado de la celda se efectúa de manera desprolija (torque excesivo, electrodos en contacto con membrana con bordes filosos)

2.1.3. Electrolizador SOE (óxido sólido)

Permite la electrólisis del vapor a altas temperaturas (600°C - 900°C), lo que resulta en mayores eficiencias comparadas con los electrolizadores alcalinos o PEM. [19]. Sin embargo aun se encuentra en etapa de desarrollo en laboratorios.

El principio de funcionamiento de un electrolizador SOE se muestra en la figura 5:

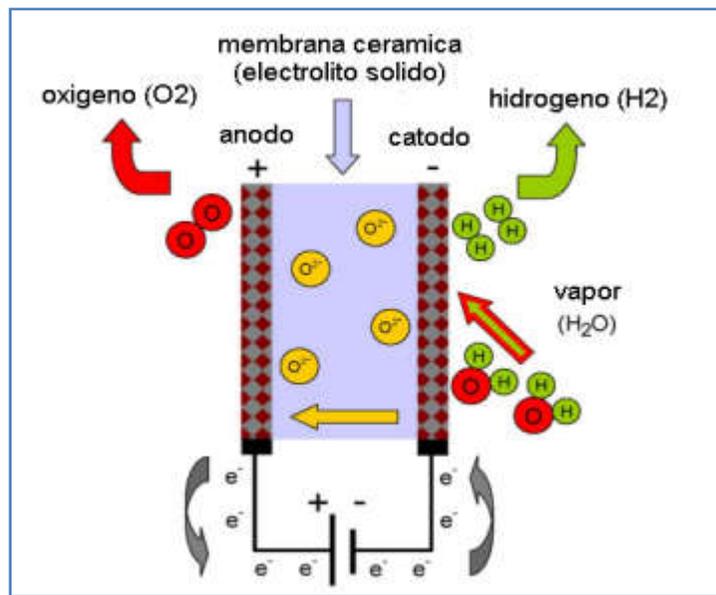
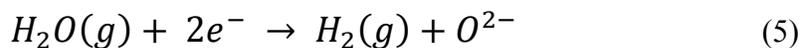


Figura 5. Esquema de funcionamiento electrolizador óxido sólido

En el cátodo, el agua se reduce para producir hidrógeno según la ecuación:



Por la acción del campo eléctrico aplicado, los aniones de óxido generados en el cátodo pasan a través del electrolito sólido al ánodo, donde se recombinan de acuerdo a la ecuación (6), formando oxígeno y liberando electrones hacia el circuito exterior [19].



Algunas ventajas del electrolizador óxido sólido son [22]:

- Permite operar a alta presión, por lo cual se evita ocupar energía en una etapa posterior de compresión de gases.
- No depende de elementos químicos nobles como catalizadores, que aumentan el costo de la construcción del equipo.
- La eficiencia del proceso de conversión electroquímico es del 100%. Toda la energía eléctrica aplicada es convertida en energía química almacenada en el hidrógeno y oxígeno.

Sin embargo este último punto también es su gran desventaja, debido a que el proceso debe efectuarse a altas temperaturas (entre 600 a 900 °C) con la consiguiente baja durabilidad de las cerámicas. Además se necesita una fuente de energía adicional (nuclear, solar geotérmica u otra) que permita llegar a esas temperaturas.

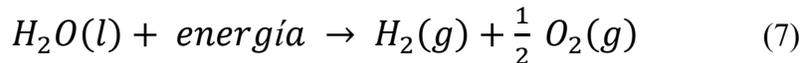
Después de examinar las ventajas y desventajas de los tres tipos de electrolizadores, se utilizará el electrolizador PEM debido a sus ventajas sobre los otros dispositivos: es de menor tamaño, soporta mayores densidades de corriente, no se utilizan químicos extras en el electrolito y asegura una alta pureza de los gases producidos, lo cual es

esencial si después el hidrógeno se quiere utilizar para producir energía eléctrica en las celdas de combustible.

2.2. Termodinámica

La molécula de agua está formada por dos átomos de Hidrógeno y un átomo de Oxígeno. La unión entre los átomos que la componen es mediante enlaces covalentes (los átomos comparten electrones de su capa de valencia) [15]. Estos enlaces son tan estables, que permanecen inalterables ante cambios de temperatura (cambia de estado físico, pero la estructura de la molécula de agua permanece sin cambios)

El objetivo de la electrolisis es romper los enlaces covalentes de la molécula de agua por medio de energía eléctrica, para descomponer el agua en estado líquido en hidrogeno y oxígeno gaseoso, de acuerdo a la ecuación (7) [22].



La energía necesaria para que ocurra la reacción está definida por el cambio en la entalpia del proceso ΔH . La energía requerida es suministrada por energía eléctrica ΔG (cambio en la energía libre Gibbs) y energía térmica Q , que es igual al producto entre la temperatura T y el cambio en la entropía del proceso ΔS [16].

La relación entre las magnitudes termodinámicas nombradas anteriormente está definida por la siguiente expresión [16]:

$$\Delta G = \Delta H - Q = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (8)$$

En el caso de la electrólisis, la reacción química es endotérmica ($\Delta H > 0$) y no espontánea ($\Delta G > 0$), por lo cual es necesario aplicar energía para que el proceso ocurra.

La fuente de energía del proceso es eléctrica y existe una tensión mínima a la cual ocurre la electrólisis. Esta tensión mínima, que se define como la tensión reversible (U_{rev}), se expresa como función de ΔG .

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{z \cdot F} \quad (9)$$

En la expresión anterior z es el número de electrones de valencia que intervienen en la reacción ($z=2$) y F es la constante de Faraday, equivalente a la carga de un mol de electrones (96485 C/mol). En condiciones estándar de laboratorio (298,15 K de temperatura y 1 atm de presión) se tiene que $\Delta G=237,21$ kJ/mol. Reemplazando estos valores en la ecuación 9 se tiene que:

$$U_{rev} = 1,229 V \quad (10)$$

El aporte de la energía térmica, en este caso, también es suministrado por medio de energía eléctrica. Por lo cual, toda la energía para efectuar el proceso electroquímico es eléctrica. En un proceso electrolítico ideal el cambio de entalpia es igual al total de la energía requerida. Se define así una tensión mínima, la tensión termo neutral (U_{tn}), que en el caso de un proceso ideal se expresa como sigue:

$$U_{tn} = V_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{z \cdot F} \quad (11)$$

En condiciones estándar de laboratorio se tiene que $\Delta H=285,84$ kJ/mol. Reemplazando estos valores en la ecuación (10) se tiene que:

$$U_{tn} = 1,481 V \quad (12)$$

Un proceso electrolítico real no es completamente adiabático (se intercambia calor con el entorno) y se producen diversas pérdidas, por lo cual generalmente se tiene que:

$$U_{tn} > V_{\Delta H} \quad (13)$$

Debido a que el hidrogeno y oxigeno se obtienen en estado gaseoso, es conveniente utilizar el modelo de gas ideal para describir su comportamiento (a baja presión y temperatura tal que el gas no se condense).

2.3. Ecuación de estado gases ideales

Para introducirse al mundo de los gases es conveniente definir un concepto químico importante: el mol. Un mol de cualquier sustancia es aquella cantidad de esa sustancia que contiene $6,022 \times 10^{23}$ partículas constituyentes (átomos o moléculas). El número de moles, se relaciona con su masa y masa molar a través de la siguiente expresión [16]:

$$n = \frac{m}{M} \quad (14)$$

En la expresión anterior:

- n = numero de moles de una sustancia
- m = masa de sustancia
- M = masa molar de la sustancia (masa atómica expresada en gramos por mol)

La ecuación de estado para un gas ideal proviene de las siguientes observaciones que se hicieron sobre un gas contenido en un cilindro, cuyo volumen puede variar por medio de un pistón móvil:

- A temperatura constante, la presión del gas es inversamente proporcional al volumen (ley de Boyle).

- A presión constante, el volumen es directamente proporcional a la temperatura (Ley de Charles).
- A volumen constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura (Ley de Gay-Lussac).

Estas observaciones se resumen en la ley del gas ideal o ecuación de estado de gases ideales siguiente [16]:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (15)$$

En la expresión anterior:

- n: número de moles.
- R es la constante universal de los gases $R= 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$
- P: presión a la que se encuentra el gas.
- V: volumen ocupado por el gas.
- T: temperatura del gas.

Si la presión se expresa en atmosferas y el volumen en litros (L), se tiene que el valor de R es $0,08206 \text{ L}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K}$. Al reemplazar este valor de R en la ley de gas ideal, y en condiciones normales (presión atmosférica 1 atm y temperatura de 273K) se tiene que el volumen ocupado por 1 mol de cualquier gas es igual a 22,4 L (litros) [16]

2.4. Hidrogeno obtenido y eficiencia de la celda electrolítica

Para obtener la cantidad de hidrógeno producida por la celda se usa la ley de Faraday, que relaciona la cantidad de sustancia producida por la celda con la carga eléctrica consumida, a través de la siguiente expresión [17]:

$$Q = n \cdot z \cdot F \quad (16)$$

En la expresión anterior:

- z es el numero de electrones de valencia
- n el numero de moles de sustancia producidos
- F es la constante de Faraday (96485 C/mol)

La corriente DC que pasa a través de la celda se puede definir como [18]:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (17)$$

Además se sabe que:

$$n = \frac{m}{M} \quad (18)$$

Reemplazando ambas relaciones en la ley de Faraday y reordenando, se tiene que la cantidad de hidrógeno producido es igual a:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{z \cdot F} \quad (19)$$

Para obtener la eficiencia de la celda, se debe comparar la cantidad de energía almacenada en el hidrógeno producido versus la energía eléctrica consumida por la celda para producirlo. La expresión para obtener esta eficiencia es la siguiente [20]:

$$Eficiencia = \frac{\text{moles de hidrógeno producido} \cdot HHV \text{ de } H_2}{I \cdot V \cdot t} \quad (20)$$

La eficiencia energética se expresa también como el consumo de potencia de la celda electrolítica, que muestra cuanta energía eléctrica es consumida por el electrolizador para producir un metro cubico normalizado (kWh/m³) o un kilogramo de hidrógeno (kWh/kg) [25]. En este trabajo, debido a que el electrolizador es pequeño, la eficiencia se expresa a través del rendimiento, en la cantidad de litros que se producen por un watt hora de energía utilizada (L/Wh). Mientras mayor es la cantidad de litros producidos por unidad de energía, más eficiente es el proceso

2.5. Modelamiento teórico de la electrólisis del agua

La tensión eléctrica de la celda electrolítica puede ser expresada como la suma de la tensión eléctrica reversible (U_{rev}) y las sobretensiones eléctricas definidas por la siguiente expresión:

$$U_{celda} = U_{rev} + U_{ohm} + U_{act} + U_{con} \quad (21)$$

Donde:

- U_{ohm} : pérdidas óhmicas (proporcionales a la corriente que fluye por la celda)
- U_{act} : Para que la carga vaya desde los reactantes a los electrodos o desde los electrodos a los reactantes se necesita energía, la cual es suministrada por la tensión de activación.
- U_{con} : Causado por limitaciones en los procesos de transporte de masa de los reactantes (convección y difusión)

Un modelo más preciso de la tensión de la celda está representado por la expresión (22), que toma en cuenta el área de los electrodos, los coeficientes de sobretensión, la dependencia de la temperatura y la resistencia óhmica del electrolito [21].

$$U_{celda} = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T}{A} \cdot I + (s_1 + s_2 \cdot T + s_3 \cdot T^2) \log \left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} \cdot I + 1 \right) \quad (22)$$

En la expresión anterior:

- r_i : parámetros de la resistencia óhmica del electrolito
- S_i, t_i : parámetros de la sobretensión en los electrodos
- A : área del electrodo
- T : temperatura de la celda electrolizadora

2.6. Almacenamiento del hidrógeno

El almacenamiento del hidrógeno se ha convertido en una de las grandes barreras para que se extienda su uso en el mundo. Su baja densidad es una desventaja, pues 1 kilogramo de este gas utiliza un espacio de 11 [m³].

Son 4 los métodos más utilizados para almacenar el hidrógeno [23]:

- Gas comprimido en cilindros de alta presión.
- Líquido en tanques a baja temperatura (a 20,15K).
- Hidrógeno adsorbido en materiales con una gran área superficial específica.
- Absorbido en espacios intersticiales en un metal anfitrión.

2.6.1. Gas comprimido en cilindros de alta presión

Es la opción preferida para almacenar el hidrógeno, especialmente en el sector automotriz, debido a la rápida capacidad de reabastecer un vehículo en una estación de servicio. El rango de presión al que se comprime el gas es entre 300 N/m² hasta 700 N/m² a temperatura ambiente [22].

La compresión se puede efectuar por 2 medios:

- Compresión adiabática: el proceso ocurre sin intercambio de calor entre el gas y el medio que lo rodea.
- Compresión isotérmica: la temperatura permanece constante durante el proceso, pero debe considerarse el uso de ventilación externa para mantener la temperatura.

2.6.2. Líquido en tanques a baja temperatura (a 20,15 K)

En estado líquido el hidrógeno ocupa 700 veces menos volumen que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita extraer calor, para alcanzar los 20,15 K que necesita el hidrógeno para cambiar de estado. Para lograr esta disminución de temperatura se necesita utilizar alrededor de un 40% de la capacidad energética del hidrógeno almacenado (necesito un 40% de energía extra para efectuar la conversión) [22].

2.6.3. Hidrógeno adsorbido en materiales con una gran área superficial específica.

El mecanismo de adsorción física el hidrógeno se almacena solo en la superficie del material sólido. Es un proceso completamente reversible, lo que significa que el hidrógeno puede ser adsorbido o liberado desde la superficie sin ninguna pérdida en varias oportunidades. Los nanotubos de carbono almacenan el hidrógeno por medio de este proceso y puede operar a temperatura ambiente. Sin embargo aun es necesario un mayor desarrollo de la tecnología [22].

2.6.4. Hidrógeno absorbido mediante hidrocarburos metálicos

Los hidruros metálicos son combinaciones de hidrógeno formando enlaces químicos con ciertos metales o compuestos, que se obtienen enfriando la mezcla metálica e introduciendo el hidrógeno a presión. En este proceso la reacción es reversible. Se calienta el hidruro, se disminuye la presión y el hidrógeno es liberado [22].

2.7. Transporte del hidrógeno

El transporte de hidrógeno se puede efectuar por los mismos sistemas que se utilizan para el gas natural: transporte en camiones cisterna, transporte en barcos y por gasoducto [24].

2.7.1. Transporte en camiones cisterna o estanques

El transporte de bajas cantidades de hidrógeno se efectúa en camiones cisterna con el hidrógeno en estado gaseoso, pero comprimido. Se utiliza para llevar el hidrógeno desde la planta de producción hasta el lugar de consumo.

El transporte de mayores cantidades de hidrógeno por tierra se efectúa en camiones con estanque criogénico. De esta manera el hidrógeno se transporta en estado líquido. Se utiliza para llevar el hidrógeno por tierra desde la planta de producción hasta el lugar de consumo, pero en el lugar de consumo se debe efectuar el proceso que transforma el hidrógeno líquido en gaseoso.

2.7.2. Transporte en barcos

El transporte en barcos se efectúa con el hidrógeno en estado líquido. Es para transportar grandes cantidades de hidrógeno desde un puerto a otro. En el puerto de destino se puede traspasar directamente a un estanque en estado líquido o volver al estado gaseoso.

2.7.3. Transporte por gasoducto

El transporte a través de gasoducto se efectúa cuando es necesario transportar grandes cantidades de gas desde un lugar a otro por tierra y se debe mantener un flujo de abastecimiento constante, pero es inviable enviarlo en camiones con estanque.

3. Metodología

El fin principal de este trabajo es diseñar y construir un electrolizador, para obtener hidrogeno de manera limpia, utilizando como insumos la energía eléctrica y el agua.

Las pruebas están destinadas a optimizar el proceso de obtención de hidrógeno. El electrolizador no debe depender de costosos metales como el platino, que recubre los electrodos de los electrolizadores PEM que se encuentran desarrollados al momento. Al contrario su construcción debe ser fácil y económica.

El electrolizador debe cumplir varias condiciones y se efectuarán diversas pruebas. Debe cumplir con:

- Se debe construir con acrílico transparente, de manera que se pueda observar directamente la producción de hidrógeno y oxígeno.
- Se debe utilizar una membrana separadora de gases efectiva. Se utilizarán:
 - Una membrana de nafion 117, que permite el intercambio de protones, pero no la mezcla de gases.
 - Una tela que se utiliza en serigrafía de poliéster 120t, cuyo tejido es cerrado y también funciona como separador de gases (la apertura de la malla es de 49um).
- Se debe medir y evaluar la eficiencia del proceso en las pruebas que se efectuarán.
- Se deben efectuar pruebas con diferentes electrodos (diferentes materiales y formas geométricas)
- Se deben efectuar pruebas con distintas separaciones entre los electrodos.
- Se deben efectuar pruebas con agua desmineralizada, agua potable y agua con diferentes valores de salinidad.
- Se debe obtener la curva característica tensión eléctrica versus corriente del electrolizador para las diferentes pruebas realizadas.

Las actividades secuenciales y necesarias para la finalización del trabajo se presentan en el siguiente diagrama de bloques:

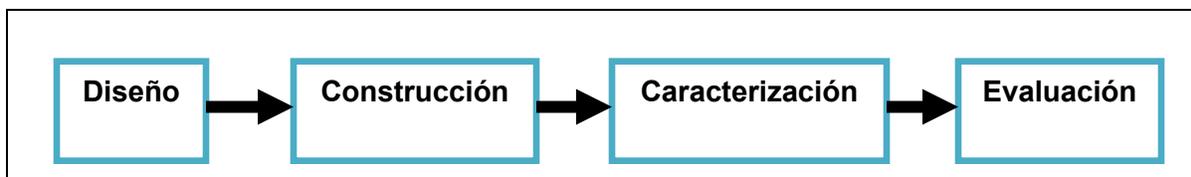


Figura 6. Diagrama de bloques de actividades a realizar

3.1. Diseño plasmado en planos

El diseño debe cumplir las condiciones planteadas al principio de este capítulo, para posteriormente construir el electrolizador. Todo debe quedar plasmado en planos que se incluyen en los anexos de este trabajo.

3.2. Construcción del electrolizador

La construcción del electrolizador se efectúa a partir del diseño realizado en software CAD o equivalente. Se deben respetar los materiales definidos y las medidas incluidas en los planos.

3.3. Caracterización del electrolizador

La caracterización del electrolizador se refiere a las pruebas con diversos electrodos, diferentes distancias entre ellos y diferentes electrolitos

Se deben obtener curvas características voltaje - corriente y eficiencias para los diferentes casos:

- Electrodo de acero inoxidable.
- Electrodo tipo malla.
- Distintas distancias entre electrodos (11mm, 8mm, 5mm y 2mm)
- Distintos electrolitos (agua desmineralizada, agua potable, agua con diferentes salinidades).

Antes de cada experimento se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Se limpiara el recipiente con agua desionizada, para eliminar posibles restos que haya dejado el experimento anterior.
- Se medirá la temperatura del agua. Si es mayor a 298,15K se deberá enfriar hasta llegar esa temperatura. Si es mayor, se calentará el agua con un calefactor.

3.4. Evaluación

Consiste en la comparación de resultados obtenidos en el paso anterior, de manera de poder afirmar en base a ellos como se puede optimizar el proceso de electrolisis.

3.5. Análisis de riesgos

Dentro de los riesgos asociados el trabajo, se debe tener especial cuidado con el depósito o estanque donde se almacena el hidrogeno. Este debe quedar separado de cualquier chispa o fuente de ignición, debido a que el hidrogeno es altamente inflamable.

4. Diseño y construcción del electrolizador

4.1. Diseño del electrolizador

Los componentes básicos de un electrolizador son: los electrodos (ánodo y cátodo), la membrana separadora de gases, el electrolito y la alimentación eléctrica. En base a ellos se deberá elegir los materiales y dimensiones de los elementos mencionados anteriormente.

4.1.1. Limitaciones físicas de elementos del electrolizador

Los elementos que van a definir el diseño y construcción del electrolizador son:

- La fuente de poder que se utilizará es capaz de entregar una tensión máxima de 30 Volts y una corriente máxima de 5 Amperes. La tensión y la corriente son variables por medio de potenciómetros independientes. Se ajustará la corriente en su valor máximo y la tensión aplicada podrá ser cambiada.
- El receptáculo que contiene el electrolito y la celda debe ser capaz de contener agua pura, agua potable y agua salada. Debe ser transparente para observar la producción de oxígeno e hidrogeno.
- Los estanques o receptores del oxigeno e hidrogeno producido por el electrolizador también deben ser transparentes y ser capaces de que ninguno de los gases producidos se escape.
- Se utilizarán electrodos con diversas dimensiones. Sus dimensiones máximas serán de 100 mm de ancho por 100 mm de alto. Las dimensiones mínimas serán 10 mm de alto o 10 mm de ancho.
- Se utilizarán electrodos de diferentes materiales y serán sólidos (placas) o del tipo malla, que son flexibles, por lo que la construcción debe asegurar que la distancia entre los electrodos sea lo más constante posible, sin que el electrodo sufra deformaciones físicas.
- Como se deben cambiar los electrodos, el proceso de intercambio entre diferentes electrodos debe ser lo más simple posible.
- La estructura de la celda debe ser capaz de dar rigidez al elemento que separa los gases. La membrana físicamente es como un pedazo de polietileno transparente de 100 mm x 100 mm y se dobla (no es rígida).
- 2 Multimetros para medición de corriente y tensión en bornes

En cuanto a las limitaciones de materiales para llevar a cabo el trabajo, son las siguientes:

- Se dispone de 2 membranas nafion 117 de 100mm x 100mm para efectuar pruebas.
- Se dispone de 2 electrodos de acero inoxidable 316L de 100mm x 100mm para efectuar pruebas.

4.1.2. Diseño de la celda.

Se efectuaron varios diseños y construcción de celdas. En total son 3 los modelos que se diseñaron, se construyeron y se probaron. Las 2 primeras celdas que se desecharon correspondían a celdas del tipo seca o cerrada. Se desecharon la primera porque no permitía observar los fenómenos (era opaca construida con fitting plomo, tenía pernos y empaquetaduras) y la segunda (Figura 7), pese a que era transparente totalmente, se desechó porque el cambio de electrodos era difícil y lento (tenía 12 pernos con 24 tuercas que había que soltar completamente y además las empaquetaduras, con la presión quedaban pegadas herméticamente unas a otras haciendo difícil separarlas)



Figura 7. Una de las celdas diseñada y construida, pero desechada debido a que el cambio de electrodos era demasiado lento.

Producto de aquellos errores se llegó a la determinación que lo importante en este trabajo es construir una celda experimental que permita cambiar rápidamente los electrodos. En efecto se necesitaba una celda simple cuyos materiales y dimensiones son las siguientes:

- La membrana de 100 mm de alto por 100 mm de ancho por 183um de espesor, define el punto de partida de todos los materiales a utilizar. Este es el tamaño mínimo que se vende en el mercado de las membranas de intercambio protónico NAFION 117. El otro separador de gases consistente en una malla también será dimensionado de 100mm de alto por 100mm de ancho.
- Estructura o marco capaz de soportar el separador de gases. Este marco será de 100mm x 130mm de superficie, con una apertura central cuadrada de 80mm x 80mm, que estará ubicada a 10mm de la parte inferior. El material elegido es el policarbonato transparente de 1 mm de espesor.

- La membrana separadora de gases se encuentra entre 2 de estos marcos, pegada con un pegamento del tipo silicona líquida.
- Los estanques se encuentran integrados en la parte superior del marco, de manera que recolectan inmediatamente los gases producidos. Cada estanque puede contener un volumen máximo de 30mm de alto x 30mm de fondo x 90mm de largo.
- El recipiente que contendrá el electrolizador será transparente, por lo que se puede utilizar vidrio o acrílico. Esto permite que se contenga en su interior al electrolito líquido y observar la producción de oxígeno e hidrógeno. Se utilizará acrílico de 6mm de espesor, debido a que es liviano para su transporte y más resistente que el vidrio frente a golpes.
- El recipiente debe contener en su interior la celda con los estanques, por lo que sus medidas serán de 180mm de alto, 150mm de ancho y 90mm de fondo.
- Los electrodos a utilizar serán:
 - Acero inoxidable 316L de 100mm por 100mm por 1,5mm de espesor.
 - Acero inoxidable 316L de 25mm por 80mm por 1,5mm de espesor.
 - Malla de acero inoxidable del tipo usado en coladores de 100mm por 100mm por 0,1mm de espesor. Apertura de malla 1,15mm.
 - Malla de acero inoxidable 316L, tipo tela de 10mm de alto por 8mm de largo y 36µm de espesor. Apertura de la malla 54µm.
 - Nickel de 25mm por 80mm de largo

Para fijar los electrodos al marco se utilizarán gomas de 1,5mm de espesor, con cinta doble contacto.

4.1.3. Construcción de la celda

Los pasos para la construcción de la celda son los siguientes:

- La construcción del marco que contendrá el separador de gases comienza con el corte del policarbonato de 1mm de espesor. Este viene en laminas tamaño oficio y se cortan con tijeras. Se cortan las 2 piezas de 100mm x 130mm que servirán de marco y se realiza la perforación de la apertura central de 80mm x 80mm con la ayuda de un dremel.
- Se aplica silicona líquida en una de las superficies del marco, para pegar la membrana o tela separadora de gases. Luego se le aplica la misma silicona al otro marco y se presiona contra la cara libre de la membrana y tela. Se aplica presión sobre las superficies y se deja secar durante 24hrs.
- Se cortan las piezas de los estanques y se pegan por medio de la silicona líquida al marco que contiene el separador de gases.
- Para construir el contenedor de acrílico se deben cortar las piezas de acrílico con ayuda de un cuchillo gancho para corte de acrílico (Figura 8).



Figura 8. Cuchillo gancho para corte de acrílico

- Una vez que se dimensionan y cortan las piezas, se procede a pegarlas con la misma silicona líquida utilizada en los pasos anteriores.
- Los electrodos se cortan y dimensionan mediante un esmeril eléctrico equipado con un disco de corte para acero inoxidable.
- Los electrodos del tipo malla se cortan con tijeras.
- Los separadores de goma de 1,5mm de espesor se cortan con tijeras en medidas de 0,5mm x 20mm. Sobre ellos se coloca una capa de cinta doble contacto, para que se adhieran al marco o a los electrodos.

A continuación en la figura 9 (lado izquierdo) se puede apreciar una celda construida con los estanques, pero sin los electrodos instalados y al lado derecho, con los electrodos y conectores instalados.

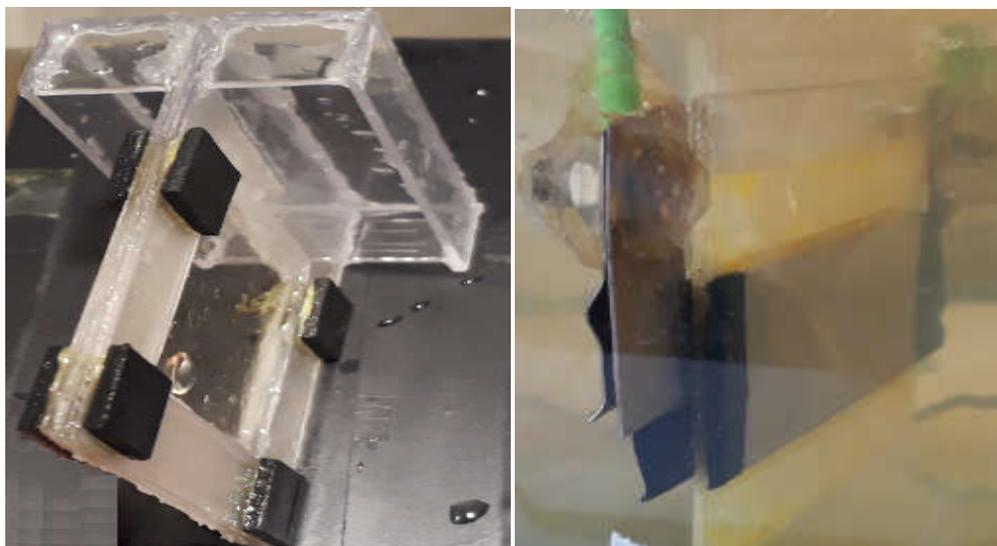


Figura 9. Celda con sus estanques pero sin los electrodos (izquierda) y celda con electrodos sumergida en agua (derecha)

En los anexos se adjuntan los planos de la celda y del contenedor de acrílico, junto con la secuencia de armado.

5. Caracterización y evaluación del electrolizador

5.1. Caracterización del electrolizador

Se efectúan diversas pruebas a la celda electrolizadora, para conocer su comportamiento en diferentes condiciones. Principalmente se busca obtener curvas características corriente-voltaje y de eficiencia de producción de hidrógeno. Las pruebas realizadas, con separador de gases tela serigrafía 120t, son las siguientes:

Caso 1. Corriente en función del voltaje. Agua desionizada, electrodos acero inoxidable 316L de 25mm x 80mm lijados.

Caso 2. Corriente en función del voltaje. Agua desionizada, electrodos de níquel de 25mm x 80mm.

Caso 3. Corriente en función del voltaje. Agua desionizada, electrodos malla acero 325 de 15mm x 80mm.

Caso 4. Corriente en función del voltaje. Agua desionizada, electrodos acero inoxidable 316L de 14mm x 80mm.

Caso 5. Corriente en función del voltaje. Agua desionizada, electrodos titanio recubierto de platino de 25mm x 80mm.

Caso 6. Corriente en función del voltaje. Agua desionizada, electrodos acero inoxidable, malla de colador de 100mm x 100mm.

Caso 7. Corriente en función del voltaje. Agua potable, electrodos acero inoxidable 316L de 25mm x 80mm lijados.

Caso 8. Corriente en función del voltaje. Agua salada, electrodos acero inoxidable 316L de 25mm x 80mm separados 11mm.

Caso 9. Corriente en función del voltaje. Agua salada, electrodos acero inoxidable 316L de 25mm x 80mm separados 5mm.

Caso 10. Corriente en función del voltaje. Agua salada, electrodos acero inoxidable 316L de 25mm x 80mm separados 2mm.

Caso 11. Eficiencia en función de la conductividad para electrodos horizontal y vertical.

Caso 12. Eficiencia en función del voltaje. Agua salada 35 gramos/litro, 14 gramos/litro, 7 gramos/litro, 1 gramos/litro, separación electrodos 11mm.

Caso 13. Eficiencia en función del voltaje. Agua salada 35 gramos/litro, 14 gramos/litro, 7 gramos/litro, 1 gramos/litro, separación electrodos 8mm.

Caso 14. Eficiencia en función del voltaje. Agua salada 35 gramos/litro, 14 gramos/litro, 7 gramos/litro, 1 gramos/litro, separación electrodos 5mm.

Caso 15. Eficiencia en función del voltaje. Agua salada 35 gramos/litro, 14 gramos/litro, 7 gramos/litro, 1 gramos/litro, separación electrodos 2mm.

Caso 16. Eficiencia en función del voltaje. Agua potable.

Caso 17. Eficiencia para diferentes superficies de electrodos.

Caso 18. Eficiencia para otros electrodos de diferentes materiales, separados 5mm.

Caso 19. Voltaje experimental y teórico en función de la corriente. 35 gramos de sal en 1litro de agua, separación electrodos 2mm.

5.1.1. Obtención de curvas Corriente-voltaje (agua desionizada)

Consiste en obtener curvas de corriente en función del voltaje, para celdas en agua desionizada, con electrodos de acero a diferentes separaciones de electrodos (2mm, 5mm, 8mm y 11mm): Este es el caso base, pues el agua desionizada es casi pura, con una conductividad menor a $0,7\mu\text{S}/\text{cm}$. El agua potable tiene minerales que hacen que su conductividad sea mayor que la del agua pura.

La primera experiencia es con electrodos de acero inoxidable 316L de 25mm x 80mm lijados.

Se obtienen medidas de corriente, variando la tensión y anotando la corriente presente. Solo en este primer caso se hicieron mediciones hasta los 15Volts, para mostrar el comportamiento del electrolizador en tensiones altas. El resto de las experiencias se efectúan hasta los 5 Volts.

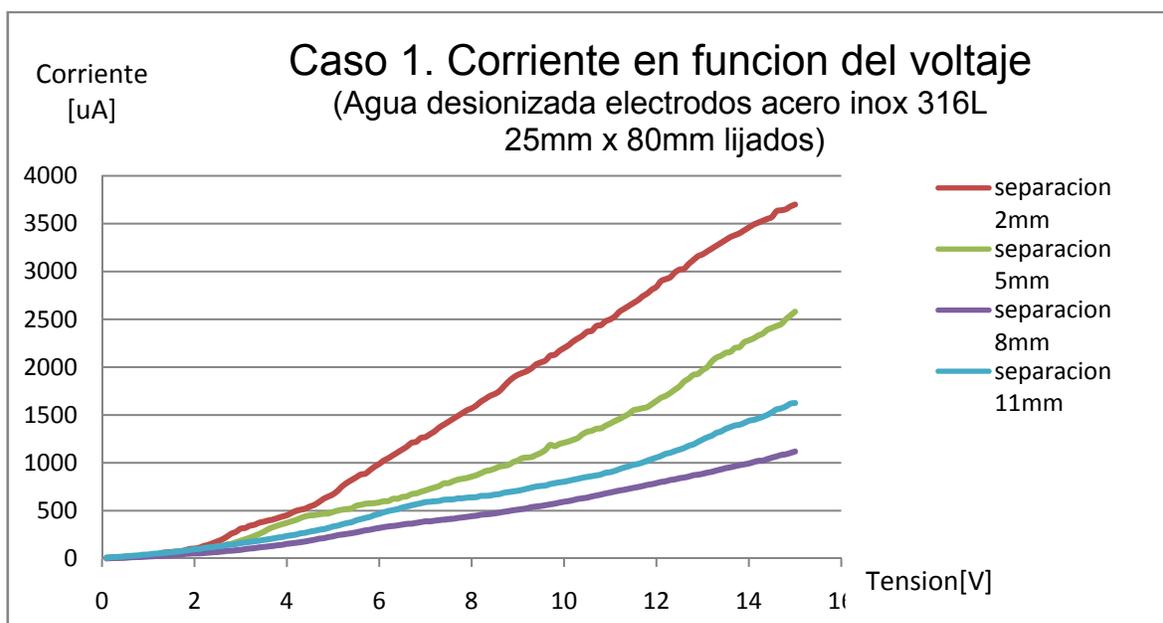


Figura 10. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodos acero inoxidable de 25mm x 80mm.

Se aprecia en la figura 10 (Caso1), que a medida que disminuye la separación de los electrodos, aumenta la corriente para un mismo voltaje. Lo mismo ocurre con las siguientes experiencias:

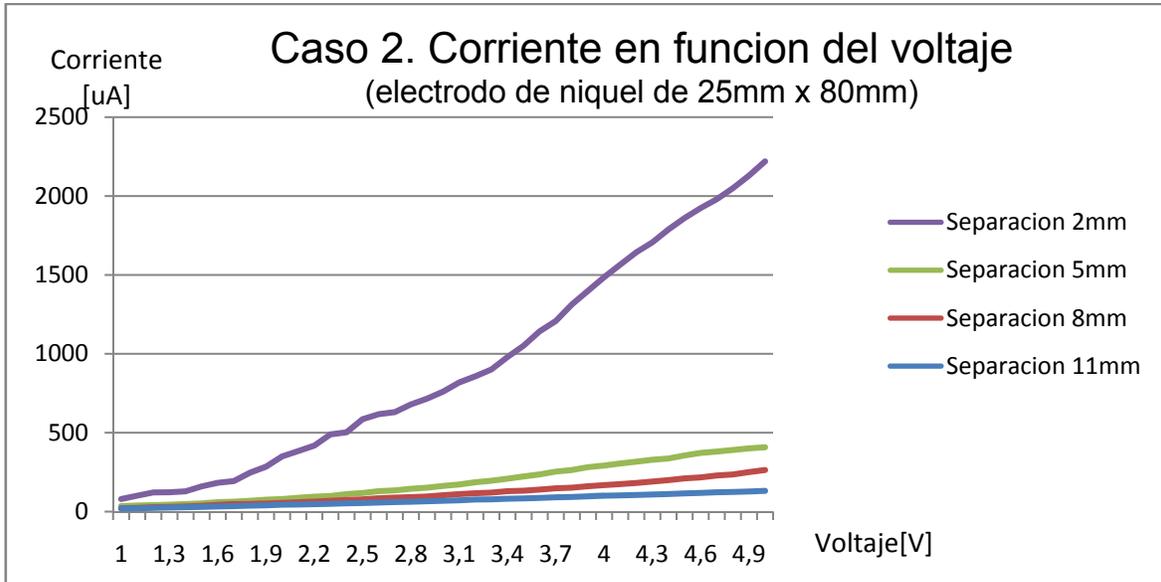


Figura 11. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodos niquel de 25mm x 80mm.

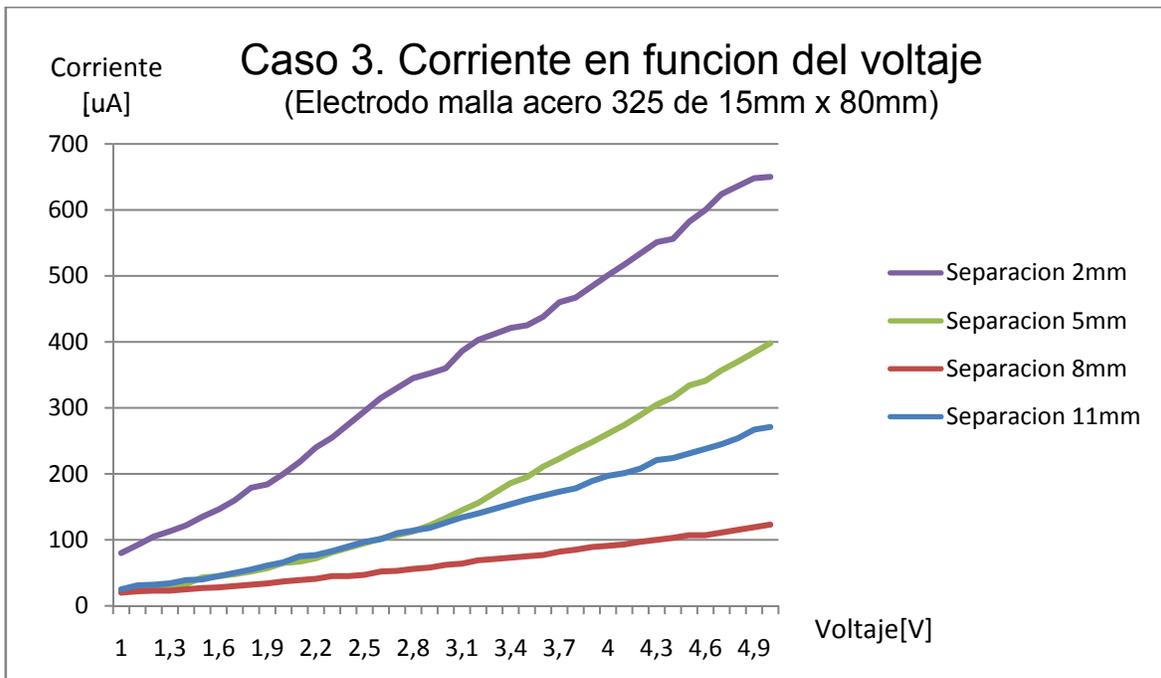


Figura 12. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodos malla de acero 325 de 15mm x 80mm.

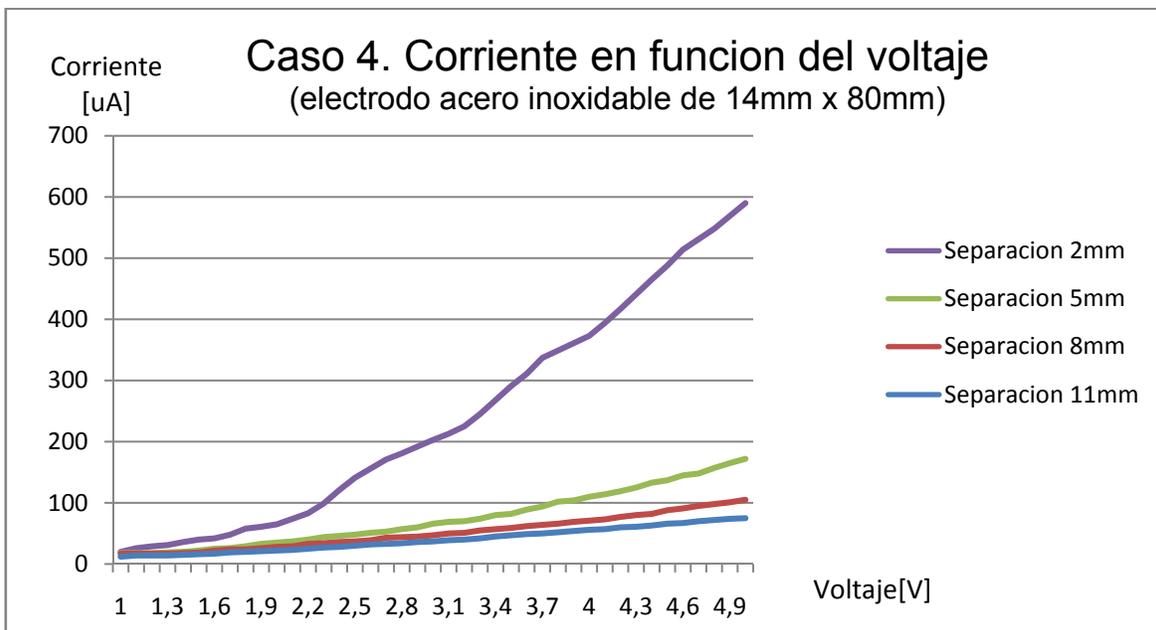


Figura 13. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodos acero inoxidable de 14mm x 80mm.

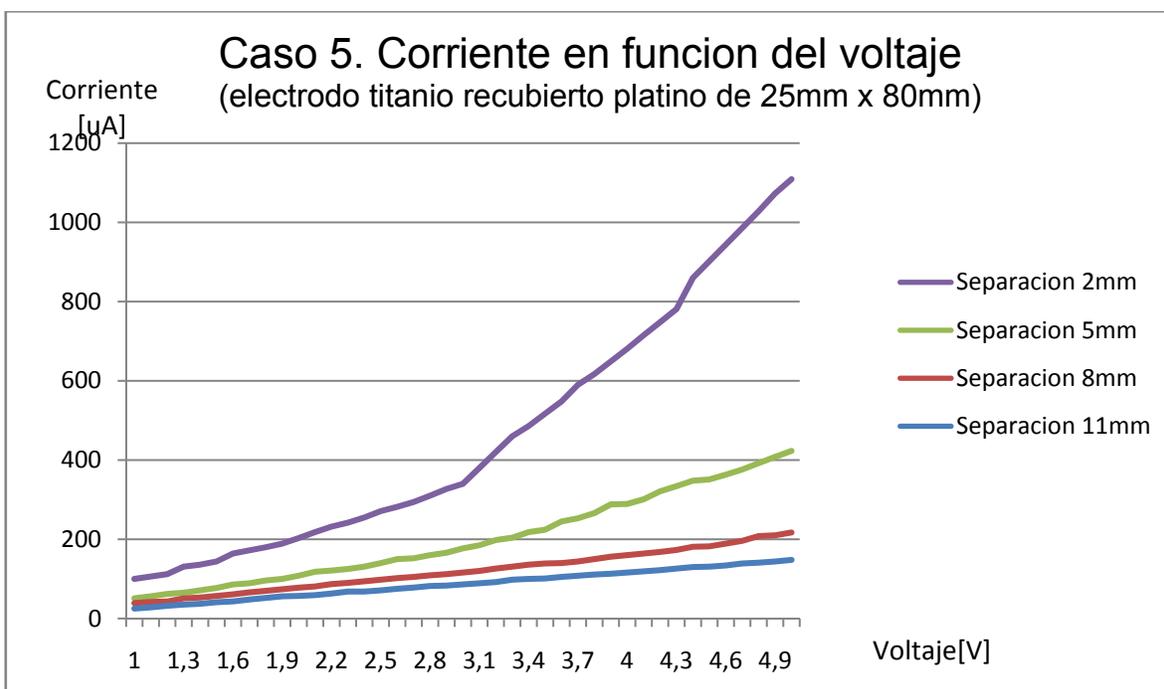


Figura 14. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodos titanio recubierto platino de 25mm x 80mm.

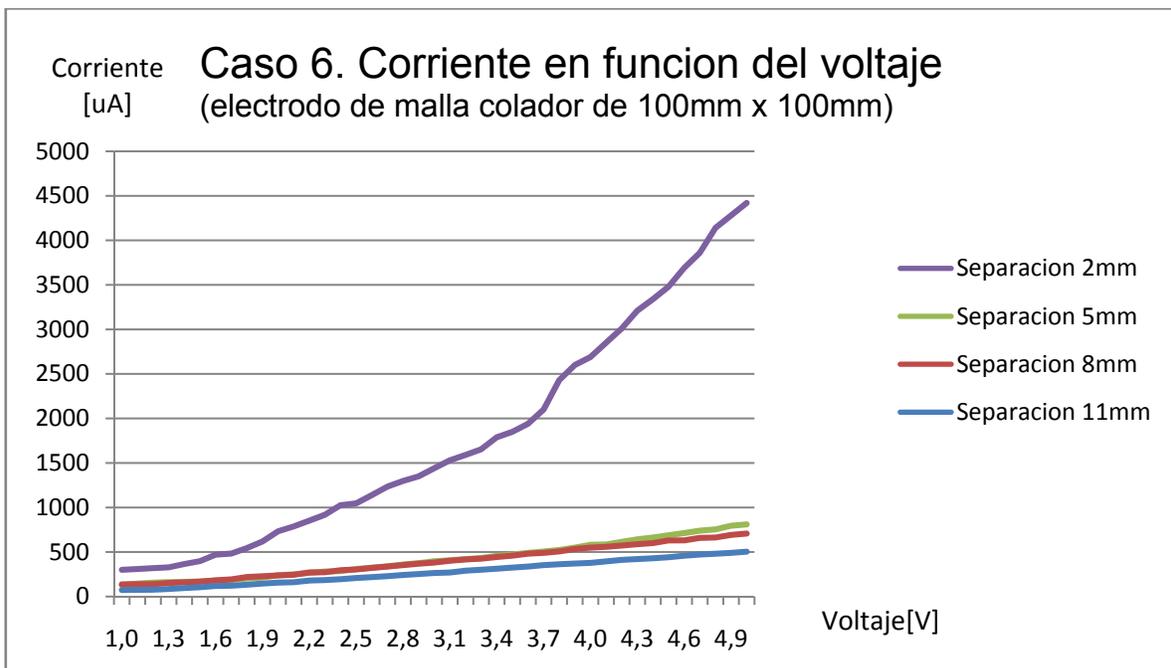


Figura 15. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodo malla colador de 100mm x 100mm.

5.1.2. Obtención de curvas Corriente-voltaje (agua potable)

Consiste en obtener curvas de corriente en función del voltaje, para la celda con agua potable como electrolito, para las 4 separaciones entre electrodos.

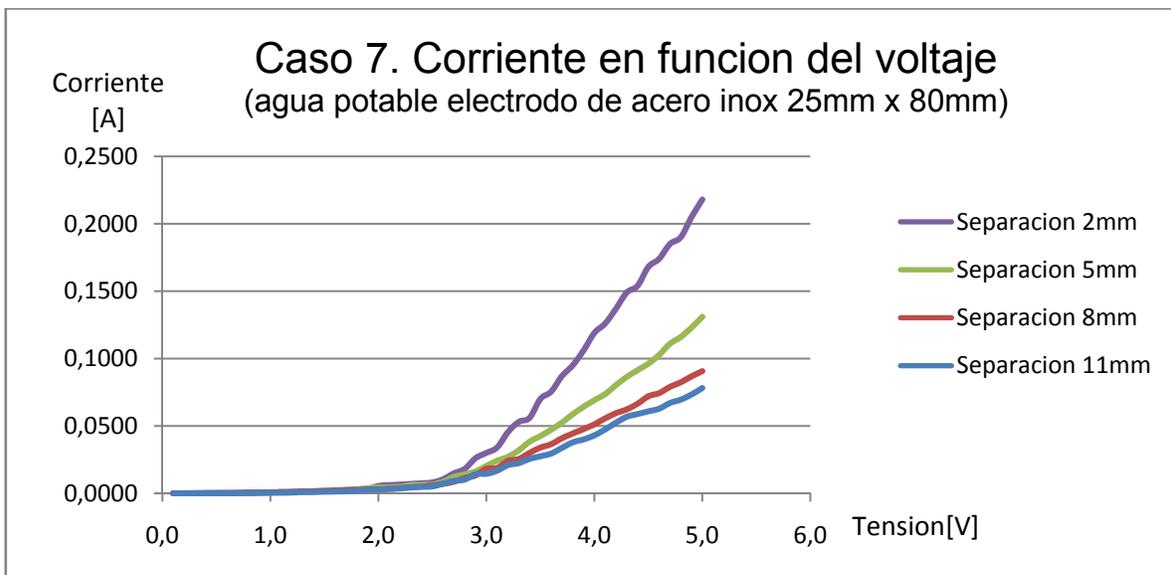


Figura 16. Corriente en función del voltaje (agua potable) electrodo acero inoxidable de 25mm x 80mm.

Se observa después de los experimentos con agua potable que sobre el electrodo negativo o cátodo, se forma una capa o película de las sales que contiene esta agua (igual que el sarro que se forma en los hervidores). Se limpia esa capa después de cada experimento.

5.1.3. Obtención de curvas Corriente-voltaje (agua salada)

Consiste en obtener curvas de corriente en función del voltaje, para la celda con agua salada como electrolito. Se utilizarán salinidades de 1 gramo por litro, 7 gramos por litro, 14 gramos por litro y 35 gramos por litro que es la correspondiente al agua de mar. Esto se realizó en separaciones entre electrodos de 11mm, 5mm y 2mm.

En todas las mediciones se utilizan los electrodos de acero inoxidable 316L de 25mm de alto por 80mm de ancho.

La forma de preparar el agua salada es: se toma 1 litro de agua desionizada, se le aplica la cantidad (en gramos) de sal requerida y se disuelve por medio de agitación.

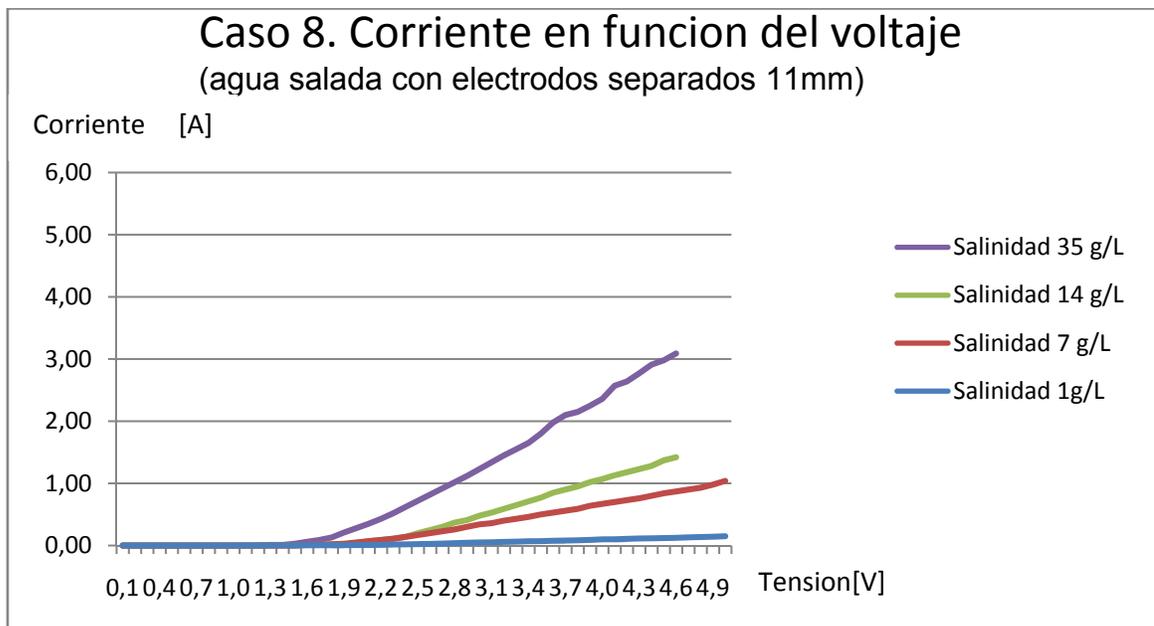


Figura 17. Corriente en función del voltaje (agua salada) electrodo acero inoxidable de 25mm x 80mm separados 11mm.

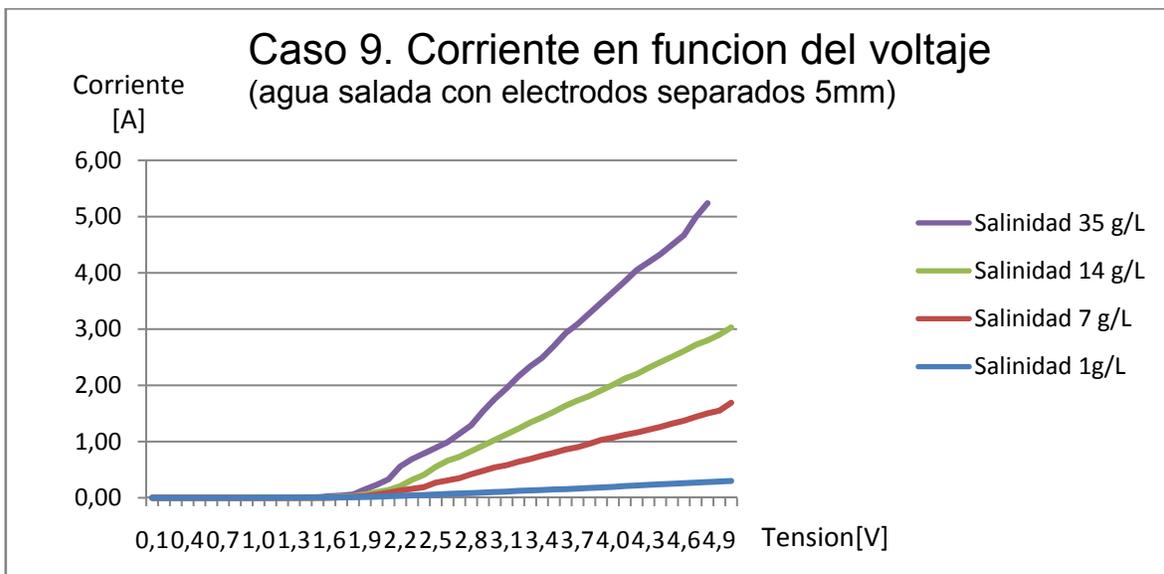


Figura 18. Corriente en función del voltaje (agua salada) electrodo acero inoxidable de 25mm x 80mm separados 5mm.

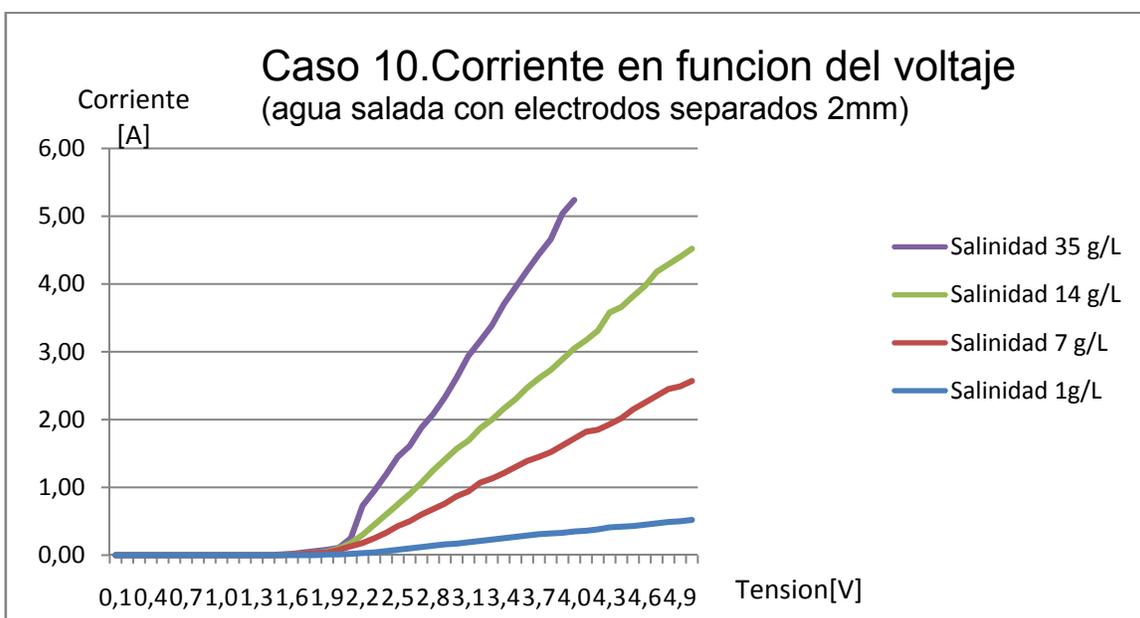


Figura 19. Corriente en función del voltaje (agua salada) electrodo acero inoxidable de 25mm x 80mm separados 2mm.

En todos los casos anteriores se puede observar que a medida que disminuye la separación de los electrodos, aumenta la corriente para un mismo voltaje.

Los niveles de corriente en el caso de agua desionizada están en el rango de los μA , para el caso del agua potable en los mA y para el caso del agua salada en el rango de los Amperes.

En el caso de las experiencias con agua salada. Se aprecia que a menor distancia entre electrodos, aumenta la pendiente de la curva en la región donde existe conducción eléctrica (voltaje mayor a 1,5V).

5.1.4. Obtención de eficiencia de producción de hidrógeno

Una forma simple de comparar el rendimiento entre las celdas es la eficiencia definida a través de la siguiente pregunta: ¿cuántos litros de hidrógeno es capaz de producir la celda en un determinado tiempo y cuanta energía eléctrica utiliza para producir esos litros?

Otra pregunta interesante es ¿el proceso de obtención de hidrogeno es más eficiente con los electrodos en posición horizontal o vertical?

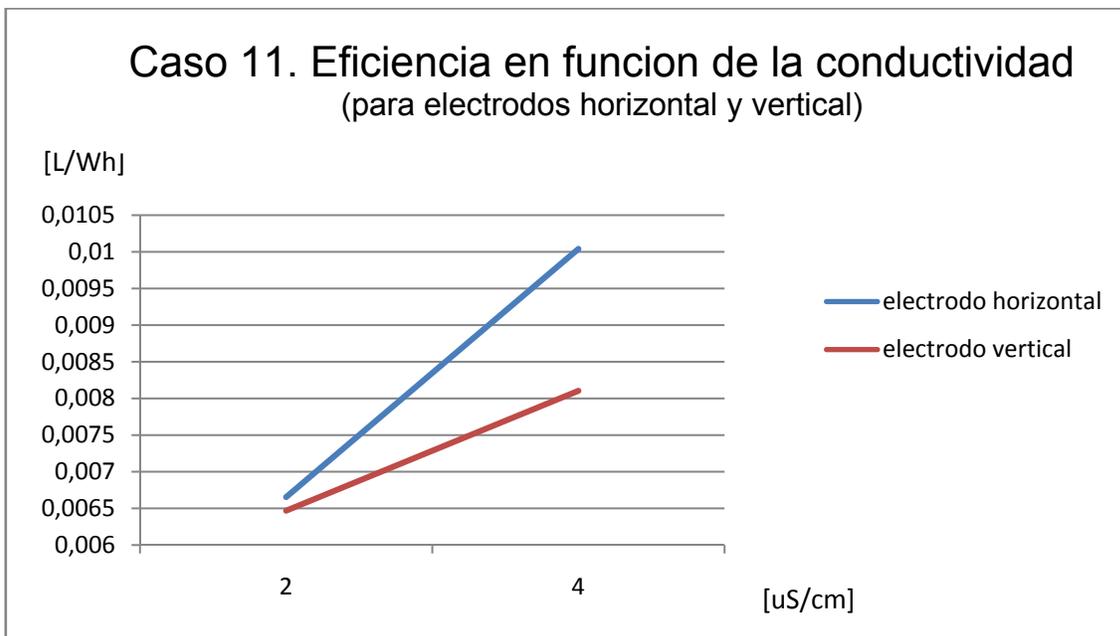


Figura 20. Eficiencia para electrodo horizontal y vertical. Agua con diferentes conductividades y electrodo acero inoxidable de 15mm x 80mm separados 8mm.

A continuación se presentan las eficiencias para agua potable y agua con diferentes niveles de salinidad.

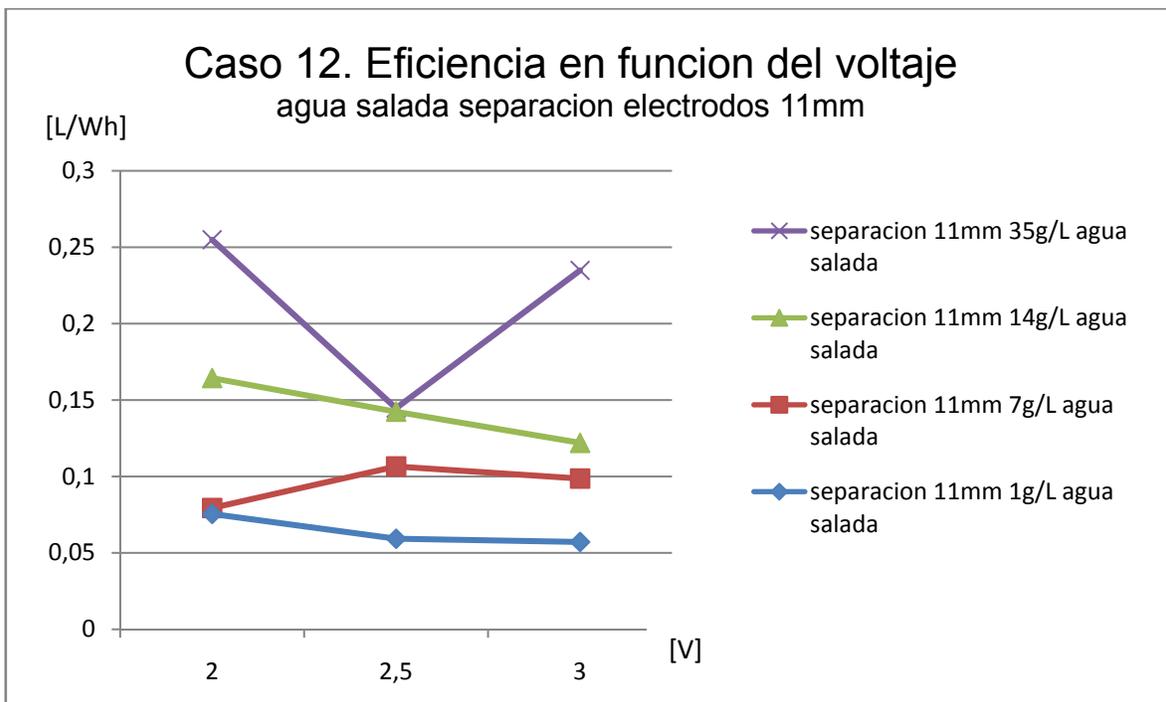


Figura 21. Eficiencia para agua salada con diferentes salinidades. Electrodo acero inoxidable de 15mm x 80mm separados 11mm.

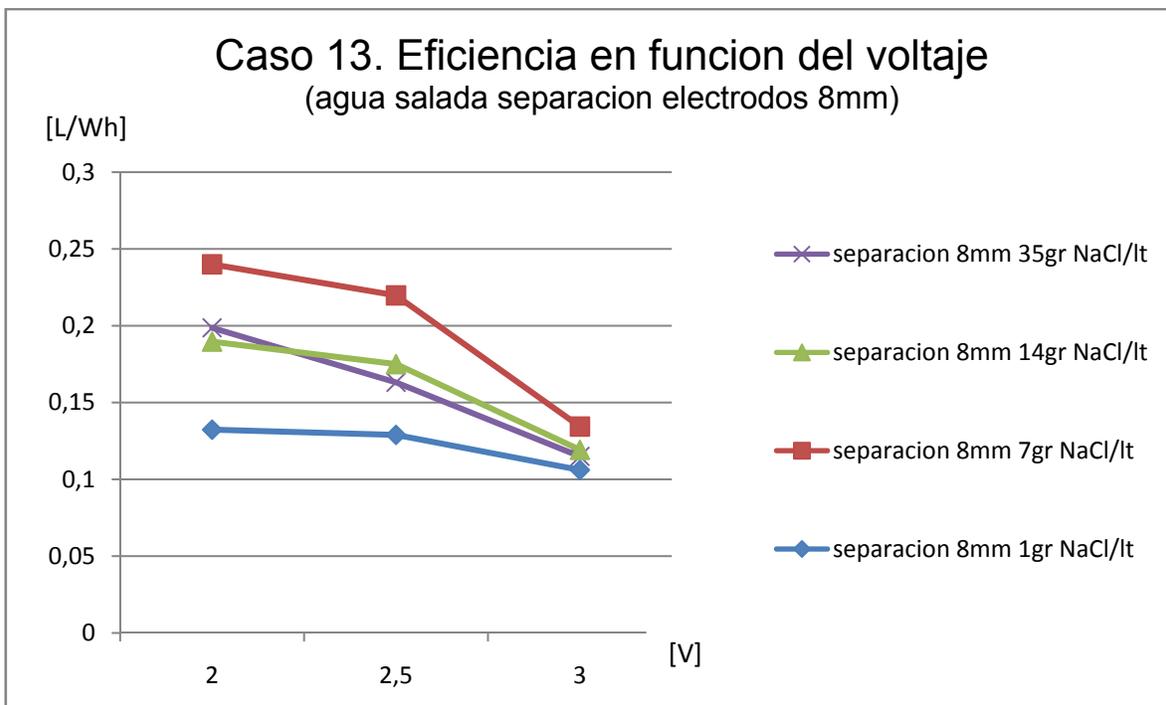


Figura 22. Eficiencia para agua salada con diferentes salinidades. Electrodo acero inoxidable de 15mm x 80mm separados 8mm.

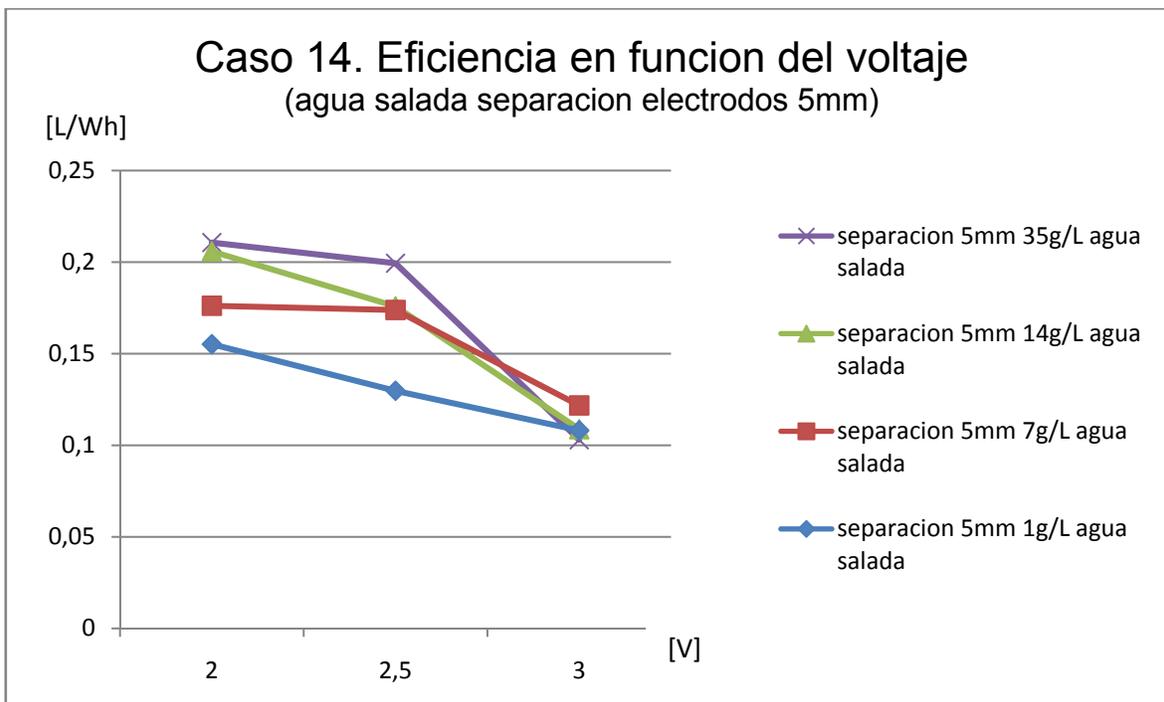


Figura 23. Eficiencia para agua salada con diferentes salinidades. Electrodo acero inoxidable de 15mm x 80mm separados 5mm.

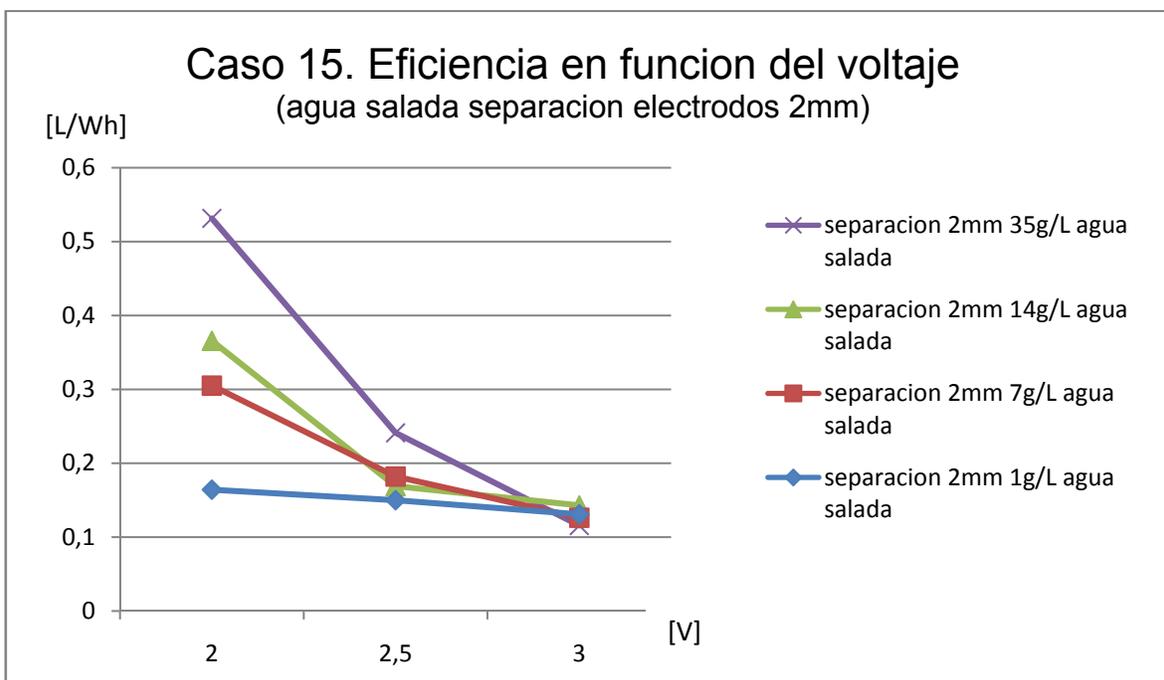


Figura 24. Eficiencia para agua salada con diferentes salinidades. Electrodo acero inoxidable de 15mm x 80mm separados 5mm.

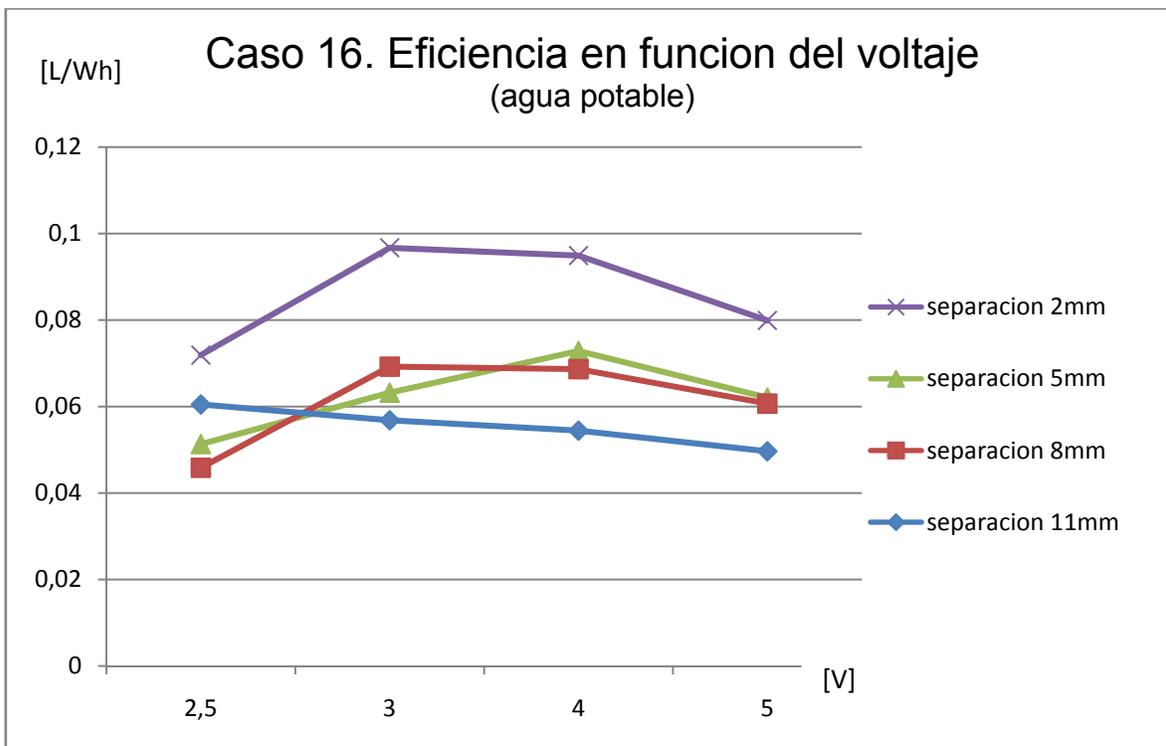


Figura 25. Eficiencia en función del voltaje para agua potable. Electrodo acero inoxidable de 15mm x 80mm

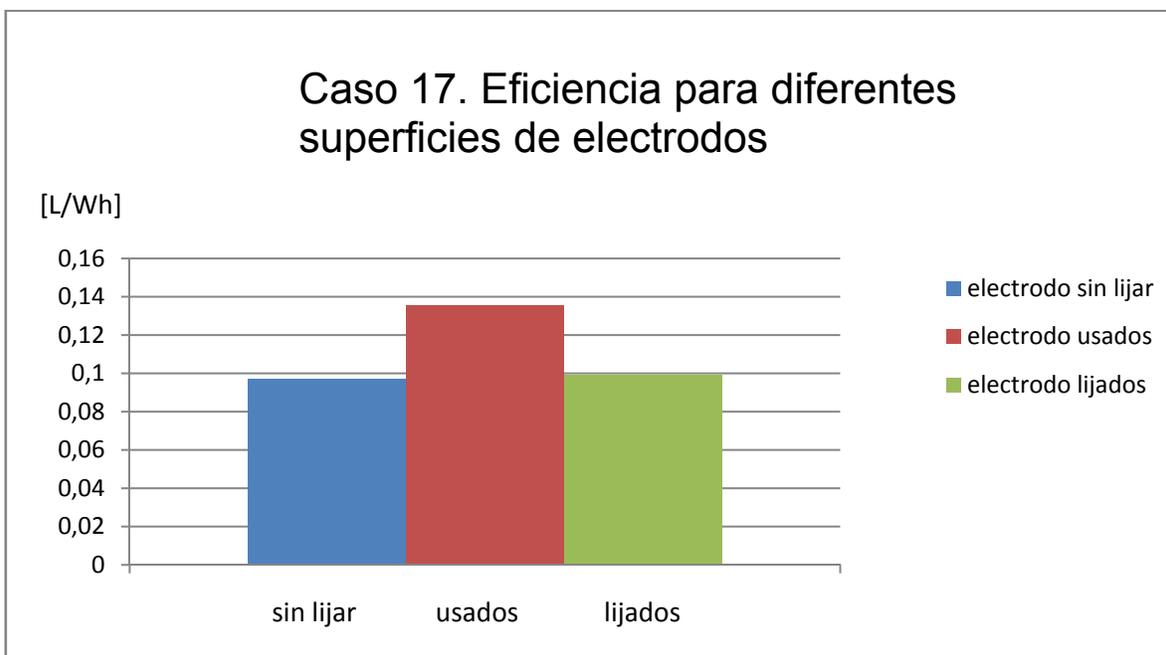


Figura 26. Eficiencia para diferentes superficies de electrodos (sin lijar, usados y lijados).

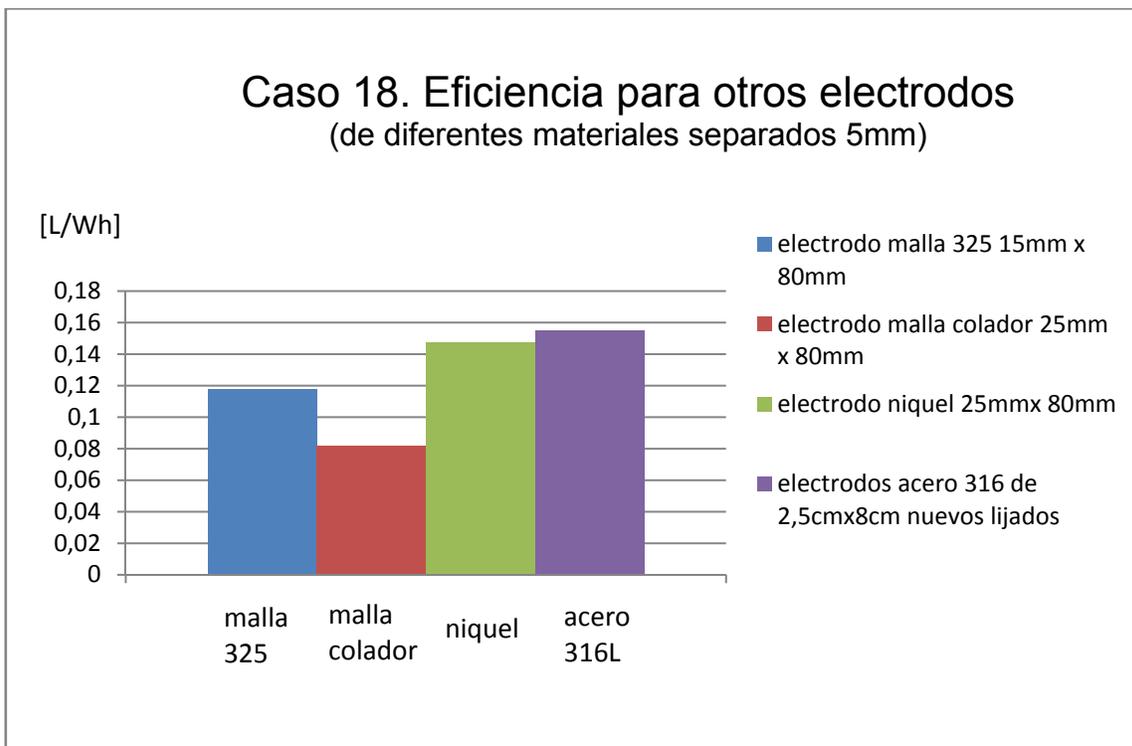


Figura 27. Eficiencia para otros electrodos (malla 325, malla colador y electrodo niquel) con salinidad 1gramo sal en 1 litro de agua. Separación electrodos 5mm.

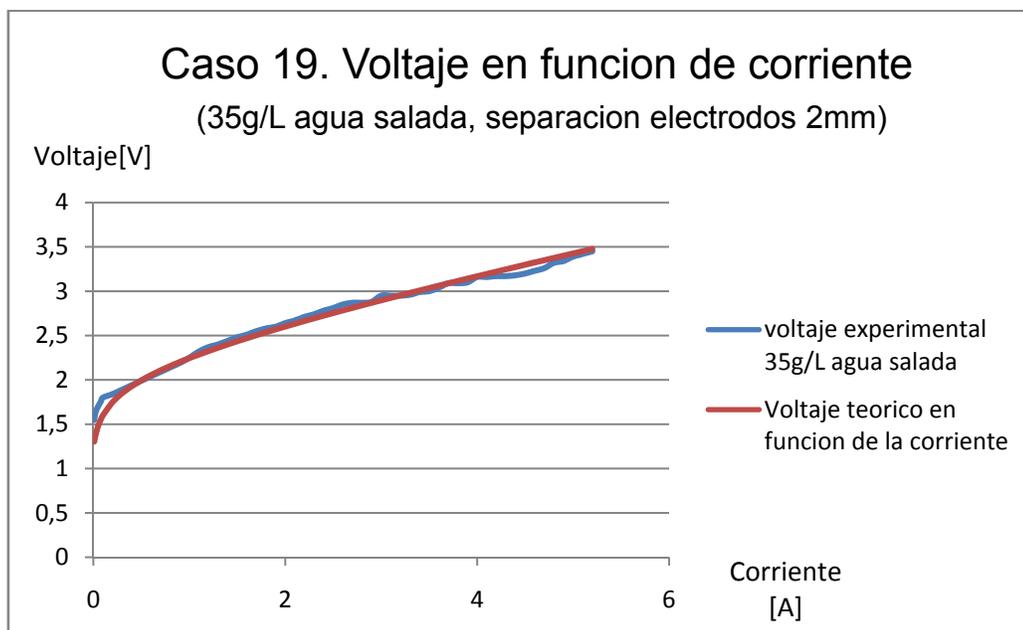


Figura 28. Voltaje en función de la corriente experimental y teórico. Salinidad de 35 gramos de sal en 1litro de agua, separación electrodos 2mm.

Se efectúan pruebas con la membrana nafion, se obtiene una eficiencia de 0,06835 litros/Wh, para una separación de 2mm entre electrodos y con agua desionizada. Sin embargo tiene una gran desventaja, que con el oxido que desprende del cátodo se empieza a contaminar la membrana y termina por quemarse (figura 29). Es por eso que se utilizan metales nobles en los electrodos, para evitar que esto ocurra.



Figura 29. Membrana nafion contaminada con oxido.

5.2. Evaluación del electrolizador

5.2.1. Curvas con agua desionizada

En las figuras 10 a figura 15 (caso 1 al 6) se aprecia que a medida que disminuye la separación de los electrodos, aumenta la corriente para un mismo voltaje. Con los máximos valores de corriente para la separación de 2mm

Los niveles de corriente en el caso de agua desionizada están en el rango de los μA , para el caso del agua potable en el rango de los mA y para el caso del agua salada en el rango de los Amperes.

5.2.2. Curvas con agua potable

En la figura 16 (caso 7) se aprecia que a medida que disminuye la separación de los electrodos, aumenta la corriente para un mismo voltaje. Con los máximos valores de corriente para la separación de 2mm

La mayor eficiencia para agua potable, para todo nivel de voltaje, ocurre cuando la distancia entre los electrodos es mínima (2mm)

5.2.3. Curvas con agua salada

En el caso de las experiencias con agua salada, caso 8 a caso 10 (figura 17 a 19):

Para una distancia entre electrodos fija, a mayor salinidad, aumenta la corriente para un mismo voltaje.

Se aprecia que a menor distancia entre electrodos, aumenta la pendiente de la curva en la región donde existe conducción eléctrica (voltaje mayor a 1,4 o 1,5V). Esto es consecuente con los niveles de conductividad medidos:

- 1 gramos de sal por litro tiene una conductividad de 1440 uS/cm.
- 7 gramos de sal por litro tiene una conductividad de 7900 uS/cm.
- 14 gramos de sal por litro tiene una conductividad de 14500 uS/cm.
- 35 gramos de sal por litro tiene una conductividad de 34400 uS/cm.

Una de las cosas que se quería comprobar en este trabajo, es si había diferencia en la eficiencia entre la posición vertical u horizontal de los electrodos. En este caso, en el caso 11 (figura 20) se puede observar que efectivamente hay una diferencia, la posición horizontal de los electrodos rectangulares es ligeramente más eficiente que los electrodos en posición vertical. Esto se puede explicar porque al soltarse una burbuja, al estar en posición vertical se puede topar con un mayor número de burbujas que aun no se suelte y se quede atascado en ella. Las burbujas por lo tanto suelen crecer y se demoran un poco más en soltarse.

De las eficiencias de agua salada, caso 12 al 15 (figuras 21 a la 24), se puede observar que a menor voltaje (2Volts) hay una mayor eficiencia para casi todas las separaciones de electrodos y para todas las salinidades (el caso de separación 11mm y salinidad de 7 gramos por litro fue la excepción)

A mayor salinidad, hay una tendencia que la eficiencia es mayor (el caso de electrodos separados a 8mm fue la excepción)

En agua desionizada, para voltaje igual a 5V se obtuvo una eficiencia de 0,06835 Litros/Wh con separación entre electrodos de 2mm. El problema es que la membrana al ser flexible se pega a los electrodos y no deja que la distancia entre electrodos y membrana sea equidistante. Se necesita un flujo de agua que remueva las burbujas y disminuir aun más la distancia entre electrodos, pero para este electrolizador no funciona bien.

De los experimentos con agua salada en el ánodo no se produjo oxígeno, sino que cloro. Del ánodo se ve descender una sustancia amarillo verdosa, que se deposita en el fondo (figura 30).

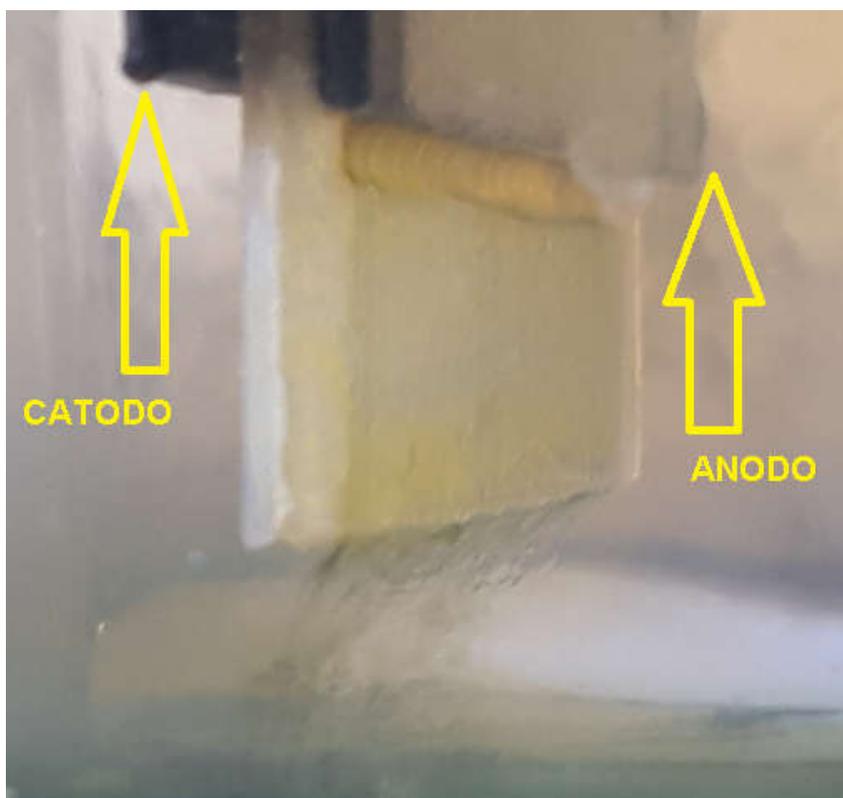


Figura 30. Cloro producido en el ánodo.

A mayor concentración de sal, el agua se vuelve aun más café, producto de la oxidación del ánodo. Esto indica que la vida útil del ánodo puede disminuir si se opera en estos puntos (pese a que la eficiencia de producción de hidrogeno es mayor). A mayor tensión pasa lo mismo, el agua se vuelve más café que a menores tensiones. El agua tendría que pasar por algún proceso de filtrado para seguir ocupándola.

Con respecto a la eficiencia para diferentes superficies de electrodos. Después de varios días de uso, el electrodo más afectado por la corrosión es el ánodo. Su superficie muestra signos de corrosión en forma de pequeños cráteres, como se puede apreciar en la parte superior del electrodo en figura 31 (la parte inferior permaneció tapada con cinta durante los experimentos, para que se aprecie la diferencia). Se podría pensar que eso afecta negativamente al proceso, pero en la figura 26 (caso 17) se ve que al contrario, el electrodo usado es el que tiene mayor eficiencia, sobre el electrodo nuevo, ya se lijado o no lijado.

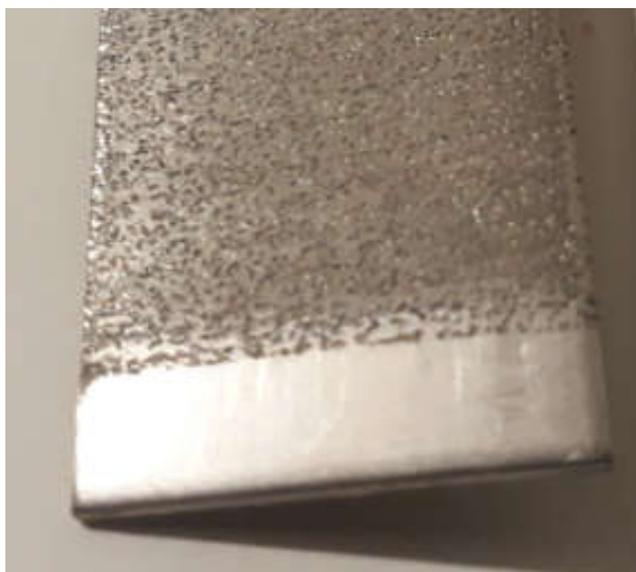


Figura 31. Cráteres formados por corrosión en ánodos del electrolizador

Esto se explica debido a que los cráteres aumentan la superficie disponible del ánodo para que ocurra la reacción de evolución de oxígeno. Al existir mayor producción de oxígeno, significa que quedan libres más protones H^+ , que son luego impulsados por el campo eléctrico hacia el cátodo para formar hidrógeno.

Con respecto a si conviene lijar o no el electrodo. No conviene, debido a que el aumento del rendimiento es mínimo (caso 17, figura 26).

En cuanto a la eficiencia de diferentes materiales de electrodos. El que ofrece el mejor rendimiento es el electrodo de acero inoxidable 316L (caso 18, figura 27).

Se efectúa un experimento de voltaje en función de corriente y además se grafica esta curva en conjunto con la curva teórica que se obtiene de acuerdo a la ecuación 22. La curva teórica es semejante a la curva obtenida en la experiencia práctica (caso 19, figura 28).

6. Conclusiones

El resumen de los resultados obtenidos es el siguiente:

- Se logra diseñar y construir un electrolizador experimental para la producción de hidrógeno electrolítico, con el cual se efectúan pruebas para obtener la eficiencia de diferentes electrodos fabricados con distintos materiales.
- Se logra obtener hidrógeno con agua pura, agua potable y agua salada con diversos grados de salinidad.
- Es ligeramente más eficiente un electrodo en posición horizontal que en posición vertical.
- El electrodo más eficiente para la obtención de hidrógeno (de los ocupados en este trabajo) es el acero inoxidable 316L.
- En la celda, a medida que disminuye la separación entre electrodos, aumenta la corriente para un voltaje fijo. Esto ocurre para agua potable y agua salada.
- En agua salada a menor distancia entre electrodos, también aumenta la pendiente de la curva en la región donde existe conducción eléctrica.
- No es tan conveniente lijar los electrodos antes de los experimentos, debido a que el aumento del rendimiento es mínimo.
- A menor voltaje, hay una mayor eficiencia para casi todas las separaciones de electrodos.
- En agua salada, a mayor salinidad hay mayor eficiencia. Pero también el agua se contamina más rápido con oxido.
- Un electrodo usado tiene mayor eficiencia que uno nuevo debido a que los cráteres aumentan la superficie disponible del cátodo para que ocurra la reacción de evolución de oxígeno. Al haber mayor producción de oxígeno, significa que quedaron libres más protones H^+ que son los que viajan hacia el ánodo para formar hidrógeno.
- La membrana de nafion es muy delicada para trabajar con ella. Solo se puede utilizar con agua destilada y aun así también se deben tomar precauciones para utilizarla. Para el caso de agua potable y agua salada no sirve. En cambio si aplica, como separador de gases, para estos 2 últimos casos la tela de serigrafía 120t.

Finalmente se puede decir que con agua pura es muy difícil obtener hidrógeno, debido a que tiene una conductividad cercana a cero. Al aplicar tensión, incluso hasta 15V, solo se obtiene oxígeno en el ánodo. Esto no es porque el campo eléctrico sea débil, sino debido a que el electrolito tiene una conductividad cercana a cero y no hay conducción iónica. Al utilizar la membrana de intercambio de protones Nafion se obtiene hidrógeno en el cátodo, pero después de unas horas de operación continua, la membrana se comienza a contaminar con el oxido desprendido del ánodo.

Debido a la casi nula conductividad del agua desionizada se utiliza también agua potable que trae minerales, cloro, flúor y otros elementos químicos que aumentan la conductividad iónica, permitiendo que los iones H^+ sean impulsados por el campo eléctrico desde el ánodo hasta el cátodo. Sin embargo, la cantidad de los minerales

presentes en el agua potable es variable, lo que hace que su conductividad no sea constante.

Las últimas experiencias se efectúan con agua salada, donde se puede variar a discreción la salinidad y por ende la conductividad. La eficiencia máxima de 0,53 litros/Wh se produce con los electrodos separados 2mm, voltaje de 2V y una salinidad de 35 g/L. Este es el caso óptimo, si se mira desde el lado de producción de hidrógeno, sin embargo se debe tener en cuenta que también se oxidan más rápido los electrodos.

En el caso óptimo, se deben utilizar electrodos de acero 316L, en posición horizontal. Pese a que son de acero inoxidable, la presencia de sal en el agua produce que se oxide el electrodo. La separación entre electrodos como se mencionó en el párrafo anterior, debe ser de 2mm o inferior. Lo ideal es que sea cercano a 0mm, pero eso ya se debe hacer con otros materiales.

6.1. Trabajo futuro

El objetivo principal de construir un electrolizador experimental se cumple. El dispositivo logra producir hidrógeno a partir de diferentes aguas. Sin embargo quedan varias experiencias en las que se puede seguir trabajando. Entre ellas:

- Efectuar experimentos con celdas del tipo seco y empaquetaduras rígidas. Al utilizar empaquetaduras de goma en los primeros diseños de celda se produce un problema, debido a que estas se deforman y la membrana se deforma solidariamente con ellas. Además con este tipo de celda es posible llevar el hidrógeno producido por medio de mangueras a estanques exteriores de mayor tamaño.
- Experimentar con algún método para que las burbujas sean removidas desde la superficie de los electrodos. Se puede ocupar una bomba eléctrica que impulse electrolito hacia los electrodos, de manera de obligar a las burbujas a soltarse de la superficie. El líquido debe ser impulsado desde la base del electrodo, de manera longitudinal a la superficie.
- Comprobar la pureza del hidrógeno obtenido. Se sugiere que sea por medio de cromatografía de gases.
- Para efectuar un análisis económico se deben utilizar celdas del tipo seco. Con ellas se puede escalar el diseño en arreglos serie, paralelo o una mezcla de ambos.
- Diseñar y construir: el sistema de administración de electrolito, los estanques de electrolito, estanques de almacenamiento de hidrógeno, sistema de control de temperatura y flujo, sistema de secado y compresión del hidrógeno producido.
- Utilizar un dispositivo de filtrado físico y/o químico del agua usada como electrolito para reutilizarla en el proceso.
- Trabajar con electrodos cuya superficie se encuentre dopada con diferentes catalizadores que favorezcan la producción de hidrógeno en el cátodo y que protejan al ánodo de la corrosión.

- Desarrollar una fuente de poder que entregue mayor corriente, si se van a utilizar electrodos de mayor superficie.
- Efectuar los ensayos con agua salada durante mayor tiempo para llegar a una conclusión definitiva sobre el límite de horas de operación que soporta el ánodo de acero inoxidable, antes que se desintegre producto de la oxidación.
- Experimentar con separaciones entre electrodos entre 2mm a 0mm y observar si disminuye la tensión mínima a la que se produce hidrógeno en forma experimental.

7. Bibliografía

- [1] Diana Gómez de la Rúa et al. “La domesticación del fuego durante el pleistoceno inferior y medio” Universidad de Valladolid, 2009.
- [2] Asociación Chilena de Seguridad, “Boletín 93 comité paritario higiene y seguridad”, 2010
- [3] Claudio A. Agostini et al. “La industria del petróleo en Chile” CEP Chile, 2009.
- [4] Pavlos Nikolaidis et al, “A comparative overview of hydrogen production processes” Elsevier, 2015.
- [5] Emmanuel Zoulias et al, “A review on water electrolysis”, CRES, Greece and FRC, Cyprus, 2001.
- [6] Frano Barbir, “PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources”, Elsevier, 2004.
- [7] Renewable electrolysis, NREL, <https://www.nrel.gov/hydrogen/renewable-electrolysis.html> Accedida en Julio 2018.
- [8] Agata Godula-Jopek, “Hydrogen production by electrolysis”, Wiley-VCH, 2015.
- [9] Hychico, <http://www.hychico.com.ar/esp/planta-hidrogeno.html>, Accedida en Julio 2018.
- [10] NOW, Alemania, http://www.ehec.info/images/EHEC2018/Plenaries/EHEC2018_NOW_Herb_ert.pdf , Accedida en Julio 2018.
- [11] ITM Power, <http://www.itm-power.com/news-item/worlds-largest-hydrogen-electrolysis-in-shells-rhineland-refinery> , Accedida en Julio 2018.
- [12] Llorca, J, “El hidrógeno y nuestro futuro energético”. Barcelona. Ediciones UPC. 2010.
- [13] Indura Chile. Hojas de datos de seguridad de los gases. <http://www.indura.cl/Web/CL/Biblioteca/Certificados-Indura/Hojas-De-Seguridad/Gases>
- [14] Miguel Marco Fondevila y Sabina Scarpellini. “Guia de mercados energéticos”. Universidad de Zaragoza. 2013.
- [15] Biología, la química de la vida. <https://es.khanacademy.org/science/biology/chemistry--of-life/chemical-bonds-and-reactions/a/chemical-bonds-article>
- [16] Raymond A. Serway. “Física para ciencias e ingeniería”. 2008.

- [17] Dmitri Bessarabov et al. "Electrolysis for hydrogen production – Principles and applications". 2016.
- [18] Ernesto Bianchi Souter, "Apuntes de acumuladores y sistemas electroquímicos reversibles". 2018.
- [19] Ursua et al. "Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends". IEEE. 2011.
- [20] Greig Chisholm, Leroy Cronin "Storing Energy". Elsevier. 2016.
- [21] Emmanuel Zoulias et al, "A review on water electrolysis", CRES, Greece and FRC, Cyprus. 2001.
- [22] Marcelo Carmo et al, "A comprehensive review on PEM water electrolysis", International Journal of hydrogen energy, Elsevier, 2013.
- [23] Paloma Asencio, "Hidrógeno y pila de combustible", Energy management agency, Europe.
- [24] Paul E. Dodds et al., "A review of hydrogen delivery technologies for energy system models", UKSHEC, 2012.
- [25] Dmitri Bessarabov, "PEM electrolysis for hydrogen production. Principles and Applications", CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.

8. Anexos

8.1. Tablas y planos

Corriente en función del voltaje para agua desionizada electrodo acero inoxidable 316L 25mm x 80mm lijados					5,1	708	501	243	343	10,1	2230	1223	600	812
separacion electrodos	Separacion 2mm	Separacion 5mm	Separacion 8mm	Separacion 11mm	5,2	755	510	250	358	10,2	2270	1241	610	823
Tension [V]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	5,3	791	517	257	370	10,3	2300	1260	622	833
0,1	1	8	8	4	5,4	820	524	264	379	10,4	2330	1299	629	844
0,2	4	11	5	14	5,5	849	550	279	398	10,5	2370	1324	636	852
0,3	6	12	6	16	5,6	878	561	283	411	10,6	2380	1335	648	860
0,4	8	12	7	18	5,7	887	572	284	424	10,7	2430	1356	658	868
0,5	11	18	9	23	5,8	924	576	300	435	10,8	2440	1361	668	878
0,6	14	19	12	26	5,9	960	579	311	454	10,9	2480	1388	680	896
0,7	17	20	14	30	6,0	989	587	319	467	11	2500	1411	689	902
0,8	22	23	15	33	6,1	1025	598	328	483	11,1	2530	1436	700	916
0,9	28	26	17	40	6,2	1050	601	335	496	11,2	2580	1459	710	934
1,0	32	29	20	42	6,3	1080	624	340	506	11,3	2610	1485	718	950
1,1	37	35	23	49	6,4	1110	625	346	516	11,4	2640	1511	728	964
1,2	42	37	26	52	6,5	1140	643	354	533	11,5	2670	1549	738	979
1,3	59	41	27	56	6,6	1170	650	362	544	11,6	2700	1560	747	988
1,4	64	42	30	61	6,7	1210	673	364	556	11,7	2740	1571	757	1003
1,5	68	43	33	66	6,8	1220	680	372	567	11,8	2770	1582	769	1021
1,6	73	53	38	71	6,9	1260	697	380	577	11,9	2810	1614	777	1039
1,7	75	54	39	77	7,0	1270	712	388	589	12	2840	1647	788	1055
1,8	87	69	48	83	7,1	1300	728	388	593	12,1	2900	1680	800	1072
1,9	100	77	50	90	7,2	1330	742	395	598	12,2	2920	1700	807	1094
2,0	104	79	53	97	7,3	1370	758	401	602	12,3	2940	1730	820	1105
2,1	112	86	53	100	7,4	1400	785	406	614	12,4	2990	1765	827	1123
2,2	131	94	56	109	7,5	1430	788	411	616	12,5	3020	1799	839	1138
2,3	143	100	61	115	7,6	1460	808	415	618	12,6	3030	1850	846	1155
2,4	161	106	65	120	7,7	1490	824	423	628	12,7	3080	1880	856	1178
2,5	180	121	67	128	7,8	1520	833	429	629	12,8	3120	1920	870	1193
2,6	200	131	73	130	7,9	1550	842	435	636	12,9	3160	1930	876	1219
2,7	228	146	79	141	8,0	1570	856	442	639	13	3180	1970	885	1243
2,8	260	153	81	144	8,1	1600	870	447	641	13,1	3210	2000	897	1266
2,9	279	170	86	151	8,2	1640	891	457	654	13,2	3240	2060	906	1284
3,0	312	185	90	160	8,3	1670	913	461	655	13,3	3270	2100	920	1313
3,1	320	201	98	167	8,4	1700	923	465	658	13,4	3300	2120	931	1328
3,2	343	218	104	173	8,5	1720	939	472	668	13,5	3330	2150	944	1355
3,3	353	236	108	179	8,6	1750	960	479	673	13,6	3360	2160	953	1379
3,4	374	256	116	186	8,7	1800	968	488	687	13,7	3380	2200	964	1390
3,5	385	279	120	194	8,8	1850	979	495	694	13,8	3400	2210	975	1398
3,6	398	307	126	201	8,9	1890	1007	504	701	13,9	3430	2260	984	1416
3,7	408	327	131	209	9,0	1920	1025	510	708	14	3460	2280	993	1439
3,8	423	343	138	218	9,1	1940	1049	517	718	14,1	3490	2300	1007	1448
3,9	439	359	143	224	9,2	1960	1055	525	730	14,2	3510	2330	1020	1463
4,0	452	373	153	236	9,3	1990	1061	537	741	14,3	3530	2350	1023	1481
4,1	476	388	158	242	9,4	2030	1083	543	752	14,4	3550	2390	1039	1501
4,2	498	403	164	250	9,5	2050	1104	549	758	14,5	3570	2410	1054	1528
4,3	510	423	171	263	9,6	2070	1136	557	762	14,6	3630	2430	1067	1558
4,4	522	441	178	269	9,7	2120	1187	566	778	14,7	3640	2450	1082	1569
4,5	544	450	187	281	9,8	2130	1174	573	787	14,8	3650	2500	1089	1589
4,6	562	454	196	289	9,9	2170	1197	584	796	14,9	3680	2540	1103	1618
4,7	592	462	207	300	10	2200	1210	593	802	15	3700	2580	1118	1625
4,8	625	468	212	307										
4,9	648	471	223	319										
5,0	671	486	231	334										

Tabla 1. Corriente en función del voltaje (agua desionizada) electrodos acero inoxidable de 25mm x 80mm.

Corriente en función del voltaje para electrodo titanio recubierto platino 25mm x 80mm					Corriente en función del voltaje para electrodo acero inoxidable de 14mm x 80mm				
separacion electrodos	Separacion 11mm	Separacion 8mm	Separacion 5mm	Separacion 2mm	separacion electrodos	Separacion 11mm	Separacion 8mm	Separacion 5mm	Separacion 2mm
conductividad	0	0	0	0	conductividad	0	0	0	0
Tension [V]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Tension [V]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]
1	25	39	51	100	1	12	17	18	20
1,1	28	42	56	106	1,1	14	17	18	26
1,2	32	43	62	112	1,2	14	17	18	29
1,3	35	51	65	131	1,3	14	17	19	31
1,4	37	53	71	136	1,4	15	18	20	36
1,5	41	57	77	144	1,5	16	19	22	40
1,6	43	61	86	164	1,6	17	22	25	42
1,7	48	66	89	172	1,7	19	24	26	48
1,8	52	70	96	180	1,8	20	24	29	58
1,9	56	74	100	189	1,9	21	26	33	61
2	57	78	108	203	2	22	28	35	65
2,1	59	81	118	218	2,1	23	29	37	74
2,2	63	87	121	232	2,2	25	33	40	83
2,3	68	90	125	242	2,3	27	34	44	99
2,4	68	94	131	255	2,4	28	36	46	121
2,5	71	98	140	271	2,5	30	37	48	141
2,6	75	102	150	282	2,6	32	39	51	156
2,7	78	105	152	294	2,7	33	43	53	171
2,8	82	109	160	310	2,8	34	44	57	181
2,9	83	112	166	327	2,9	36	45	60	192
3	86	116	177	340	3	37	47	66	203
3,1	89	120	185	380	3,1	39	50	69	213
3,2	92	126	198	420	3,2	40	51	70	225
3,3	98	131	204	460	3,3	42	55	74	245
3,4	100	136	218	486	3,4	45	57	80	268
3,5	101	139	224	517	3,5	47	59	82	291
3,6	105	140	245	548	3,6	49	62	89	311
3,7	108	144	253	590	3,7	50	64	94	337
3,8	111	150	266	617	3,8	52	66	102	349
3,9	113	156	288	649	3,9	54	69	104	361
4	116	160	289	681	4	56	71	110	373
4,1	119	164	301	715	4,1	57	73	114	394
4,2	122	168	321	748	4,2	60	77	119	417
4,3	126	173	334	781	4,3	61	80	125	441
4,4	130	181	348	860	4,4	63	82	133	465
4,5	131	182	351	902	4,5	66	88	137	488
4,6	134	189	363	944	4,6	67	91	145	514
4,7	139	196	376	986	4,7	70	95	148	531
4,8	141	208	392	1028	4,8	72	98	157	548
4,9	144	210	408	1073	4,9	74	101	165	569
5	148	217	423	1109	5	75	105	172	590

Tabla 2. Corriente en función del voltaje para electrodo titanio recubierto platino 25mm x 80mm

Tabla 3. Corriente en función del voltaje para electrodo acero inoxidable de 14mm x 80mm

Corriente en funcion del voltaje para electrodo malla 325 acero de 15mm x 80mm					Corriente en funcion del voltaje para electrodo de niquel de 15mm x 80mm				
separacion electrodos	Separacion 11mm	Separacion 8mm	Separacion 5mm	Separacion 2mm	separacion electrodos	Separacion 11mm	Separacion 8mm	Separacion 5mm	Separacion 2mm
conductividad	0	0	0	0	conductividad	0	0	0	0
Tension [V]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Tension [V]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]	Corriente [uA]
1	25	20	24	80	1	20	21	35	80
1,1	31	22	27	92	1,1	21	24	39	101
1,2	32	23	28	105	1,2	24	28	41	122
1,3	34	23	31	113	1,3	26	30	44	123
1,4	39	25	33	122	1,4	28	33	48	129
1,5	40	27	43	135	1,5	30	37	52	160
1,6	45	28	45	146	1,6	33	43	60	183
1,7	50	30	48	160	1,7	35	48	63	194
1,8	55	32	52	179	1,8	38	49	69	247
1,9	61	34	57	184	1,9	40	52	76	285
2	66	37	65	200	2	44	56	80	350
2,1	75	39	67	218	2,1	45	60	88	384
2,2	77	41	72	240	2,2	47	64	95	419
2,3	83	45	81	255	2,3	50	69	99	490
2,4	90	45	88	275	2,4	53	74	111	503
2,5	97	47	95	295	2,5	55	78	118	586
2,6	101	52	102	315	2,6	58	85	130	618
2,7	110	53	107	330	2,7	61	89	135	631
2,8	114	56	113	345	2,8	63	92	145	680
2,9	118	58	122	352	2,9	66	96	152	716
3	126	62	133	360	3	69	104	163	761
3,1	134	64	145	386	3,1	72	111	172	819
3,2	140	69	156	403	3,2	77	117	186	858
3,3	147	71	171	412	3,3	78	121	196	901
3,4	154	73	186	421	3,4	82	130	209	980
3,5	161	75	195	425	3,5	84	133	223	1052
3,6	167	77	211	438	3,6	87	140	236	1143
3,7	173	82	223	460	3,7	91	148	254	1208
3,8	178	85	236	467	3,8	93	152	264	1313
3,9	189	89	248	484	3,9	97	161	282	1400
4	197	91	261	501	4	101	168	292	1486
4,1	201	93	274	517	4,1	103	175	305	1565
4,2	208	97	289	534	4,2	106	182	317	1644
4,3	221	100	305	551	4,3	109	191	329	1707
4,4	224	103	316	556	4,4	112	200	337	1789
4,5	231	107	334	582	4,5	116	211	356	1861
4,6	238	107	341	600	4,6	119	217	372	1924
4,7	245	111	357	624	4,7	123	229	381	1980
4,8	254	115	370	636	4,8	125	236	391	2050
4,9	267	119	384	648	4,9	128	251	401	2130
5	271	123	398	650	5	132	264	408	2220

Tabla 4. Corriente en función del voltaje para electrodo malla 325 acero de 15mm x 80mm

Tabla 5. Corriente en función del voltaje para electrodo de niquel de 15mm x 80mm

Corriente en función del voltaje agua salada con electrodos separados 11mm				
Salinidad	Salinidad 1 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 7 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 14 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 35 gr sal en 1lt de agua
Tension [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
0,1	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,2	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,4	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,5	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,6	0,0001	0,00	0,00	0,00
0,7	0,0001	0,00	0,00	0,00
0,8	0,0001	0,00	0,00	0,00
0,9	0,0002	0,00	0,00	0,00
1,0	0,0005	0,00	0,00	0,00
1,1	0,0010	0,00	0,00	0,00
1,2	0,0015	0,00	0,00	0,00
1,3	0,0021	0,00	0,00	0,01
1,4	0,0030	0,00	0,00	0,01
1,5	0,0035	0,00	0,00	0,03
1,6	0,0044	0,01	0,01	0,06
1,7	0,0050	0,01	0,01	0,09
1,8	0,0055	0,02	0,02	0,13
1,9	0,0061	0,03	0,02	0,21
2,0	0,0080	0,05	0,04	0,28
2,1	0,0093	0,07	0,07	0,35
2,2	0,0107	0,09	0,09	0,43
2,3	0,0168	0,11	0,11	0,52
2,4	0,0196	0,14	0,14	0,62
2,5	0,0225	0,17	0,20	0,72
2,6	0,0272	0,20	0,25	0,82
2,7	0,0321	0,23	0,30	0,92
2,8	0,0388	0,26	0,37	1,02
2,9	0,0450	0,30	0,41	1,12
3,0	0,0500	0,34	0,48	1,23
3,1	0,0528	0,36	0,53	1,34
3,2	0,0580	0,40	0,59	1,45
3,3	0,0618	0,43	0,65	1,55
3,4	0,0684	0,46	0,71	1,65
3,5	0,0705	0,50	0,77	1,80
3,6	0,0760	0,53	0,85	1,98
3,7	0,0800	0,56	0,90	2,10
3,8	0,0840	0,59	0,95	2,15
3,9	0,0910	0,64	1,02	2,25
4,0	0,0988	0,67	1,07	2,36
4,1	0,1000	0,70	1,13	2,57
4,2	0,1068	0,73	1,18	2,64
4,3	0,1130	0,76	1,23	2,77
4,4	0,1160	0,80	1,28	2,91
4,5	0,1200	0,84	1,37	2,98
4,6	0,1240	0,87	1,42	3,09
4,7	0,1310	0,90		
4,8	0,1360	0,93		
4,9	0,1410	0,98		
5,0	0,1490	1,04		

Tabla 6. Corriente en función del voltaje agua salada con electrodos separados 11mm

Corriente en función del voltaje agua salada con electrodos separados 5mm				
Salinidad	Salinidad 1 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 7 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 14 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 35 gr sal en 1lt de agua
Tension [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
0,1	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,2	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,4	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,5	0,0001	0,00	0,00	0,00
0,6	0,0002	0,00	0,00	0,00
0,7	0,0002	0,00	0,00	0,00
0,8	0,0004	0,00	0,00	0,00
0,9	0,0007	0,00	0,00	0,00
1,0	0,0014	0,00	0,00	0,00
1,1	0,0023	0,00	0,00	0,00
1,2	0,0038	0,00	0,00	0,00
1,3	0,0039	0,00	0,00	0,00
1,4	0,0041	0,00	0,00	0,01
1,5	0,0051	0,00	0,00	0,01
1,6	0,0056	0,00	0,01	0,03
1,7	0,0069	0,01	0,02	0,04
1,8	0,0102	0,02	0,03	0,06
1,9	0,0147	0,03	0,06	0,15
2,0	0,0203	0,06	0,10	0,23
2,1	0,0283	0,09	0,14	0,33
2,2	0,0349	0,13	0,21	0,56
2,3	0,0423	0,16	0,32	0,69
2,4	0,0516	0,19	0,41	0,79
2,5	0,0600	0,27	0,55	0,89
2,6	0,0700	0,31	0,66	0,99
2,7	0,0780	0,35	0,73	1,14
2,8	0,0840	0,42	0,83	1,29
2,9	0,0930	0,48	0,93	1,54
3,0	0,1030	0,54	1,03	1,76
3,1	0,1110	0,58	1,13	1,95
3,2	0,1250	0,64	1,23	2,16
3,3	0,1310	0,69	1,34	2,34
3,4	0,1380	0,75	1,43	2,49
3,5	0,1500	0,80	1,53	2,70
3,6	0,1540	0,86	1,64	2,93
3,7	0,1640	0,90	1,73	3,09
3,8	0,1760	0,96	1,81	3,28
3,9	0,1840	1,03	1,91	3,47
4,0	0,1940	1,07	2,01	3,66
4,1	0,2100	1,12	2,12	3,85
4,2	0,2200	1,16	2,20	4,05
4,3	0,2300	1,21	2,31	4,19
4,4	0,2400	1,26	2,41	4,33
4,5	0,2500	1,32	2,51	4,50
4,6	0,2600	1,37	2,61	4,67
4,7	0,2700	1,44	2,72	4,99
4,8	0,2800	1,50	2,80	5,24
4,9	0,2900	1,55	2,90	
5,0	0,3000	1,69	3,03	

Tabla 7. Corriente en función del voltaje agua salada con electrodos separados 5mm

Corriente en función del voltaje agua salada con electrodos separados 2mm				
Salinidad	Salinidad 1 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 7 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 14 gr sal en 1lt de agua	Salinidad 35 gr sal en 1lt de agua
Tension [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,00	0,00	0,00	0,00
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,00	0,00
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00
0,7	0,00	0,00	0,00	0,00
0,8	0,00	0,00	0,00	0,00
0,9	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,1	0,00	0,00	0,00	0,00
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00
1,3	0,00	0,00	0,00	0,00
1,4	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	0,00	0,00	0,00	0,01
1,6	0,00	0,01	0,01	0,02
1,7	0,00	0,02	0,02	0,04
1,8	0,00	0,03	0,03	0,06
1,9	0,01	0,04	0,05	0,08
2,0	0,01	0,08	0,10	0,11
2,1	0,02	0,13	0,18	0,25
2,2	0,03	0,18	0,30	0,73
2,3	0,04	0,25	0,45	0,95
2,4	0,06	0,33	0,60	1,19
2,5	0,08	0,43	0,75	1,45
2,6	0,10	0,50	0,90	1,61
2,7	0,12	0,60	1,07	1,88
2,8	0,14	0,68	1,25	2,08
2,9	0,16	0,76	1,41	2,33
3,0	0,17	0,87	1,57	2,62
3,1	0,19	0,94	1,69	2,94
3,2	0,21	1,07	1,87	3,16
3,3	0,23	1,13	2,00	3,39
3,4	0,25	1,21	2,16	3,70
3,5	0,27	1,30	2,30	3,95
3,6	0,29	1,39	2,47	4,20
3,7	0,31	1,45	2,61	4,44
3,8	0,32	1,52	2,73	4,66
3,9	0,33	1,62	2,89	5,04
4,0	0,35	1,72	3,05	5,24
4,1	0,36	1,82	3,17	
4,2	0,38	1,85	3,31	
4,3	0,41	1,93	3,58	
4,4	0,42	2,02	3,66	
4,5	0,43	2,15	3,82	
4,6	0,45	2,25	3,97	
4,7	0,47	2,35	4,18	
4,8	0,49	2,45	4,29	
4,9	0,50	2,49	4,40	
5,0	0,52	2,57	4,52	

Tabla 8. Corriente en función del voltaje agua salada con electrodos separados 2mm

Corriente en función del voltaje para agua potable				
separacion electrodos	Separacion 11mm	Separacion 8mm	Separacion 5mm	Separacion 2mm
Tension [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
0,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,3	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
0,4	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001
0,5	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
0,6	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
0,7	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004
0,8	0,0002	0,0005	0,0004	0,0005
0,9	0,0004	0,0006	0,0004	0,0005
1,0	0,0005	0,0007	0,0005	0,0007
1,1	0,0005	0,0009	0,0005	0,0009
1,2	0,0007	0,0012	0,0006	0,0009
1,3	0,0010	0,0014	0,0009	0,0013
1,4	0,0010	0,0016	0,0011	0,0015
1,5	0,0012	0,0018	0,0015	0,0017
1,6	0,0013	0,0022	0,0020	0,0019
1,7	0,0015	0,0024	0,0025	0,0021
1,8	0,0020	0,0026	0,0030	0,0027
1,9	0,0026	0,0028	0,0038	0,0030
2,0	0,0028	0,0030	0,0044	0,0055
2,1	0,0034	0,0033	0,0045	0,0061
2,2	0,0036	0,0039	0,0048	0,0065
2,3	0,0045	0,0044	0,0061	0,0070
2,4	0,0048	0,0050	0,0063	0,0075
2,5	0,0051	0,0060	0,0066	0,0081
2,6	0,0072	0,0070	0,0086	0,0105
2,7	0,0092	0,0086	0,0123	0,0149
2,8	0,0102	0,0114	0,0141	0,0182
2,9	0,0143	0,0133	0,0163	0,0261
3,0	0,0145	0,0182	0,0203	0,0300
3,1	0,0168	0,0188	0,0242	0,0341
3,2	0,0209	0,0240	0,0271	0,0454
3,3	0,0224	0,0255	0,0319	0,0530
3,4	0,0255	0,0300	0,0383	0,0560
3,5	0,0275	0,0339	0,0425	0,0700
3,6	0,0295	0,0365	0,0472	0,0755
3,7	0,0337	0,0409	0,0525	0,0870
3,8	0,0378	0,0444	0,0587	0,0950
3,9	0,0400	0,0477	0,0642	0,1060
4,0	0,0430	0,0512	0,0691	0,1190
4,1	0,0474	0,0556	0,0736	0,1260
4,2	0,0524	0,0595	0,0803	0,1370
4,3	0,0568	0,0623	0,0864	0,1490
4,4	0,0588	0,0665	0,0914	0,1540
4,5	0,0608	0,0720	0,0962	0,1680
4,6	0,0628	0,0744	0,1027	0,1740
4,7	0,0670	0,0790	0,1110	0,1850
4,8	0,0695	0,0824	0,1160	0,1900
4,9	0,0733	0,0868	0,1230	0,2050
5,0	0,0781	0,0907	0,1310	0,2180

Tabla 9. Corriente en función del voltaje para agua potable electrodo acero inox 25mm x 80mm

Voltaje teorico y experimental en funcion de la corriente		
35g/L agua salada, separacion 2mm		
I A	V teorico	V experimental
0,01	1,30415502	1,55
0,02	1,36081825	1,62
0,04	1,44485067	1,68
0,06	1,50728546	1,72
0,08	1,55735265	1,76
0,1	1,599395	1,8
0,2	1,74794125	1,84
0,3	1,84870168	1,89
0,4	1,92786446	1,94
0,5	1,99465965	1,99
0,6	2,05343	2,04
0,7	2,106569	2,09
0,8	2,15553697	2,14
0,9	2,20129086	2,19
1	2,24449193	2,25
1,1	2,28561626	2,32
1,2	2,32501804	2,37
1,3	2,36296793	2,4
1,4	2,39967743	2,44
1,5	2,43531492	2,48
1,6	2,47001668	2,51
1,7	2,50389455	2,55
1,8	2,53704143	2,58
1,9	2,56953536	2,6
2	2,60144251	2,64
2,1	2,63281946	2,67
2,2	2,663715	2,71
2,3	2,69417147	2,74
2,4	2,72422587	2,78
2,5	2,75391069	2,81
2,6	2,78325465	2,85
2,7	2,81228325	2,87
2,8	2,84101922	2,87
2,9	2,86948293	2,88
3	2,89769269	2,95
3,1	2,92566501	2,95
3,2	2,95341486	2,95
3,3	2,98095582	2,96
3,4	3,00830028	2,99
3,5	3,03545956	3
3,6	3,062444	3,04
3,7	3,08926313	3,09
3,8	3,11592572	3,09
3,9	3,14243983	3,1
4	3,16881294	3,16
4,1	3,19505197	3,16
4,2	3,22116335	3,17
4,3	3,24715305	3,17
4,4	3,27302663	3,18
4,5	3,29878929	3,2
4,6	3,32444586	3,23
4,7	3,3500009	3,26
4,8	3,37545865	3,32
4,9	3,40082311	3,34
5	3,42609803	3,39
5,1	3,45128693	3,42
5,2	3,47639314	3,45

Tabla 10. Voltaje teórico y experimental en función de la corriente. 35g/L separados 2mm

