

# **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero Inoxidable**

María Eugenia Rodríguez Ferrari

Relatório da dissertação apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Industrial**  
**Área de especialização em Engenharia Mecânica**

Novembro de 2018

# **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero Inoxidable**

María Eugenia Rodríguez Ferrari

Relatório da dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Industrial**

**Área de especialização em Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Dra. Ana Maria Alves Queiroz da Silva

Prof. Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Novembro de 2018

*O que ouço, esqueço. O que vejo, lembro. Mas o que faço, aprendo.*  
*(Albert Einstein)*

# Agradecimientos

Me gustaría manifestar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron en la realización de éste proyecto.

En primer lugar, un profundo agradecimiento a mis orientadores, Profesora Doctora Ana Maria Alves Queiroz da Silva y el Profesor Doctor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro, por aceptar este proyecto que durante años quise desenvolver. Les doy las gracias por la dedicación, motivación y perseverancia que me dedicaron, también agradezco la disponibilidad para solucionar los distintos problemas que surgieron en las diferentes etapas de este proyecto.

Un especial agradecimiento a Paula Marina de Sousa Plasencia Matos, Maria João Almeida Pinto Santos Afonso y a Susana Sofia Alves Freitas por estar siempre disponibles y con una sonrisa motivadora en los momentos difíciles. Gracias de corazón por el apoyo moral que me dieron.

También quería agradecer al profesor Jorge Henrique de Carvalho Santos y al laboratorio FabLab por la impresión de las tapas de acrílico y la buena disposición que siempre me dedico. Al señor Abílio de Jesus Oliveira Marcelo y a Jorge Paulo del Laboratorio de Tecnología Mecánica, quienes fueron muy atentos y se prestaron siempre disponibles cuando precisé de ayuda con las herramientas y máquinas del laboratorio.

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo moral y económico que hizo posible la conclusión de mis estudios.

Y qué decir de mi gran amiga Margarida Gomes sino es un gracias con letras mayúsculas. Gracias por estar siempre a mi lado y devolverme el norte en los momentos difíciles. Gracias por luchar cuando yo ya no tengo fuerzas y por motivarme siempre a seguir mis sueños.

# Resumen

Las constantes preocupaciones sobre el cambio climático y el calentamiento global, producido por las emisiones de dióxido de carbono asociadas al uso de combustibles fósiles, convirtieron el hidrogeno en el principal vector energético del futuro inmediato debido a que es el único combustible que se puede producir de un recurso renovable tan abundante como el agua y cuyo producto de combustión es únicamente agua. Al contrario que los hidrocarburos, no puede ser destruido, sino que simplemente cambia de estado, siendo una buena opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Se conocen cuatro grandes categorías de métodos de síntesis que producen hidrógeno: biológica, química, electroquímica y tecnologías térmicas. En este proyecto se optó por trabajar con el método de síntesis electroquímica, concretamente en la electrolisis del agua que representa el 4% de la producción mundial de hidrógeno y que comparado con otros métodos, tiene la ventaja de producir hidrógeno extremadamente puro (> 99.9%) y no emite contaminantes ni gases de efecto invernadero ya que el producto de su combustión es solo agua.

En este proyecto se diseñó, proyecto y construyo una célula para la electrolisis alcalina del agua, con el objetivo de conseguir producir gas de Brown para ser utilizado, en un futuro, como combustible en un motor de combustión interna.

Para conseguir producir gas de Brown, se utilizó como electrolito una solución acuosa de hidróxido de potasio ( $\text{KOH} \approx 1 \text{ mol/L}$ ). Se establecieron como parámetros fijos la distancia entre electrodos (15 mm), el volumen de electrolito ( $V_{\text{KOH}}=160 \text{ mL}$ ), el tiempo de medición de producción de gas.

Se estudió la producción de gas Brown utilizando electrodos de dos materiales diferentes, uno de referencia de estudios anteriores, el acero inoxidable 304 L y otro material nuevo, el acero inoxidable 420 MC. Se estudió el efecto de un tratamiento de decapado en los electrodos, usando ácido clorhídrico ( $\text{HCl} \approx 1 \text{ mol/L}$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  al 5%), en la producción de gas. Se determinó el consumo de electrolito durante el proceso de electrólisis y se evaluó el efecto de la intensidad de corriente en el aumento o disminución de la producción

de gas, trabajando con tres intensidades de corriente diferentes 1, 2 y 3 amperios. Finalmente se realizó un estudio de la influencia de la porosidad y la rugosidad del metal en la producción de gas de Brown.

Se concluyó que el aumento de la intensidad de corriente provoca un aumento en la producción de gas de Brown. El acero 304 L y el acero 420 MC tienen un comportamiento similar en lo que se refiere al volumen de producción de gas de Brown, pero el acero 420 MC no se recomienda en este tipo de procesos electroquímicos porque libera óxido durante el proceso de electrolisis contaminando el electrolito (KOH). No se recomienda realizar un tratamiento de decapado ya que no produce mejoras en la producción de gas y debilita el material del electrodo disminuyendo su vida útil. El consumo de electrolito (KOH) no representa un problema, ya que se obtuvieron valores muy bajos de consumo durante los ensayos de electrolisis. Se determinó que el aumento de la rugosidad en la superficie del electrodo facilita el desprendimiento de las burbujas de gas aumentando la producción de gas y se comprobó que a medida que aumenta la porosidad en la superficie del acero, aumenta el área útil del metal a través de la formación de cavidades que favorecen un aumento en la producción de gas de Brown, ya que se dispone de una superficie mayor.

**Palabras-clave:** Electrolisis alcalina del agua, gas de Brown, electrodo de acero inoxidable 304 L, electrodo de acero inoxidable 420 MC.



## Abstract

The constant concerns about climate change and global warming, produced by carbon dioxide emissions associated with the use of fossil fuels, turned hydrogen into the main energy vector of the immediate future because it is the only fuel that can be produced from a renewable resource as abundant as water and whose combustion product is only water. Unlike hydrocarbons, it can not be destroyed but simply changes its status, being a good option to reduce greenhouse gas emissions. There are four main synthesis methods to produce hydrogen: Biological, chemical, electrochemical and thermal technologies. In this project we focus on the electrochemical synthesis method, specifically in the electrolysis of water, which represents 4% of the world's hydrogen production and which, compared to other methods, has the advantage of producing extremely pure hydrogen (> 99.9%) and it does not emit pollutants or greenhouse gases since the product of its combustion is only water.

In this project, was designed, projected and built an alkaline water electrolysis cell, with the aim of producing Brown gas to be used, in the future, as fuel in an internal combustion engine.

In order to produce Brown's gas, a solution of potassium hydroxide ( $\text{KOH} \approx 1 \text{ mol/L}$ ) was used as the electrolyte. The distance between electrodes (15 mm), the volume of electrolyte ( $V_{\text{KOH}} = 160 \text{ mL}$ ), the measurement time of gas production were established as fixed parameters.

The Brown gas production of two types of electrodes of different materials was studied, one of reference of previous studies, the stainless steel 304 L and another new material, the stainless steel 420 MC. The effect of a pickling treatment on the electrodes was studied, using hydrochloric acid ( $\text{HCl} \approx 1 \text{ mol/L}$ ) and nitric acid (5%  $\text{HNO}_3$ ), in gas production.

The electrolyte consumption was determined during the electrolysis process and the effect of current intensity on the increase or decrease of the gas production was evaluated,

working with three different currents 1, 2 and 3 amperes. Finally, a study of the influence of the porosity and the roughness of the metal in Brown's gas production was made.

It was verified that the increase in current intensity causes an increase in Brown's gas production. Steel 304 L and steel 420 MC have a similar behavior regarding to Brown's gas production, but 420 MC steel is not recommended in this type of electrochemical processes because it releases rust during the electrolysis process, contaminating the electrolyte (KOH). It is not recommended to perform a pickling treatment as it does not produce improvements in gas production and weakens the material of the electrode, decreasing its useful life. The consumption of electrolyte (KOH) is not a problem, since very low consumption values were obtained during the electrolysis tests. It was determined that the increase in roughness at the surface of the electrode facilitates the release of gas bubbles by increasing gas production and it was found that as the porosity on the surface of the steel increases, the useful area of the metal increases because the formation of cavities that favor an increase in Brown's gas production, since a larger area is available.

**Key-Words:** Alkaline water electrolysis, Brown gas, 304 L stainless steel electrode, 420 MC stainless steel electrodes.



## Abreviaturas

$E_{celda}$  - Potencial de la celda (V)

$E_{HHV}$  - Poder calorífico superior (High Heating Value)-(J/mol)

$E_{HHV}^0$  - Poder calorífico superior (High Heating Value) en condiciones estándar-(J/mol)

$E_{tn}$  - Potencial termoneutral (V)

$E_{tn}^0$  - Potencial termoneutral en condiciones estándar (V)

$E_{rev}$  - Potencial reversible termodinámico (V)

$E_{rev}^0$  - Potencial reversible termodinámico en condiciones estándar (V)

$F$  - Constante de Faraday (96500 C/mol)

$I$  - Intensidad de corriente (A)

$I_{cel}$  - Intensidad de la celula (A)

$m$  - Masa (g)

$M$  - Masa molar (g/mol)

$n$  - Cantidad de sustancia liberada (mol)

$Q$  - Carga eléctrica (C)

$Q_e(T)$  - Demanda de energía térmica (J)

$R_{anodo}$  – Sobrepotencial del ánodo (V)

$R_b$  – Resistencia de las burbujas ( $\Omega$ )

$R_{Burb.H_2}$  – Resistencia de las burbujas de hidrógeno ( $\Omega$ )

$R_{Burb.O_2}$  – Resistencia de las burbujas de oxígeno ( $\Omega$ )

$R_c$  – Resistencia del circuito ( $\Omega$ )

$R_{catodo}$  . Sobrepotencial del cátodo (V)

$R_e$  – Resistencia del electrolito ( $\Omega$ )  
 $R_{electric}$  – Resistencia del circuito eléctrico ( $\Omega$ )  
 $R_{iones}$  – Resistencia del electrolito ( $\Omega$ )  
 $R_m$  – Resistencia de la membrana ( $\Omega$ )  
 $R_{membr.}$  – Resistencia de la membrana ( $\Omega$ )  
 $R_{Total}$  – Resistencia total ( $\Omega$ )  
 $R_{celda}$  - Resistencia eléctrica y de transporte de la celda ( $\Omega$ )  
 $t$  - Tiempo (s)  
 $T$  - Temperatura absoluta (K)  
 $V$  – Voltaje (V)  
 $V_{act.}$  – Sobrevoltaje de activación (V)  
 $V_{cel}$  – Voltaje de la celda (V)  
 $V_{con}$  - Sobrevoltaje de concentración (V)  
 $V_{ohm}$  – Sobrevoltaje óhmico (V)  
 $V_{rev}$  – Voltaje reversible (V)  
 $V_{tn}$  - Voltaje neutro térmico (V)  
 $V_{\Delta H}$  - Voltaje de entalpia (V)  
 $z$  - Número de electrones asociados a la reducción/oxidación de 1 mol de substancia  
 $\Delta H(T)$  - Variación de la entalpia a temperatura T (kJ/mol)  
 $\Delta H^0$  - Variación de la entalpia en condiciones estándar (kJ/mol)  
 $\Delta S(T)$  - Variación de la entropía (kJ/mol K)  
 $\Delta S^0$  - Variación de la entropía en condiciones estándar (kJ/mol K)  
 $\Delta G(T)$  - Variación de la energía libre de Gibbs (kJ/mol)  
 $\Delta G^0$  - Variación de la energía libre de Gibbs en condiciones estándar (kJ/mol)  
 $\varepsilon$  - Eficiencia del proceso (%)  
 $\eta$  - Sobrepotencial (V)

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS Y MOTIVACIONES.....	1
1.2	EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO.....	2
1.3	ESTADO DE ARTE .....	7
1.4	ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>14</b>
2.1	FUNDAMENTOS DEL ELECTROLISIS DEL AGUA .....	14
2.1.1	<i>Electrólisis alcalina.....</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM).....</i>	<i>18</i>
2.2	TIPO DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS .....	18
2.3	GAS DE BROWN .....	20
2.4	LEYES DE FARADAY.....	21
2.5	TERMODINÁMICA .....	22
2.6	FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ELECTRÓLISIS .....	28
2.6.1	<i>Electrodo.....</i>	<i>28</i>
2.6.2	<i>Distancia entre electrodos.....</i>	<i>29</i>
2.6.3	<i>Electrolito.....</i>	<i>29</i>
2.6.4	<i>Voltaje aplicado.....</i>	<i>30</i>
2.6.5	<i>Caída de voltaje óhmico.....</i>	<i>31</i>
2.6.6	<i>Factores que contribuyen a las pérdidas por sobrevoltaje .....</i>	<i>31</i>
2.6.7	<i>Resistencia de los componentes en una celda de electrólisis .....</i>	<i>32</i>
2.6.8	<i>Factores que aumentan las pérdidas durante el proceso de electrólisis .....</i>	<i>33</i>
2.6.9	<i>Temperatura.....</i>	<i>33</i>
2.6.10	<i>Efecto de las burbujas de gas.....</i>	<i>34</i>
2.6.11	<i>Tratamiento de decapado.....</i>	<i>34</i>
2.6.12	<i>Agitación .....</i>	<i>34</i>
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y METODO .....</b>	<b>35</b>
3.1	DISEÑO DE LA CÉLULA DE ELECTROLISIS ALCALINA .....	35
3.1.1	<i>Fabricación de la célula de electrólisis, materiales y reactivos.....</i>	<i>35</i>

3.1.2	Producción de gas de Brown.....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>49</b>
4.1	ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS DEL ACERO 304 L.....	49
4.2	ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS DEL ACERO 420 MC.....	60
4.3	TITULACIÓN DEL KOH DE LOS ACEROS 304 L Y 420 MC.....	69
4.4	ESTUDIO DE RUGOSIDAD DE LOS ACEROS 304 L.....	70
4.5	ESTUDIO DE RUGOSIDAD DE LOS ACEROS 420 MC.....	72
4.6	ESTUDIO DE POROSIDAD DE LOS ACEROS 304 L.....	75
4.7	ESTUDIO DE POROSIDAD DE LOS ACEROS 420 MC.....	77
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>85</b>
6.1	PROPUESTAS DE TRABAJOS FUTUROS.....	86
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>
7.1	ANEXO A – VISTA EXPLOSIONADA Y COMPONENTES DE LA CÉLULA DE ELECTRÓLISIS CON ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE 420 MC.....	I
7.2	ANEXO B – COTAS DE LA BASE DE MADERA.....	II
7.3	ANEXO C – COTAS DEL FRASCO DE VIDRIO.....	III
7.4	ANEXO D – COTAS DE LOS ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE 420 MC.....	IV
7.5	ANEXO E – COTAS DE LA ARANDELA DE SILICONA.....	V
7.6	ANEXO F – COTAS DE LA TAPA DE ACRÍLICO DEL ACERO 420 MC.....	VI
7.7	ANEXO G – COTAS DEL SEPARADOR DE ACRÍLICO DEL ACERO 420 MC.....	VII
7.8	ANEXO H – VISTA EXPLOSIONADA Y COMPONENTES DE LA CÉLULA DE ELECTRÓLISIS CON ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE 304 L.....	VIII
7.9	ANEXO I – COTAS DE LOS ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE 304 L.....	IX
7.10	ANEXO J – COTAS DE LA BARRA DE PLÁSTICO.....	X
7.11	ANEXO K – COTAS DE LA TAPA DE ACRÍLICO DEL ACERO 304 L.....	XI
7.12	ANEXO L – COTAS DEL SEPARADOR DE ACRÍLICO DEL ACERO 304 L.....	XII
7.13	ANEXO O – COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO 304 L.....	XIII
7.14	ANEXO P – COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO 420 MC.....	XIV

## Lista de Tablas

TABLA 1- PROPIEDADES ATÓMICAS Y FÍSICAS DEL HIDRÓGENO (ADAPTADO DE [4]).....	3
TABLA 2- COMPARACIÓN ENTRE LA LIBERACIÓN DE ENERGÍA DE DISTINTOS COMBUSTIBLES (ADAPTADO DE [15]). .....	5
TABLA 3- DATOS DEL LABORATORIO-ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L.....	50
TABLA 4- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 1 A ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L. ....	50
TABLA 5- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 2 A ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L. ....	51
TABLA 6- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 3 A ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L. ....	51
TABLA 7- DATOS DEL LABORATORIO-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L. ....	52
TABLA 8- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 1 A-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L. ....	53
TABLA 9- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 2 A-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L. ....	53
TABLA 10- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 3 A-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L. ....	53
TABLA 11- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 304 L ORIGINAL PARA 1 Y 2 A. ....	57
TABLA 12- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 304 L ORIGINAL PARA 3 A.....	57
TABLA 13- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 304 L DECAPADO PARA 1 Y 2 A. ....	58
TABLA 14- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 304 L DECAPADO PARA 3 A. ....	58
TABLA 15- RENDIMIENTO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS -ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L.....	59
TABLA 16- RENDIMIENTO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L. ....	59
TABLA 17- RENDIMIENTO MEDIO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS CON ELECTRODOS DE ACERO 304 L. ....	59
TABLA 18- DATOS DEL LABORATORIO-ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 420 MC. ....	60
TABLA 19- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 1 A-ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 420 MC. ....	61
TABLA 20- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 2 A-ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 420 MC. ....	61

TABLA 21- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 3 A-ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 420 MC. ....	61
TABLA 22- DATOS DEL LABORATORIO-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC. ....	63
TABLA 23- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 1 A-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC. ....	63
TABLA 24- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 2 A-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC. ....	64
TABLA 25- CAUDAL Y VOLUMEN DE GAS DE BROWN- ENSAYO CON 3 A-ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC. ....	64
TABLA 26- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 420 MC ORIGINAL PARA 1 Y 2 A. ....	66
TABLA 27- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 420 MC ORIGINAL PARA 3 A. ....	66
TABLA 28- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 420 MC DECAPADO PARA 1 Y 2 A. ....	67
TABLA 29- VOLUMEN DE GAS DE BROWN TEÓRICO Y REAL-ACERO 420 MC DECAPADO PARA 3 A. ....	67
TABLA 30- RENDIMIENTO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS - ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 420 MC. ....	68
TABLA 31- RENDIMIENTO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS - ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC. ....	68
TABLA 32- RENDIMIENTO MEDIO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS CON ELECTRODOS DE ACERO 420 MC. ....	69
TABLA 33- CONSUMO DE KOH DESPUÉS DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS. ....	69
TABLA 34- ESTUDIO DE RUGOSIDAD-ACERO 304 L ORIGINAL. ....	70
TABLA 35- ESTUDIO DE RUGOSIDAD-ACERO 304 L ANTES Y DESPUÉS DEL DECAPADO. ....	71
TABLA 36- ESTUDIO DE RUGOSIDAD-ACERO 304 L DECAPADO, DESPUÉS DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS. ...	71
TABLA 37- ESTUDIO DE RUGOSIDAD-ACERO 420 MC ORIGINAL. ....	72
TABLA 38- ESTUDIO DE RUGOSIDAD-ACERO 420 MC ANTES Y DESPUÉS DEL DECAPADO. ....	73
TABLA 39- ESTUDIO DE RUGOSIDAD-ACERO 420 MC DECAPADO, DESPUÉS DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS. .....	73
TABLA 40- RUGOSIDAD MEDIA DE LOS ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L Y 420 MC. ....	74
TABLA 41- RUGOSIDAD MEDIA DE LOS ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L Y 420 MC. ....	75
TABLA 42- VALORES MEDIOS DE RENDIMIENTO Y CAUDAL PARA EL ACERO 304 L. ....	84
TABLA 43- VALORES MEDIOS DE RENDIMIENTO Y CAUDAL PARA EL ACERO 420 MC. ....	84

# Lista de Figuras

FIGURA 1- ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA (ADAPTADO DE [6]).	15
FIGURA 2- CONFIGURACIÓN MONOPOLAR (A LA IZQUIERDA) Y BIPOLAR (A LA DERECHA) DE UNA CELDA DE ELECTRÓLISIS (ADAPTADO DE [30]).	17
FIGURA 3- REPRESENTACIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA HÚMEDA (A LA IZQUIERDA) Y SECA (A LA DERECHA) [5].	19
FIGURA 4- TALADRO INDUSTRIAL FF1 (A LA IZQUIERDA) Y PERFORACIÓN DE LA TAPA DE LA CÉLULA DE ELECTRÓLISIS (A LA DERECHA).	36
FIGURA 5- SEPARADOR DE PLÁSTICO.	36
FIGURA 6- PRIMER PROTOTIPO DE CÉLULA DE ELECTRÓLISIS.	37
FIGURA 7- PERFORACIÓN DEL ACRÍLICO CON EL TALADRO INDUSTRIAL FF1 (A LA IZQUIERDA) Y LIMADURA DE LOS CANALES DEL SEPARADOR DE LOS ELECTRODOS (A LA DERECHA).	37
FIGURA 8- SEGUNDO PROTOTIPO DE CÉLULA DE ELECTROLISIS.	38
FIGURA 9- TERCER PROTOTIPO DE CÉLULA DE ELECTRÓLISIS.	38
FIGURA 10-MONTAJE DEL SISTEMA DE ELECTRÓLISIS – TERCER PROTOTIPO.	39
FIGURA 11- CUARTO PROTOTIPO DE CÉLULA DE ELECTRÓLISIS (A LA IZQUIERDA) Y MONTAJE DEL SISTEMA (A LA DERECHA).	40
FIGURA 12- CONJUNTO TAPA, SEPARADOR Y ELECTRODO DE ACERO 304 L.	41
FIGURA 13- QUINTO PROTOTIPO - COMPONENTES DE LA CÉLULA ELECTROLÍTICA.	41
FIGURA 14- SEXTO PROTOTIPO - CONEXIÓN DE LOS ELECTRODOS EN LA TAPA (A LA IZQUIERDA) Y MONTAJE FINAL (A LA DERECHA).	42
FIGURA 15- CONEXIÓN ENTRE LA CÉLULA DE ELECTRÓLISIS Y LA PROBETA GRADUADA.	42
FIGURA 16- COMPONENTES DEL SISTEMA DE ELECTRÓLISIS.	43
FIGURA 17- REGIONES DEL ELECTRODO DONDE SE MIDió LA RUGOSIDAD.	44
FIGURA 18- RUGOSÍMETRO.	44
FIGURA 19- MICROSCOPIO- NIKON JAPAN.	45
FIGURA 20- DECAPADO CON HCL $\approx 1\text{mol/L}$ Y CALENTADO A BAÑO MARÍA.	46
FIGURA 21- DETERMINACIÓN DE LA MASA DE LOS ELECTRODOS.	46
FIGURA 22- DECAPADO DE LOS ELECTRODOS CON HNO <sub>3</sub> AL 5%.	47
FIGURA 23- TITULACIÓN DEL KOH.	48

FIGURA 24- VOLUMEN DE GAS DE BROWN DE LOS ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 304 L. ....	51
FIGURA 25- VOLUMEN DE GAS DE BROWN DE LOS ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L. ....	54
FIGURA 26- COMPARACIÓN DEL VOLUMEN DE GAS DE BROWN DE LOS ELECTRODOS 304 L ORIGINAL Y DECAPADO. ....	54
FIGURA 27- VOLUMEN DE GAS DE BROWN DE LOS ELECTRODOS ORIGINALES DE ACERO 420 MC. ....	62
FIGURA 28- VOLUMEN DE GAS DE BROWN DE LOS ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC. ....	65
FIGURA 29- COMPARACIÓN DEL VOLUMEN DE GAS DE BROWN DE LOS ELECTRODOS 420 MC ORIGINAL Y DECAPADO. ....	65
FIGURA 30- POROSIDAD DEL ELECTRODO 304 L EN SU ESTADO NATURAL-NIKON JAPAN (50X). ....	76
FIGURA 31- POROSIDAD DEL ÁNODO (A LA IZQUIERDA) Y EL CÁTODO (A LA DERECHA), AL FINAL DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS CON ELECTRODOS DE ACERO 304 L-NIKON JAPAN (50X). ....	76
FIGURA 32- POROSIDAD DEL ÁNODO (A LA IZQUIERDA) Y EL CÁTODO (A LA DERECHA) DEL ACERO 304 L, DESPUÉS DEL TRATAMIENTO DE DECAPADO CON $HCl \approx 1M$ Y $HNO_3$ AL 5% - NIKON JAPAN (50X). ....	77
FIGURA 33- POROSIDAD DEL ÁNODO (A LA IZQUIERDA) Y EL CÁTODO (A LA DERECHA), DE LOS ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 304 L, AL FINAL DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS- NIKON JAPAN (50X). ....	77
FIGURA 34- POROSIDAD DEL ELECTRODO 420 MC EN SU ESTADO NATURAL-NIKON JAPAN (50X). ....	78
FIGURA 35- POROSIDAD DEL ÁNODO (A LA IZQUIERDA) Y EL CÁTODO (A LA DERECHA), AL FINAL DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS CON ELECTRODOS DE ACERO 420 MC-NIKON JAPAN (50X). ....	78
FIGURA 36- POROSIDAD DEL ÁNODO (A LA IZQUIERDA) Y EL CÁTODO (A LA DERECHA) DEL ACERO 420 MC, DESPUÉS DEL TRATAMIENTO DE DECAPADO CON $HCl \approx 1M$ Y $HNO_3$ AL 5% - NIKON JAPAN (50X). ....	79
FIGURA 37- POROSIDAD DEL ÁNODO (A LA IZQUIERDA) Y EL CÁTODO (A LA DERECHA), DE LOS ELECTRODOS DECAPADOS DE ACERO 420 MC, AL FINAL DE LOS ENSAYOS DE ELECTRÓLISIS- NIKON JAPAN (50X). ....	79
FIGURA 38-BURBUJAS PEGADAS EN LA SUPERFICIE DEL ELECTRODO 304 L. ....	83

## **Capítulo 1**

### **1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presentan los objetivos y motivaciones de este proyecto, así como una introducción teórica del hidrógeno como vector energético. En el estado de arte se exponen algunos estudios en el campo de la electrolisis como medio para obtener Gas de Brown y finalmente se presenta la organización del trabajo.

#### **1.1 Objetivos y motivaciones**

Los objetivos que se plantearon en este proyecto, fueron en primer lugar, diseñar, proyectar y construir una célula de electrolisis para producir gas de Brown.

Logrado este paso, conseguir producir gas, utilizando como electrolito hidróxido de potasio (KOH) y desarrollar un sistema para medir el volumen de gas de Brown.

Comparar el caudal de gas producido entre dos materiales, uno de referencia de estudios anteriores, acero inoxidable 304 L, y otro del que no existen referencias, acero inoxidable 420 MC.

Determinar la influencia de un tratamiento de decapado en los electrodos, con ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), en el aumento o disminución de la producción de gas de Brown.

Determinar el consumo de electrolito durante el proceso de electrolisis.

Establecer la influencia del aumento o disminución de la intensidad de corriente en la producción de gas de Brown.

Determinar la influencia de la porosidad y la rugosidad del metal en la producción de gas de Brown.

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

La motivación para emprender este proyecto, fue el hecho de comenzar desde cero y abrir un nuevo campo de investigación en un área poco desenvuelta actualmente y de gran importancia para el futuro de las energías limpias. Como ingeniera mecánica este proyecto represento un gran desafío, por un lado, porque envuelve una componente química de gran importancia, y por otro por que fue un auténtico reto adaptar los materiales disponibles en los laboratorios para el perfecto funcionamiento de la célula de electrolisis.

A continuación, se realiza una breve descripción de la estructura y organización de este proyecto.

### **1.2 El hidrógeno como vector energético.**

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo. Representado por el símbolo H pertenece al grupo de los no metales, es un recurso renovable que en condiciones normales de presión y temperatura es un gas diatómico ( $H_2$ ) incoloro, inodoro, insípido [1, 2] y altamente inflamable, difícil de licuar y solidificar. Reacciona fácilmente con el oxígeno y al quemarse produce solo agua, lo que lo hace candidato para ser usado como combustible limpio [3]. Una de las propiedades más importantes a destacar sobre del hidrógeno, es que es el segundo elemento de la tabla periódica que dispone de los puntos de fusión y ebullición más bajos después del helio [4]. Por debajo del punto de fusión ( $-259.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se encuentra en estado sólido y por debajo del punto de ebullición ( $-252.7^{\circ}\text{ C}$ ) se encuentra en estado líquido, siendo estas temperaturas criogénicas por que se encuentran por debajo de  $-73^{\circ}\text{C}$ . A  $25^{\circ}\text{C}$  y 1 atm de presión se encuentra en estado gaseoso y presenta una constante de difusión (D) de  $0.61\text{ cm}^2/\text{s}$  [3, 4].

En la Tabla 1 se presentan las propiedades atómicas y físicas del hidrogeno, en condiciones normales ( $0^{\circ}\text{C}$  y 1 atm):

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 1- Propiedades atómicas y físicas del Hidrógeno (adaptado de [4]).

Propiedades atómicas del Hidrógeno		Propiedades físicas del Hidrógeno	
Masa atómica	<b>1,00797 Da</b>	Estado	Gaseoso
	<b>1,007825 Da (H<sup>1</sup>)</b>	Estructura cristalina	Hexagonal
Volumen atómico	14,4 cm <sup>3</sup> /mol	Color	Incoloro
Radio atómico	0,79 Å	Densidad	0,08988 kg/m <sup>3</sup>
Radio medio	<b>25 pm</b>	Conductividad térmica	0,1815 W/(m.K)
Radio covalente	0,32 Å	Calor específico	14304 J/(kg.K)
Radio de Van Der Waals	120 pm	Punto de fusión	14,025 K
Radio iónico	2,08 o 154 pm	Entalpía de fusión	0,05868 kJ/mol
Número de oxidación (óxido)	1 (Anfótero)	Punto de ebullición	20,268 K
Potencial 1° de ionización	13,65	Entalpía de vaporización	0,44936 kJ/mol
Electronegatividad	2,1 (Pauling)	Presión de vapor	209 Pa a 23K
Potencial de ionización	1,312 kJ/mol	Velocidad del sonido	1270 m/s
Afinidad electrónica	73 kJ/mol		

En la historia, Henry Cavendish quien descubrió el gas hidrógeno y lo reconoció como un elemento químico, producía gas hidrogeno que aislaba para su estudio, combinando metales con ácidos fuertes. Observó que el hidrógeno reaccionaba con el oxígeno formando agua, descubriendo así la composición del agua. Con la llegada del físico experimental Michael Faraday (1791-1867), empiezan las experiencias sobre la división de la molécula de agua para obtener gas hidrógeno. Considerado fundador del electromagnetismo y la electroquímica, muchas de las hipótesis y teorías de Faraday se desarrollaron en base a sus antecesores Henry Cavendish (1731-1810), Martinus Van Marum (1750-1837) y Antoine Lavoisier (1743-1794) [4]. En el año 1783 Jacques Alexandre Charles utilizó por primera vez el hidrógeno en la construcción del "Charliere", un globo aerostático que alcanzó los tres metros de altura. Este prototipo fue mejorado añadiendo un dispositivo que producía hidrógeno a partir de limaduras de hierro y ácido sulfúrico [5]. Posteriormente Jean Joseph Etienne Lenoir, en el año 1860, construyó el primer carro impulsado con hidrógeno utilizando el principio de electrólisis y una batería [4]. Luego, entre los años 1893 y 1842, William Robert Grove descubrió las propiedades energéticas del hidrógeno y creó una batería a gas, cuyo funcionamiento se basaba en el proceso inverso de la electrólisis, combinando hidrógeno y oxígeno para obtener como resultado agua y electricidad [5]. Fue solo en el año 1922 que Yull Brown, descubrió a través de la electrólisis el llamado "Gas de Brown" que corresponde a la mezcla de gases oxígeno e hidrogeno. Uno de los mayores usos de este gas es en la soldadura autógena de agua, gas de Brown (OHH) y oxígeno. Posteriormente en 1962 William A. Rhodes, patentó el primer dispositivo cuyo funcionamiento se basaba en la electrólisis y producía gas de Brown. Luego en 1982 Charles T. Weber patentó una célula

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

electrolítica para la generación de un combustible gaseoso para motores de combustión interna [4].

En el presente, el hidrogeno es considerado el principal vector energético del futuro inmediato debido al aumento en los costes de energía, causados por la incertidumbre en lo que se refiere a la disponibilidad futura de reservas de petróleo y a las preocupaciones sobre el cambio climático y el calentamiento global, producido por las emisiones de dióxido de carbono asociadas al uso de combustibles fósiles, particularmente carbón [6, 7]. Estos problemas han generado un interés por buscar nuevas alternativas como fuentes de energía ya que el petróleo, el carbón y el gas natural, no representan un recurso infinito y con el tiempo el planeta se quedara sin combustibles fósiles, o el costo para obtenerlos será demasiado elevado [5, 8, 9]. Es aquí, donde el programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020, contribuye con una financiación de 6339 millones de euros, para crear un sistema sostenible de transporte apoyando la intensificación de la investigación a la hora de explorar nuevas soluciones asociadas a la utilización del hidrógeno como vector energético alternativo [10]. A pesar de que el costo del hidrógeno es mayor que la mayoría de los combustibles fósiles [6], es el único combustible que se puede producir de un recurso renovable tan abundante como el agua y cuyo producto de combustión es únicamente agua [11, 12]. De este modo no puede ser destruido, al contrario que los hidrocarburos, sino que simplemente cambia de estado. Es por esto que se considera al hidrogeno como un vector energético del futuro y su uso, es una buena opción para reducir las emisiones ambientales [10].

Por su poder calorífico, el hidrógeno, puede ser usado en estado puro en un proceso de combustión ya sea en un quemador o en un motor de combustión interna [3, 13, 14]. La energía liberada por el hidrógeno es mayor en comparación, a la energía liberada por otros combustibles, como se muestra en la Tabla 2 [15].

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 2- Comparación entre la liberación de energía de distintos combustibles (adaptado de [15]).

Energía liberada de distintos combustibles	
Sustancia	(kJ/g)
Hidrógeno	141,9
Gas metano	55,5
Gasolina	47,5
Diesel	44,8
Petróleo crudo	43
Carbón	29
Metanol	20
Papel	20
Biomasa seca	16
Madera seca al aire	15

Pudiendo ser utilizado como complemento de distintos combustibles fósiles, ya sea enriqueciendo la gasolina de un motor de combustión interna, o acoplado a una línea de gas natural que se envía a quemadores, consiguiendo ahorrar del 5 al 40% de los hidrocarburos. De modo que dependiendo del uso que le vaya a dar, se debe considerar el método de obtención, almacenamiento y distribución, ya que influye la pureza del hidrógeno y las condiciones de operación de los sistemas [3, 16, 17].

El conjunto único de propiedades del hidrógeno reflejado en Tabla 1 y en la Tabla 2, hacen que sea un combustible potencialmente excelente para cumplir con los cada vez más estrictos controles ambientales de las emisiones de escape de los vehículos de combustión, incluyendo la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero. A pesar de que el hidrógeno se puede almacenar como un gas comprimido, la viabilidad de este como combustible sigue siendo críticamente dependiente de la solución de problemas económicos y técnicos como son la producción, almacenamiento, portabilidad, transporte y pureza. A pesar de estas limitaciones, el hidrógeno como un recurso de combustible renovable se puede producir a través del gasto de energía [11, 12], lo que permite encontrar nuevas aplicaciones en distintas direcciones como pueden ser, los diferentes tipos de pilas de combustible que se utilizan en la producción de energía implementada en autobuses impulsados por hidrógeno. Alemania, por ejemplo, fabrica y vende submarinos con combustible de hidrógeno y algunas compañías, están experimentando en barcos de altamar impulsados por hidrógeno y pilas de hidrogeno. Estos grandes cambios en la sociedad han llevado a los productores de hidrógeno y algunas compañías petroleras a establecer estaciones de combustible de hidrógeno en todo Japón y Alemania. Las principales compañías de automóviles planean comenzar a vender coches alimentados con hidrógeno en Alemania, Japón y en aquellos lugares donde existan suficientes estaciones de abastecimiento de hidrógeno ya que este, presenta mayor eficiencia

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

(al ser quemado) que la gasolina [6]. El grupo BMW ya ha aplicado hidrógeno en su vehículo de pasajeros de motor V12 de 6L, el hidrogeno se almacena en estado líquido en un tanque aislado de 170 L de volumen, que permite un rango de conducción de casi 300 km. También Ford Motor Company introdujo la tecnología H2RV que combina un motor de combustión interna sobrealimentado con combustible de hidrógeno, con un sistema de transmisión híbrido modular patentado por Ford (MHTS) que permite un rango de conducción de 200 km, siendo la economía de combustible de 72 km por 1 kg de hidrógeno [18]. Si bien hasta el año 2025 el hidrógeno será aun caro, porque no habrá suficientes infraestructuras para su repostaje, BMW espera que la fabricación a gran escala de la tecnología de pila de combustible llegue a partir de 2026 [19]. La gran ventaja que presenta un vehículo accionado por célula de combustible en comparación con un coche eléctrico, es que tiene una mayor autonomía y el tiempo de recarga es significativamente menor. Por ejemplo, el Serie 5 Gran Turismo de célula de combustible de BMW, tiene una autonomía de 500 kilómetros sin necesidad de repostar, lo que representa más del triple de 160 kilómetros que alcanza el primer coche eléctrico de BMW, el i3. Además, las baterías del i3 demoran al menos cinco horas en recargar, en comparación con los cinco minutos que se tarda en llenar el tanque de hidrógeno del Serie 5 Gran Turismo [20].

Se conocen alrededor de 90 métodos de síntesis que producen hidrógeno, estos pueden dividirse en cuatro grandes categorías: biológica, química, electroquímica y tecnologías térmicas. Algunos de estos métodos pueden generar impactos negativos sobre el medio ambiente, como la liberación de gases de efecto invernadero, pero si el hidrógeno se obtiene a partir de energías renovables como la energía eólica o la energía solar, este se convierte en el combustible más limpio, ya que no genera ningún tipo de emisión si se lo emplea luego en una pila de combustible.

Dentro del método de síntesis electroquímica se encuentra, entre otros, la electrolisis del agua que representa el 4% de la producción mundial de hidrógeno y que comparado con otros métodos, tiene la ventaja de producir hidrógeno extremadamente puro (> 99.9%) [6, 21, 22].

La electrolisis del agua, a pesar de ser una tecnología sencilla, no tiene gran aceptación debido a que los costes de producción son elevados porque requiere de un gran consumo de energía eléctrica que es de 4.5-5 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> en la mayoría de los electrolizadores industriales [7]. De modo que si se pretende utilizar el hidrógeno como vector energético, se debe convertir la producción electroquímica en una opción atractiva y para ello, se debe mejorar en eficiencia energética, seguridad, durabilidad, operabilidad, portabilidad además

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

de reducir los costes de operación, instalación y producción [6, 7]. Para tal efecto, se puede optar por el estudio de los componentes del sistema para mejorar la eficiencia del mismo (electrolizadores, materiales para electrodos, separadores, entre otros) y de esta forma reducir el consumo de energía, o bien estudiar alternativas para que la electricidad utilizada sea lo más barata posible [7]. La Universidad de California en Los Ángeles (UCLA) ha logrado dar un gran paso en el proceso de electrolisis, creado un dispositivo que utiliza energía solar para crear y almacenar energía de manera económica y eficiente, que podría usarse para producir combustible de hidrógeno para coches ecológicos. El dispositivo produce hidrógeno utilizando níquel, hierro y elementos de cobalto que son más abundantes y menos costosos que el platino y otros metales preciosos que actualmente se utilizan para producir combustible de hidrógeno. El aparato consta de tres electrodos: uno positivo, otro negativo y un tercer electrodo que actúa como un supercondensador que puede almacenar energía, o funcionar como un dispositivo para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno, a través del electrólisis del agua. Estos tres electrodos están conectados a una célula solar que actúa como fuente de energía del dispositivo. La energía eléctrica recolectada por la célula solar puede ser almacenada de dos formas: electroquímicamente en el supercondensador o químicamente en hidrógeno. Si bien este dispositivo cabe en la palma de una mano, es posible hacer versiones más grandes porque los componentes son baratos. Teniendo en cuenta que actualmente el 95% de la producción mundial de hidrógeno proviene de la conversión de combustibles fósiles como el gas natural en hidrógeno, un proceso que libera grandes cantidades de dióxido de carbono en el aire, el dispositivo de UCLA, representa un gran avance porque produce combustible de hidrógeno de una manera ecológica [23].

### **1.3 Estado de Arte**

A continuación, se presentan algunos estudios realizados en el campo de la electrolisis del agua. En ellos se refleja la investigación de nuevos componentes, electrolizadores, materiales para electrodos, separadores, distancia entre electrodos, electrolitos entre otros, para mejorar la eficiencia del proceso.

El-Kassaby, et al, [17], estudiaron el efecto de la adición de gas hidroxilo HHO en el rendimiento y las emisiones de un motor de gasolina. Para tal fin se fabricó un celda de gas HHO donde los parámetros optimizados fueron el número de placas neutras, la distancia entre ellas y el tipo y cantidad de dos catalizadores, uno de hidróxido de potasio (KOH) y otro de

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

hidróxido de sodio (NaOH). Se utilizaron vasos de acero inoxidable como electrodos. En total 16 electrodos de 16 x 20 x 0.2 cm de espesor, separados entre ellos por juntas de goma a una distancia de 1 mm. La fuente de energía eléctrica es la batería del motor Skoda Felicia 1.3 GLXi 1.3L (1289 cm<sup>3</sup>) y la concentración de electrolitos utilizados fueron 4, 6, 8, y 10 g/L de KOH y 3, 4, 6, 8, y 10 g/L de NaOH. Concluyeron que la producción máxima del gas HHO de la celda era de 18 L / h usando 2 placas neutras con una distancia de 1 mm y 6 g /L de KOH. Los resultados también mostraron un incremento del 10% en la eficiencia térmica del motor de gasolina, 34% de reducción en el consumo de combustible, 18% de reducción de CO, 14% de reducción de HC y 15% de reducción de NO<sub>x</sub>.

Lavorante, et al, [7], estudiaron la influencia de la microestructura superficial del acero inoxidable 316L como material de electrodos en electrolizadores bipolares alcalinos. Se utilizó como electrolito una solución de KOH 35% con una gota de dodecilsulfonato de sodio y se sometió a los electrodos a un tratamiento de decapado con HCl 1 mol/L. Se analizó el comportamiento de la corriente (I) en función del potencial (V) de los electrodos y se determinaron parámetros como la densidad de corriente, resistencia y resistividad. Fueron usadas técnicas metalográficas de selección, corte y desbaste para la preparación de las muestras de acero inoxidable 316L, que fueron analizadas mediante microscopio y microscopio electrónico de barrido (MEB). Concluyeron que el tratamiento de decapado con HCl 1 mol/L mejora la densidad de corriente en un 10% y disminuye la resistencia del sistema en aproximadamente un 13%.

También Lavorante, et al, [24], investigaron el comportamiento de los electrodos de acero inoxidable 316L después de someterlos a un tratamiento de decapado con HCl 1mol/L. Utilizo como electrolito una disolución de KOH 35% con una gota de dodecilsulfato de sodio. Analizo el comportamiento corriente (I) – potencial (V) de los electrodos y si es conveniente aplicar el decapado en uno de los electrodos (ánodo o cátodo) o en ambos. Fueron determinados la densidad de corriente, resistencia, resistividad y conductividad del sistema. Concluyo que la aplicación del tratamiento al cátodo, mejora en un 19% la densidad de corriente y disminuye la resistencia del sistema en un 20% con respecto a los electrodos en estado original. Sin embargo, la mejoría no es tan significativa cuando ambos electrodos o solamente el ánodo son decapados con HCl.

Lavorante, et al, [25], estudiaron el efecto de la presencia de un diafragma de acrílico, la distancia entre electrodos, el uso de electrodos de acero inoxidable 316L con y sin tratamiento con HCl 1 mol/L, agitación y la adición de surfactante al electrolito. Utilizo como electrolito

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

una disolución de KOH 35% con una gota de dodecilsulfato de sodio. Para el estudio de la microestructura de los electrodos, se utilizó un microscopio Scanning Electron Microscope Philip SEM 515. Se analizaron distancias entre electrodos de 6, 10, 14, 18 y 22 mm, respectivamente. Se concluyó que una mayor distancia entre electrodos aumenta la resistencia siendo 6 mm, la distancia que proporcionó mejores resultados ya que en distancias cortas la corriente fluctúa. La presencia de un diafragma físico aumenta la resistencia cuando la distancia entre electrodos es inferior a 5 mm, aumentando la densidad de corriente. No se observó evidencia de resistencia de burbujas en las distancias propuestas. El decapado químico disminuyó la profundidad de la rugosidad característica del material y generó porosidades donde se retenían las burbujas formadas. La agitación mejoró el rendimiento en electrodos decapados porque favorece la eliminación de burbujas.

Santos, et al, [6], estudian los fundamentos electroquímicos de la electrolisis alcalina del agua, donde refieren que los electrolitos que mejoran la conductividad de la celda son el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), siendo de preferencia la utilización del KOH. Se analizó la capa límite en la superficie del electrodo, la fase del electrodo, la fase del electrolito, el separador, las resistencias eléctricas del circuito y las restricciones termodinámicas. Se identificaron las resistencias que obstaculizan la eficiencia del electrolisis que incluye resistencias generadas por burbujas de gas, energía de activación de las reacciones electroquímicas, transferencia de masa y resistencias eléctricas en el circuito. Se concluyó que la resistencia de las burbujas se puede minimizar modificando el electrodo y o usando aditivos electrolíticos. El sobrepotencial de la reacción se puede ajustar mediante la elección del material del electrodo y las resistencias de transferencia de masa se pueden reducir a través de la circulación de electrolito.

Kjartansdóttir, et al, [26], estudiaron un nuevo tipo de electrodos, producidos mediante depósito de vapor de plasma (DVP) de aluminio sobre un sustrato de níquel, duraderos y eficientes para la electrolisis alcalina del agua a gran escala. Se utilizó como electrolito una disolución de KOH 1 mol/L. El grosor del revestimiento de aluminio varió de 20 a 40  $\mu\text{m}$ , posteriormente el Al DVP pasó por un proceso de difusión termoquímica y lixiviación alcalina de aluminio para facilitar la formación de la aleación DVP Al/Ni. La caracterización estructural y composición de los electrodos, se realizó con el microscopio electrónico de barrido (MEB), JEOL JSM 5900 para investigaciones de corte transversal, espectroscopía de rayos-X para el análisis elemental y microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 200 ESEM FEG, para la caracterización de la estructura superficial y la morfología de los

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

electrodos de DVP Al/Ni. La actividad catalítica de los electrodos desarrollados se evaluó mediante curvas de polarización potenciodinámicas. A través de mediciones electroquímicas en estado estacionario y voltametría cíclica, se estudió la actividad electrocatalítica de los electrodos. Las pruebas de durabilidad se realizaron en una pila de electrólisis a escala industrial que contenía 30% de KOH. Es importante destacar que los electrodos mostraron un comportamiento estable bajo operación intermitente durante más de 9000 h. Se concluye que los electrodos son altamente eficientes para la reacción de evolución del hidrógeno, sin embargo, es más eficiente para la reacción de evolución del oxígeno. El inconveniente de usar níquel en el ánodo, es la formación de una capa de óxido conductor eléctrico que cubre los nanoporos de la estructura y no contribuye a la superficie real del electrodo. De modo que debe ser optimizado el material del ánodo.

Chakik, et al, [27], estudió la producción de hidrógeno por electrólisis alcalina del agua utilizando aleaciones de Zinc como material para el cátodo. Utilizó como electrolito una disolución de NaOH con diferentes concentraciones y una fuente de alimentación PowerFlex serie Aim-TTi CPX. Se analizó experimentalmente el efecto de la composición del electrodo, la concentración de electrolito, el voltaje y el amperaje aplicado al volumen de hidrógeno producido. Se concluye que los cátodos elaborados por (Zn95% Cr5%) y (Zn90% Cr10%) (% en masa) producen más hidrógeno gaseoso que otras aleaciones. La producción de hidrógeno aumenta con el aumento de la corriente de entrada y para una intensidad de corriente constante, cuando el voltaje aumenta, la producción de gas también aumenta. Respecto a la concentración de electrolito, el aumento de esta, incrementa la producción de gas hidrogeno. Se comprobó también, que la composición de los electrodos influye en la producción de gas hidrógeno.

Dobó, et al, [28], estudio la relación entre la fluctuación de la corriente eléctrica y la eficiencia de la electrólisis alcalina del agua. Se aplicaron formas de onda cuadradas, triangulares, sinusoidales y de dientes de sierra, con densidades de corriente de hasta 5000 A/m<sup>2</sup> y varias configuraciones de frecuencia y amplitud. Se utilizaron electrodos de acero inoxidable 304 de 1.5 mm de espesor y una distancia entre electrodos de 5 mm. Siendo el electrolito una disolución de KOH 25% en masa. La presión de la celda se midió con un sensor de presión MPX5010DP, la fuente de alimentación contiene un amplificador (op-amp) tipo OPA549 que es controlado por un dispositivo (NI USB-6259) cuya operación se puede automatizar con el software LabVIEW. A través del dispositivo se midió el voltaje, corriente y presión de la celda. Este sistema puede generar formas de onda con frecuencias de hasta

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

50kHz, corrientes hasta  $\pm 8$  A y tensiones de hasta  $\pm 10$ V. Es importante resaltar que los resultados muestran que la corriente DC no constante aplicada a la celda, causa pérdida de eficiencia en comparación con la condición constante de DC con la misma densidad de corriente. Además, la pérdida de eficiencia puede verse influenciada por tres parámetros de la corriente eléctrica fluctuante: factor de ondulación, frecuencia y densidad de corriente media. El tipo de forma de onda no tiene impacto en la eficiencia.

Dobó, et al, [29], también estudiaron como afecta la fluctuación continua del voltaje de la fuente de alimentación en la eficiencia y la producción de gas de la celda de electrólisis alcalina del agua. Aplicaron ondas sinusoidales de amplitud, frecuencia y desplazamiento creciente. La frecuencia varió de 1 a 5000 Hz, la amplitud de señal cambio de 0 a 2 V y el valor de la señal de salida DC, vario entre 1.4 V y 2.8 V. La fuente de alimentación utilizada genera cualquier tipo de señal de forma de onda de hasta 50 kHz y  $\pm 10$ V con una corriente máxima de 8 A. Se concluyó que el uso de una fuente de alimentación fluctuante mejora el caudal de H<sub>2</sub> y el consumo de energía pero disminuye la eficiencia general de la celda electrolítica. Se demostró que frecuencias más bajas y amplitudes más altas mejoran el rendimiento de la producción de gas.

Zeng, et al, [30], examino los avances en la tecnología de la producción de hidrógeno por electrólisis del agua. Estudio las resistencias eléctricas, las resistencias de reacción y las resistencias de transporte con el fin de lograr una mayor eficiencia de la célula electrolítica, sabiendo que las resistencias eléctricas y de transporte generan calor, de acuerdo con la ley de Joule, y esa pérdida de energía, también conocida como pérdida óhmica, provoca la ineficiencia del sistema. Se estableció una relación cuantitativa entre los componentes de voltaje de la celda y la densidad de corriente, que vincula todas las resistencias y manifiesta la importancia de las resistencias de reacción y las resistencias a las burbujas. Se destaca el importante efecto de las burbujas de gas formadas en la superficie del electrodo y la necesidad de minimizar la resistencia al transporte de iones. Se concluye del análisis termodinámico y cinético que una serie de resistencias obstaculizan la eficiencia del proceso de electrolisis. Estas resistencias incluyen resistencias debido a burbujas, energía de activación de reacción transferencia iónica y resistencias eléctricas en el circuito. Se sugiere reducir la resistencia de las burbujas utilizando aditivos electrolíticos y modificando los electrodos. Optimizar el sobrepotencial de reacción mediante la selección y preparación del material del electrodo. En relación a las resistencias de transporte, resistencias de burbujas y resistencia a los electrolitos, estas pueden reducirse mejorando el transporte de masas, como la eliminación de

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

burbujas mediante la circulación del electrolito. Se concluye también que la electrólisis alcalina del agua sigue siendo el mejor medio para la producción de hidrógeno, pero es necesario desarrollar electrolizadores que reduzcan significativamente la resistencia a la reacción electroquímica, aditivos electrolíticos para facilitar la transferencia de electrones y la transferencia iónica, gestionar las resistencias a las burbujas de gas y reducir la tensión superficial del electrodo realizando modificaciones del perfil de la superficie del mismo y revestimientos superficiales.

Mohammadi, et al, [31], estudió la inyección directa de la mezcla de hidrógeno con el aire de admisión de un motor. Para ello se inyectó el hidrógeno directamente en el cilindro de un motor y se utilizó el método de mezcla interna con una relación de compresión 11.5: 1, en un motor de prueba de un solo cilindro con un inyector de gas a alta presión. Analizó los efectos del tiempo de inyección y el tiempo de chispa en el rendimiento del motor y la emisión de  $\text{NO}_x$  bajo una amplia gama de cargas del motor. Concluyó que la inyección directa de hidrógeno en el cilindro evita el encendido prematuro de la mezcla, y que la alta eficiencia térmica y la potencia de salida máxima se pueden lograr mediante la inyección de hidrógeno durante la carrera de compresión tardía. Además, mediante la sincronización de la inyección para cada carga del motor, se puede reducir la emisión de  $\text{NO}_x$  en las condiciones de alto rendimiento del motor.

A continuación, se presentan los objetivos y motivaciones del proyecto de investigación a realizar en esta tesis.

### **1.4 Organización del trabajo**

En el capítulo 2, se hace una introducción teórica donde se explican los fundamentos del electrolisis del agua, la electrolisis alcalina y sus diferentes diseños de electrolizadores, así como los tipos de celdas electroquímicas que existen. Se desarrollan los fundamentos del gas de Brown, las Leyes de Faraday de la electrólisis, el proceso termodinámico que se lleva a cabo en la celda electrolítica, así como los factores que intervienen en el proceso de electrolisis que influyen directamente en la efectividad de la célula electrolítica y en la producción de gas.

En el capítulo 3, se desarrollan los ensayos experimentales donde se presentan los diversos prototipos de células de electrolisis realizados en este proyecto, hasta conseguir el prototipo final. Se presenta el montaje experimental, así como los parámetros utilizados para

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

la producción de gas de Brown, y cada uno de los pasos seguidos durante los ensayos de electrólisis.

En el capítulo 4, se presentan los datos y resultados obtenidos durante los ensayos de electrólisis, las titulaciones realizadas para averiguar el consumo de KOH al final de los ensayos, resultados del estudio de rugosidad y las imágenes del estudio de porosidad.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales.

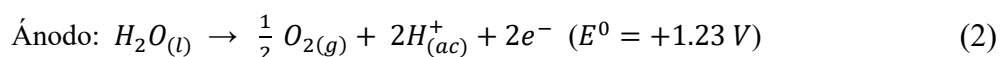
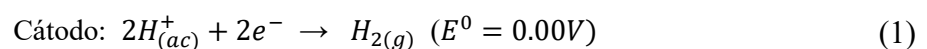
## Capítulo 2

### 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La celda de combustible utilizada en este proyecto, funciona bajo el principio de la electrólisis alcalina del agua. A continuación, se desarrolla el proceso de electrólisis junto con las reacciones electroquímicas que en él se producen.

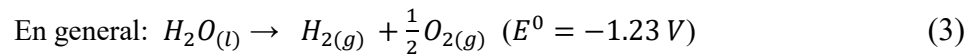
#### 2.1 Fundamentos del electrolisis del agua

La electrólisis del agua consiste en hacer pasar una corriente eléctrica entre electrodos inertes sumergidos en una disolución acuosa, con el objetivo de romper la molécula de agua en sus elementos constitutivos: hidrógeno y oxígeno. Los electrodos deben ser de un material resistente a la corrosión con una adecuada integridad estructural. Deben tener buena conductividad eléctrica y exhibir buenas propiedades como catalizadores [32]. Por otro lado, el agua es un aislante eléctrico y para transformarla en un medio conductor, se debe añadir un electrolito que permita la conductividad iónica entre los electrodos [32, 33]. El electrolito debe conservar sus propiedades físico-químicas y no debe reaccionar químicamente con los electrodos [32]. De modo que cuando se aplica una corriente eléctrica al par de electrodos, el electrodo cargado negativamente (Cátodo) atrae los iones de carga positiva y el electrodo cargado positivamente (Ánodo) atrae los iones de carga negativa [34]. En general, durante la electrólisis del agua los iones de hidrógeno se mueven hacia el cátodo mientras que los iones de hidróxido se mueven hacia el ánodo [6]. Si la electrólisis del agua se produce en una solución ácida o neutra de electrolito, el proceso que se desencadena en la superficie del electrodo es descrito por las ecuaciones (1) y (2) :

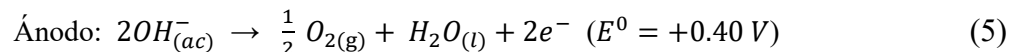
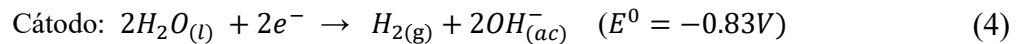


## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

La suma de estas dos ecuaciones conduce a la reacción general de electrolisis del agua, como se ve en la ecuación (3).



Si la electrolisis del agua se produce en una solución alcalina de electrolito, el proceso que se desencadena en la superficie del electrodo es descrito por las ecuaciones (4) y (5):



La suma de las ecuaciones (4) y (5) conduce a la reacción general de electrolisis del agua, descrita en la ecuación (3) [6, 35].

En la Figura 1 se representa un esquema básico de funcionamiento de un proceso de electrólisis en el cual se utiliza una solución alcalina como electrolito [6].

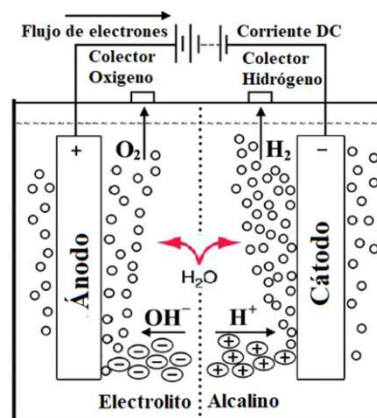


Figura 1- Esquema básico de funcionamiento de la electrólisis del agua (adaptado de [6]).

A pesar de que la separación electrolítica del agua fue descubierta en ambiente ácido, las plantas industriales prefieren trabajar en medios alcalinos por que se utilizan materiales más baratos, respecto a la electrolisis en ambiente ácido [36]. También se puede decir que la electrolisis alcalina es la más empleada en la actualidad, porque se utiliza para obtener hidrógeno a gran escala, a diferencia de la electrólisis en medio ácido, que solo se emplea a baja escala [37].

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

Los dos tipos de electrolizadores que son ampliamente estudiados y desarrollados son de electrólisis alcalina y electrolizadores de membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane, PEM). A continuación se describen cada uno de estos electrolizadores [36, 37].

### 2.1.1 *Electrólisis alcalina*

El electrolito que normalmente se usa en una electrólisis alcalina, es una solución de hidróxido de potasio (KOH) al 20-30% o una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) [2, 33, 36]. De modo que los electrodos que se utilicen deben ser resistentes a la corrosión, poseer propiedades catalíticas y una excelente conductividad eléctrica. Este tipo de electrolizadores operan generalmente entre 70-100°C y de 1-30 bar de presión [36]. Las reacciones catódicas y anódicas que se producen se describen en las ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

De la observación de las ecuaciones (4) y (5) podemos decir que el agua es introducida en el cátodo donde se separa en  $H_2$  y iones  $OH^-$  que son transportados a través del electrolito acuoso hasta el ánodo, para formar  $O_2$  [38].

Existen dos diseños diferentes para electrolizadores alcalinos:

Los electrolizadores monopolares, en donde los electrodos positivos y negativos están conectados directamente a los terminales opuestos de la fuente de alimentación de CC, dando un número de celdas individuales en paralelo. El voltaje total aplicado a la celda de electrólisis, es el mismo que el aplicado a los pares individuales de electrodos en la celda. Los electrolizadores bipolares, solo tienen dos electrodos finales conectados a la fuente de alimentación de CC. De modo que, una celda unitaria está formada por dos electrodos adyacentes y estas células unitarias están conectadas eléctricamente, a través de una solución de electrolito como medio conductor. El voltaje total de la celda es la suma de los voltajes de las celdas individuales.

Debido a la diferencia en la disposición de los electrodos en la configuración monopolar y bipolar, las reacciones en los electrodos, así como los potenciales de operación son diferentes. En la configuración monopolar, la reacción electroquímica de evolución ya sea, del oxígeno o hidrógeno, se produce en ambas caras de cada electrodo. Sin embargo, en la configuración bipolar, lo que ocurre es que en una cara del electrodo se produce la reacción de evolución del oxígeno y en la otra cara, del mismo electrodo, se produce la reacción de

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

evolución del hidrógeno. Es decir que un único electrodo actúa como ánodo de un lado y como cátodo del otro.

Los valores típicos de voltaje para una configuración monopolar es de 2.2 V y en una configuración bipolar es de  $2.2 \times (n - 1)$  V, siendo la cantidad de electrodos. En la Figura 2 se representa un esquema básico de una configuración monopolar y bipolar.

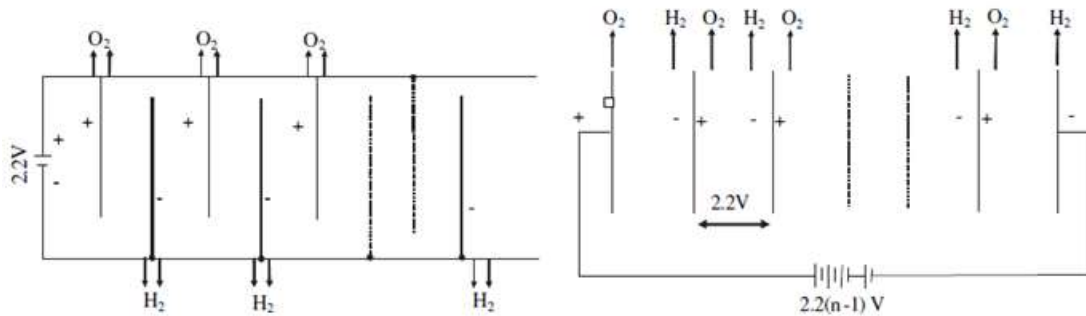


Figura 2- Configuración monopolar (a la izquierda) y bipolar (a la derecha) de una celda de electrólisis (adaptado de [30]).

A pesar de que la configuración monopolar es simple, fácil de fabricar y mantener, tiene el inconveniente de presentar altas corrientes eléctricas a bajos voltajes, causando grandes pérdidas óhmicas. La configuración bipolar reduce las pérdidas óhmicas en los conectores del circuito eléctrico, pero exige una mayor precisión en el diseño y fabricación de la célula electrolítica para evitar fugas de gas o del propio electrolito. En la configuración de la celda, es muy importante el espacio entre los electrodos ya que es la distancia que los iones tienen que recorrer en el electrolito. Cuanto menor es esta distancia, menor es la resistencia para el transporte iónico. Sin embargo, si este espacio es demasiado pequeño, puede provocar chispas eléctricas y el consecuente peligro de explosión. De modo que tiene que ser identificado el espacio óptimo entre los electrodos. Otro factor de configuración es el flujo de electrolito ya que este determina el transporte de masa en el electrolito. La circulación del electrolito fuerza el movimiento de las especies en forma de convección. A altas densidades de corriente, las reacciones electroquímicas están limitadas por la transferencia de masa del electrolito. Si se introducen promotores de turbulencia para provocar la agitación rápida del electrolito, se erradican las diferencias de concentración y se mejoran los iones y la transferencia de masa en el electrolito [30].

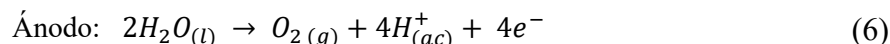
## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

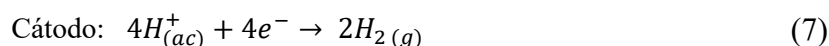
### 2.1.2 *Electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM)*

La electrólisis se puede realizar alternativamente con una membrana de electrolito polimérico tipo “Membrana de Intercambio Protónico” (Proton Exchange Membrane - PEM) siendo ésta utilizada, para el intercambio de protones entre electrodos [39].

El agua ingresa directamente sobre el ánodo del equipo, donde se produce la separación de la molécula de agua en oxígeno y protones como se ve en la ecuación (6):



Los protones viajan a través de la membrana hacia el cátodo donde se produce hidrógeno, como se puede observar en la ecuación (7):



Este sistema de electrólisis permite operar con altas densidades de energía, mayor eficiencia energética y mayor tasa de producción de gas, sin embargo, las desventajas son la baja durabilidad, el uso de un electrolito corrosivo y el alto costo de los componentes como son la costosa membrana de polímero, los electrodos porosos y el colector de corriente [30, 36]. Probablemente sería el mejor método de producción electroquímica de hidrógeno, sino fuera por los altos costos de producción de la membrana polimérica y la necesidad de utilizar metales nobles en los electrodos [36, 39].

## 2.2 Tipo de celdas electroquímicas

La electroquímica, es una rama de la química que estudia las reacciones que envuelven transferencia de electrones para la transformación de energía química en energía eléctrica y viceversa. Cuando la reacción química es espontánea genera corriente eléctrica (principio de funcionamiento de una pila), ahora cuando la reacción química no es espontánea es posible forzar las reacciones químicas para que ocurran a través de la aplicación de una corriente eléctrica (principio de funcionamiento de la electrólisis).

Las celdas electroquímicas, son dispositivos que están formados por dos electrodos sumergidos en un medio electrolítico, unidos por un puente salino y conectado a una fuente de energía (cuando la reacción química no es espontánea). De modo que en el ánodo se producen las reacciones de oxidación y en el cátodo se producen las reacciones de reducción. Los

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

electrolitos pueden ser sustancias ácidas, bases o sales, que al ser disueltas en agua son conductores de la electricidad. La fuente de energía, mide la diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo siendo esta lectura, el valor del voltaje aplicado o producido por la celda.

Existen dos tipos de celdas electroquímicas y en ambas tiene lugar la transformación de una forma de energía en otra, es decir, las celdas voltaicas o galvánicas transforman la energía química liberada de forma espontánea en energía eléctrica y en las celdas electrolíticas ocurren reacciones químicas a través de la introducción de energía eléctrica [34]. Dentro de las celdas electrolíticas, existen las celdas electrolíticas secas y las celdas electrolíticas húmedas. En las celdas electrolíticas secas, el electrolito fluye por el interior de la celda y los electrodos están separados por juntas que evitan que el electrolito se escape de la celda hacia las conexiones eléctricas. Una gran ventaja de este diseño, es que utiliza menos electrolito por lo que el volumen y el peso de la celda es menor. Las celdas electrolíticas húmedas se diferencian de las secas en que los electrodos están totalmente inmersos en el electrolito. El inconveniente de este diseño, es que no se puede disipar el calor producido durante el proceso de electrolisis, lo que da lugar a la formación de vapor de agua que se mezcla con el gas  $\text{O}_2$  disminuyendo el rendimiento de la celda. Ambas celdas pueden utilizar electrodos de acero inoxidable [5, 34]. En la Figura 3 se observa claramente las diferencias entre ambos diseños.

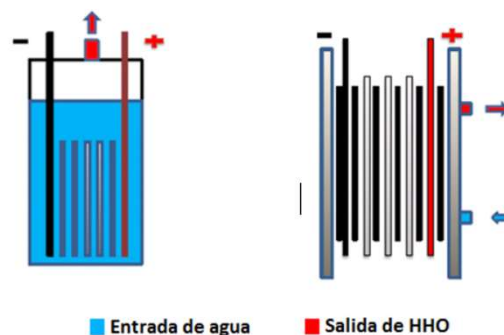


Figura 3- Representación de una celda electrolítica húmeda (a la izquierda) y seca (a la derecha) [5].

Como en este proyecto se desarrolla un proceso de electrólisis alcalina del agua, en donde se libera gas de Brown ( $\text{O}_2$ ), a continuación, se describen las características de esta mezcla gaseosa así como su aplicación en motores de combustión interna.

### **2.3 Gas de Brown**

Yull Brown, quien patentó en el año 1974 la producción de gas OHH o gas de Brown, desarrolló un método para electrolizar el agua en una mezcla estequiométrica exacta, obteniendo como resultado una sustancia altamente inflamable pero no combustible utilizada en procesos de soldadura [5]. El gas de Brown es una mezcla gaseosa de  $H_2$  y  $O_2$  en una relación molar 2:1, la misma proporción del agua, que se obtiene mediante el método electroquímico de electrolisis. Es un gas incoloro, inodoro, no tóxico y más ligero que el aire. Se quema en el vacío y bajo el agua siendo su único producto de combustión el agua. Es importante remarcar que a diferencia de otros combustibles, incluido el hidrógeno, que necesitan oxígeno atmosférico para su combustión, el gas de Brown no necesita oxígeno para la combustión ya que el propio gas contiene el oxígeno necesario para ello [40]. El gas OHH no puede explotar, de hecho, realiza implosión al encender. El oxihidrógeno (OHH) puede quemarse a 273,15 K de temperatura y 1 atmósfera de presión, cuando está compuesto por una relación del gas de aproximadamente 4% y 94% de hidrógeno en volumen. La temperatura de la llama del gas al aire libre es extremadamente baja, de unos 130 a 150 °C, lo que permite pasar la mano por ella sin quemarse. Sin embargo, dependiendo del tipo de sustancia a la que se aplica la llama ésta alcanza temperaturas muy elevadas. Por ejemplo, si la llama se aplica a metales o cerámicas alcanza temperaturas de aproximadamente 6000° C siendo capaz de fundir cerámicas y vaporizar el tungsteno. Esta es una característica única del gas de Brown, propia de una combustión interactiva [34, 40].

En los últimos años se han desarrollado dispositivos que generan gas de Brown para ser utilizados como combustible complementario de la gasolina, mejorando su rendimiento y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Es decir, es posible llevar un sistema a bordo del vehículo que a través de la electrolisis del agua, produzca gas HHO que es enviado de forma directa al sistema de admisión del motor, ayudando a que la combustión sea más completa y limpia [5].

Las relaciones cuantitativas que se producen durante la electrólisis fueron descubiertas por Michael Faraday y se describen en el siguiente punto.

## 2.4 Leyes de Faraday

En la década de 1830, el científico Inglés Michael Faraday estudio las reacciones que se producen en los electrodos de celdas electrolíticas, formulando dos leyes que explican el fenómeno.

La 1ª Ley de Faraday de la electrólisis establece que: La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante el proceso de electrólisis, es directamente proporcional a la carga eléctrica transferida a este electrodo, medida en coulomb.

La 2ª Ley de Faraday de la electrólisis establece que: para una determinada cantidad de electricidad (carga eléctrica), la masa depositada de una especie química en un electrodo, es directamente proporcional al peso equivalente del elemento. Siendo el peso equivalente de una sustancia, la masa molar de la misma dividido por un entero que depende de la reacción que tiene lugar en el material [2].

Las leyes de Faraday se resumen en la ecuación (8):

$$m = \frac{Q}{F} \times \frac{M}{z} \quad (8)$$

Siendo:

$m$  = masa del elemento depositado en un electrodo (g).

$Q$  = carga o cantidad de electricidad (C).

$F$  = constante de Faraday equivalente a 96500 (C.mol<sup>-1</sup>).

$M$  = masa molar del ión (g/mol).

$z$  = número de electrones asociados a la reducción/ oxidación de 1 mol de sustancia.

Siendo  $Q$  la carga eléctrica expresada en la ecuación (9):

$$Q = I \times t \quad (9)$$

Donde:

$I$  = intensidad de corriente en amperios, (A).

$t$  = tiempo (s).

La ecuación (8) puede escribirse como la ecuación (10):

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

$$m = \frac{I \times t}{F} \times \frac{M}{z} \quad (10)$$

Si en vez de calcular la masa del elemento depositado en el electrodo se quiere calcular en número de moles de sustancia liberada, se recurre a la ecuación (11):

$$n = \frac{I \times t}{F} \times \frac{1}{z} \quad (11)$$

Siendo n, el cociente entre la masa del elemento depositado en el electrodo y el peso molecular del ión, ecuación (12):

$$n = \frac{m}{M} \quad (12)$$

Donde:

$n$ = la cantidad de sustancia liberada en moles, (mol).

Si la corriente varía con el tiempo, la carga es calculada a través de la ecuación (13):

$$Q = \int_0^t I(t)dt \quad (13)$$

Donde:

$Q$ = carga o cantidad de electricidad (C).

$I$ = intensidad de corriente en amperios, (A).

$t$ = tiempo (s).

A continuación, se describen los principios termodinámicos que se desarrollan durante el proceso de electrolisis del agua [2, 34].

### 2.5 Termodinámica

El proceso que se lleva a cabo en la celda electrolítica puede ser descrito mediante los principios de la termodinámica [37].

La energía teórica requerida para la producción de hidrógeno cuando una celda electrolítica opera a temperatura y presión constante, está determinada por el cambio de entalpía del proceso  $\Delta H(T)$ , a una temperatura T (en K) siendo  $\Delta H(T)$  la suma de la

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

demanda de energía térmica,  $Q_e(T)$ , y la demanda de energía eléctrica,  $\Delta G(T)$  como se ve en la ecuación (14):

$$\Delta H(T) = Q_e(T) + \Delta G(T) \quad (14)$$

Donde  $Q_e(T) = T\Delta S(T)$  siendo T la temperatura (en K) del proceso,  $\Delta S(T)$  el cambio de la entropía y  $\Delta G(T)$  la variación de la energía libre de Gibbs de la reacción [32, 37].

De modo que la ecuación (14) puede ser escrita como la ecuación (15):

$$\Delta H(T) = T\Delta S(T) + \Delta G(T) \quad (15)$$

La energía eléctrica que se suministra en una celda electrolítica, proviene de la diferencia de potencial creado entre los dos electrodos inmersos en el electrolito. En la interface electrodo-electrolito, es donde se produce la conversión de la energía eléctrica en energía química a través de las reacciones de transferencia de carga. La diferencia de potencial U aplicada entre los electrodos se puede utilizar para realizar un trabajo eléctrico máximo nFU, donde F es la constante de Faraday (96500 C/mol) y n es el número de moles de electrones transferidos durante la reacción. El potencial reversible  $E_{rev}$ , es el potencial mínimo necesario para que se desarrolle la reacción de electrólisis del agua.

La cantidad máxima de trabajo útil que se puede obtener del sistema viene dado por la ecuación (16):

$$\Delta G = -nFE_{rev} \quad (16)$$

Entonces,  $E_{rev}$  corresponde con el trabajo reversible y recibe el nombre de potencial reversible termodinámico que en condiciones estándar se denota por el superíndice “°”. Se entiende por condiciones estándar, 1 atmósfera de presión y 25 °C de temperatura, siendo las concentraciones de reactivos y productos de 1 mol/L para líquidos y 1 bar para gases. Por tanto la reacción global de electrólisis del agua, presenta una variación de energía libre de Gibbs igual a 237.2 kJ/mol [6, 37]. De modo que el potencial reversible termodinámico en condiciones estándar puede ser calculado a través de la ecuación (17):

$$E_{rev}^0 = \frac{-\Delta G^0}{nF} = -1.229 \text{ V} \quad (17)$$

El potencial reversible,  $E_{rev}$  también puede ser calculado como la diferencia entre el potencial de reducción de la semi-reacción de reducción del cátodo y el potencial de

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

reducción de la semi-reacción de oxidación del ánodo. Como se puede ver en la ecuación (18):

$$E_{rev} = E_{RED,Cátodo} - E_{RED,Ánodo} \quad (18)$$

En condiciones estándar, encontramos que el valor del  $E_{RED,cátodo}^0 = 0.000 V$  y  $E_{RED,ánodo}^0 = +1.229 V$  confirmando el resultado obtenido de la ecuación (17). Es importante comprender que de acuerdo con la ecuación (16), la reacción al potencial  $E_{rev}$  es endotérmica de modo que en condiciones isotérmicas, la energía calorífica  $Q_e$  es absorbida del medio que se encuentra alrededor del sistema, para poder producir el incremento de entropía asociado a la disociación del agua. Sin embargo, si el valor absoluto del potencial de operación de la celda electrolítica  $E_{celda}$ , es superior al  $|E_{rev}|$  el calor necesario para el incremento de la entropía se genera por las pérdidas que se producen en la celda [37].

Cuando a una celda de electrólisis se le suministra una energía igual a la entalpía de disociación del agua ( $\Delta H^0 = 285.84 kJ/mol$ ) el sistema ni absorbe ni emite calor. Para estas condiciones adiabáticas el voltaje recibe el nombre de potencial termoneutral,  $E_{tn}$  que en condiciones estándar puede ser calculado a través de la ecuación (19):

$$E_{tn}^0 = -\frac{\Delta H^0}{nF} = -1.482 V \quad (19)$$

El potencial termoneutral, es un límite superior termodinámico para la electrolisis que no se debe superar. Si el potencial de la celda es igual al termoneutral, el proceso de electrólisis genera calor suficiente para compensar el término  $T\Delta S$ . De modo que, la reacción de electrolisis se desarrolla adecuadamente y es una reacción endotérmica, cuando el voltaje aplicado a la celda es menor que el termoneutral (en valor absoluto). Sin embargo, si la reacción que se produce es exotérmica, el voltaje de la celda es mayor que el termoneutral (en valor absoluto).

Por otro lado, para que la reacción de electrolisis se desarrolle a una velocidad adecuada, se debe aplicar un sobrepotencial  $\eta$ , para conseguir superar las barreras energéticas de activación, la formación de burbujas y los gradientes de concentración. Además, es esencial un aporte adicional de energía para la conducción de los procesos de migración iónica y para vencer la resistencia del circuito eléctrico y la membrana de intercambio iónico. Esta energía extra causa una caída de potencial en la celda,  $IR_{celda}$  (siendo  $I$  la intensidad de

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

corriente a través de la celda y  $R_{celda}$  la suma de las resistencias eléctricas y de transporte de la celda). El potencial de la celda,  $E_{celda}$ , puede ser calculado a través de la ecuación (20):

$$E_{celda} = E_{rev} + \sum \eta + IR_{celda} \quad (20)$$

El potencial de la celda, en la electrolisis del agua industrial, ronda valores de 1.8-2.0 V a densidades de corriente que van de 1000 a 3000 A m<sup>-2</sup> [6, 37].

El sobrepotencial total, es la suma de los sobrepotenciales de las reacciones de evolución de hidrógeno y oxígeno, la formación de burbujas y la diferencia de concentración de electrolito. Si estas dos últimas se desprecian, la suma del sobrepotencial se puede calcular a través de la ecuación (21):

$$\sum \eta = |\eta_{ánodo}(j)| + |\eta_{cátodo}(j)| \quad (21)$$

Donde  $j$  es la densidad de corriente a la cual opera la celda de electrolisis.

Las pérdidas óhmicas y los sobrepotenciales aumentan con la densidad de corriente, afectando la eficiencia del proceso por la degradación de la energía eléctrica en calor.

En función de la temperatura y presión de trabajo de la celda de electrolisis, se escoge el potencial de operación. Por ejemplo, el potencial reversible,  $E_{rev}$ , disminuye con el aumento de temperatura según la relación de la ecuación (22):

$$|E_{rev,T}|(T/K) = 1.518 - 1.542 \times 10^{-3}T + 9.523 \times 10^{-5}T \ln T + 9.84010^{-8}T^2 \quad (22)$$

Además, a elevadas temperaturas, los sobrepotenciales disminuyen considerablemente debido al aumento de la conductividad del electrolito y al incremento de la actividad de los electrodos. La reducción de los sobrepotenciales y del potencial reversible con la temperatura, permite trabajar a potenciales de celda menores y por tanto, mejorar la eficiencia de la electrolisis, disminuyendo el consumo energético [37].

Recurriendo nuevamente a la ecuación (15) tenemos que, la electrolisis es un proceso endotérmico ya que  $\Delta H > 0$  y es una reacción química no espontánea por que  $\Delta G > 0$ . Si el valor de  $\Delta H < 0$  y  $\Delta G < 0$  entonces tenemos un proceso exotérmico y espontáneo dando lugar a una célula de combustión. Si se pretende conocer el mínimo voltaje necesario para que se produzca la electrolisis, se calcula el voltaje reversible,  $V_{rev}$ , de la celda. Este puede ser expresado como una función de  $\Delta G$  a través de la ecuación (23):

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{zF} \quad (23)$$

Siendo  $z$  el número de moles electrónicos transferidos por moles de hidrógeno ( $z = 2$ ) y  $F$  la constante de Faraday que representa la carga en una mol de electrones (96500 C/mol). Cuando la energía térmica  $T\Delta S$  se suministra a través de la electricidad, el mínimo voltaje necesario para que se produzca la electrolisis se conoce como voltaje neutro térmico  $V_{tn}$ . Si el proceso es ideal, el  $V_{tn}$  es igual al voltaje de entalpia  $V_{\Delta H}$  ya que la energía total requerida es igual al cambio de entalpia  $\Delta H$ . En este caso, tanto  $V_{\Delta H}$  como  $V_{tn}$  pueden ser obtenidos mediante la ecuación (24):

$$\frac{\Delta H}{zF} V_{tn} = V_{\Delta H} \quad (\text{Proceso ideal}) \quad (24)$$

Cuando el proceso electrolítico es real, ocurre que  $V_{tn} > V_{\Delta H}$  debido al consumo adicional de energía eléctrica y térmica, causado por las irreversibilidades termodinámicas que están relacionadas principalmente con el vapor de agua que se mezcla con los flujos de hidrógeno y oxígeno, las temperaturas y presiones más bajas con respecto a las teóricas, y el hecho de que existen pérdidas térmicas por convección y radiación debido a que el proceso en realidad no es adiabático.

Sustituyendo en las ecuaciones (23) y (16) se obtienen los voltajes reversibles  $V_{rev}^0 = 1.229 V$  y neutro-térmicos  $V_{tn}^0 = 1.481 V$  de una celda electrolítica en condiciones estándar ( $\Delta G^0 = 237.21 kJ/mol$ ,  $\Delta S^0 = 0.1631 KJ/mol$  y  $\Delta H^0 = 285.84 KJ/mol$ ). Sin embargo, la presión y la temperatura influyen en los  $V_{rev}$  y  $V_{tn}$  y en el consumo de energía del proceso de electrolisis [32].

Respecto a la eficiencia del proceso de electrolisis del agua, existen varias formas de expresarla. Una de ellas, da la proporción de voltaje efectivo usado para dividir el agua, del voltaje total aplicado a la célula,  $E_{célula}$ . Como se puede observar en la ecuación (25):

$$\%_{\text{Eficiencia,voltaje}} = \frac{E_{RED,Cátodo} - E_{RED,Ánodo}}{E_{célula}} \times 100 \quad (25)$$

En términos de eficiencia térmica, la eficiencia del proceso se calcula como el cociente entre el contenido energético del hidrogeno, es decir la energía que se recupera de la combinación de hidrogeno y oxígeno para producir agua, y la energía eléctrica suministrada al electrolizador como se puede ver en la ecuación (26) [6, 37, 41]:

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

$$\varepsilon = \frac{E_{tn}}{E_{celda}} \quad (26)$$

Idealmente, una celda que opera a  $E_{tn}$  puede producir hidrogeno con una eficiencia térmica del 100%. La energía adicional necesaria para que se produzca la reacción no debe ser necesariamente energía eléctrica, sino que basta con un voltaje tan bajo como el proporcionado por  $|E_{rev}|$  que puede emplearse en la electrolisis del agua, siempre y cuando el sistema absorba calor de sus alrededores. De modo que, cuando el voltaje de operación es  $E_{rev}$ , la eficiencia se encuentra sobre 120% y la operación se llama alotérmica. El hidrogeno producido en estas condiciones, tiene un contenido energético un 20% mayor que el aporte de energía eléctrica empleado para su obtención. Cuando la operación es autotérmica, el potencial de la celda es igual al potencial termoneutral,  $E_{celda} = E_{tn}$ , y el calor generado dentro de la celda debido a las perdidas, suministra la energía adicional necesaria para conducir la reacción de electrolisis del agua. Normalmente, la eficiencia que se consigue durante el proceso de electrolisis varía entre el 50 y el 90%. Para lograr altas eficiencias y altas velocidades de producción de hidrógeno, las celdas deben operar a bajos voltajes y altas densidades de corriente.

Cuando se considera el efecto de la temperatura el cálculo de la eficiencia se realiza utilizando el poder calorífico superior,  $E_{HHV}$ , (High Heating Value), que corresponde al contenido calorífico del producto de gas seco con respecto al agua líquida a 25°C como se muestra en la ecuación (27):

$$\varepsilon = \frac{E_{HHV}}{E_{celda}} \times 100 \quad (27)$$

Donde el potencial,  $E_{HHV}$ , puede calcularse a través de la ecuación (28):

$$E_{HHV} = E_{tn} - \frac{(H(T) - H(25^{\circ}C))_{H_2O(l)}}{nF} \quad (28)$$

Siendo la expresión  $(H(T) - H(25^{\circ}C))_{H_2O(l)}$  la diferencia de entalpía de formación del agua líquida a la temperatura T y 25°C, respectivamente. La dependencia del  $E_{HHV}$  con la temperatura a 1 atmósfera de presión viene dada por la ecuación (29):

$$|E_{HHV,T}^0|(T/K) = 1.415 + 2.205 \times 10^{-4}T + 1.0 \times 10^{-8}T^2 \quad (29)$$

Observándose que  $|E_{HHV,T}^0|$  aumenta ligeramente con la temperatura [37].

## **2.6 Factores que intervienen en el proceso de electrólisis**

Existen una serie de factores que intervienen en el proceso de electrólisis que influyen directamente en la efectividad de la célula electrolítica y en la producción de gas. A continuación, se enumeran y describen cada uno de estos factores.

### *2.6.1 Electrodo*

Los electrodos son pieza de gran importancia en la célula electrolítica. Se debe hacer una buena elección del material a utilizar y para ello, existen una serie de criterios a analizar como la estabilidad electroquímica, área superficial activa grande, buena conductividad eléctrica, bajo nivel de sobrepotencial para el hidrógeno, buena actividad electrocatalítica y alta resistencia a la corrosión y oxidación y los costes del material [2, 42]. Si los electrodos son de acero inoxidable, los que mejores resultados dan son el acero inoxidable 317 L, 316 L y 302 L yendo del de mayor costo al de menor respectivamente [2].

Como el ánodo es el encargado de recolectar el oxígeno, después de la separación de la molécula de agua, es en este electrodo donde se puede presentar corrosión disminuyendo la eficiencia del sistema completo [43]. Los materiales que normalmente se utilizan como ánodo son: el níquel, porque tiene gran durabilidad bajo condiciones alcalinas, aleaciones de níquel o cobalto [43-45], óxidos con diferentes características estructurales como espinela ( $\text{Co}_3\text{O}_4$  y  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$ ), óxido de tipo perovskita ( $\text{LaCoO}_3$ ,  $\text{LaNiO}_3$  y  $\text{LaCo}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}_3$ ) y ferrita entre otros, compuestos orgánicos metálico y materiales aislados [43, 45].

El cátodo por otra parte, también debe ser de materiales especiales que normalmente contienen níquel y cobalto como componentes principales, para disminuir el sobrepotencial que aparece cuando reacciona con el hidrógeno [43, 44]. De modo que el material de construcción del cátodo debe ser capaz de reducir drásticamente el sobrepotencial del hidrógeno y aumentar la evolución del hidrógeno. Las aleaciones estudiadas para la reacción de evolución del hidrógeno en soluciones alcalinas de baja temperatura, son el níquel y algunas de sus aleaciones, siendo estos considerados los materiales de electrodo más activos. Los estudios realizados en acero inoxidable demostraron que el acero 316 es el que presenta mejor comportamiento electrocatalítico debido a su alto contenido en níquel [42].

### 2.6.2 *Distancia entre electrodos*

En sistemas sin agitación que utilizan electrodos de Ni-Cr-Fe y densidades de corriente entre 0.1 y 0.5 A/cm<sup>2</sup>, se observa que un aumento en la distancia entre electrodos disminuye el rendimiento del sistema como consecuencia de un aumento en la resistencia eléctrica. De modo que para distancias entre electrodos menores de 6 mm existen fluctuaciones constantes en la determinación de la corriente eléctrica. La agitación no mejora los resultados en distancias cortas donde la inestabilidad aún se observa [25].

### 2.6.3 *Electrolito*

Un electrolito es una sustancia que, disuelta en un determinado solvente, produce una solución con una conductividad eléctrica mayor que la conductividad del solvente. Si se considera como solvente el agua, algunos ejemplos de electrolitos son las sales (cloruro de sodio), ácidos (ácido sulfúrico) y bases (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) [46].

El agua que se utiliza para el electrolito debe ser agua destilada ya que esta, está libre de minerales o impurezas que puedan obstruir los electrodos e impedir el buen funcionamiento de la celda. Es muy importante que el agua esté exenta de cualquier tipo de contaminante ya que la presencia de estos, da lugar a la formación de gases que se mezclan con el oxihidrógeno (OHH), produciendo gases de naturaleza rara que pueden llegar a ser muy dañinos.

Como el agua destilada no conduce la electricidad, se debe añadir un electrolito. Idealmente el electrolito debería ser un catalizador para facilitar la electrólisis sin sufrir cambios o ser consumida en el proceso. Entonces se puede decir que productos como la sal (NaCl) o el bicarbonato de sosa, no son catalizadores por que, durante la electrólisis, ellos rompen sus enlaces y se combinan con el hidrogeno y el oxígeno formando gases tóxicos como el gas de cloro y monóxido de carbono. Este tipo de sustancias pueden provocar corrosión en los electrodos dañándolos muy rápidamente.

La mejor opción para utilizar como electrolito es el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH) que es un 20% más eficiente que el NaOH. Estos son buenos catalizadores y disminuyen significativamente los daños en el sistema. La utilización de estos catalizadores combinados con agua destilada da como resultado un baño de celda mucho más limpio, y una mezcla de oxihidrógeno más homogénea mejorando la eficiencia en la producción de gas [2].

#### 2.6.4 Voltaje aplicado

Cuando a una celda electrolítica se le suministra corriente directa (CD) para generar hidrógeno, el voltaje de la celda  $V_{cel}$  se incrementa con respecto al voltaje reversible  $V_{rev}$ . Esto se debe a las irreversibilidades de la celda como las corrientes parásitas y los sobrevoltajes que generan pérdidas de energía y eficiencia de la celda. En la ecuación (30) se expresa el voltaje de la celda  $V_{cel}$  como la suma del voltaje reversible y los voltajes adicionales existentes en la celda:

$$V_{cel} = V_{rev} + V_{ohm} + V_{act} + V_{con} \quad (30)$$

Donde  $V_{ohm}$  es el sobrevoltaje causado por las pérdidas óhmicas que son causadas por las resistencias de varios componentes de la celda al flujo de electrones, como pueden ser electrodos, interconectores, colectores de corriente, etc. El sobrevoltaje  $V_{ohm}$  es directamente proporcional a la corriente eléctrica aplicada a la celda y también es causado por las burbujas de gas, la oposición del electrolito al flujo de iones y el diafragma. El sobrevoltaje de activación  $V_{act}$  se debe a la cinética de las reacciones de los electrodos. La transferencia de carga entre los reactivos y los electrodos demanda energía y depende mucho de las propiedades catalíticas de los materiales de construcción de los electrodos. La reacción en el ánodo produce un sobrevoltaje de activación más alto que la reacción en el cátodo. Además  $V_{act}$  es no lineal y cambia logarítmicamente con respecto al flujo de corriente en la celda.

El sobrevoltaje de concentración  $V_{con}$ , es causado por procesos de transporte de masa (convección y difusión). Normalmente  $V_{con}$  es menor que  $V_{ohm}$  y que  $V_{act}$  en la electrolisis alcalina. El comportamiento electroquímico de la celda electrolítica viene dado por la curva característica I-V entre el voltaje de la celda  $V_{cel}$  y la corriente de la celda  $I_{cel}$ . La curva I-V es altamente dependiente de la temperatura del proceso, siendo que las variaciones de presión, no tienen efecto sobre la misma. Así para una corriente dada, los voltajes reversibles, óhmico y de activación decrecen con el aumento de la temperatura y con el voltaje de la celda. Es importante mencionar que en una curva I-V, la reacción de electrolisis no se lleva a cabo cuando el voltaje de la celda es menor que  $V_{rev}$  ya que la corriente en la celda se anula. Cuando el voltaje de la celda está entre  $V_{rev}$  y  $V_{tn}$  se debe añadir calor a la celda para que se produzca la electrolisis. Este contenido energético es igual al producto entre la diferencia  $V_{tn} - V_{cel}$  y la corriente de la celda  $I_{cel}$ . Cuando el voltaje de la celda es mayor que  $V_{tn}$ , el poder suministrado a la celda es siempre mayor que el mínimo requerido por el proceso ( $V_{tn} \times I_{cel}$ ) y entonces la electrolisis puede ocurrir [32].

### 2.6.5 *Caída de voltaje óhmico*

La caída de tensión óhmica es un factor importante en el alto consumo de energía que se produce en el proceso de electrólisis. La resistencia óhmica total  $\sum R$  de la electrólisis del agua puede calcularse según la ecuación (31):

$$\sum R = R_e + R_m + R_b + R_c \quad (31)$$

Donde  $R_e$  es la resistencia del electrolito,  $R_m$  es la resistencia de la membrana (es importante referir que

la celda de electrólisis creada en este trabajo no tiene membrana),  $R_b$  es la resistencia de las burbujas y  $R_c$  es la resistencia del circuito.  $R_m$  y  $R_c$  pueden ser minimizados a través de la optimización de los cables de conexión y el proceso de producción de la membrana. En una celda electrolítica, ambas resistencias son constantes.  $R_e$  está relacionada con la composición de la solución y la distancia del electrodo. El aumento de la concentración de sales conductivas como el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH) hacen que la resistencia del electrolito ( $R_e$ ) disminuya. En la electrólisis alcalina del agua, se trabaja normalmente con concentraciones de KOH y NaOH que van del 20%-30%, para evitar la corrosión de la celda y la destrucción de la membrana de intercambio protónico. Por otro lado la dispersión de las burbujas en el electrolito provocan una conductividad pobre y el aumento de  $R_e$ . La resistencia de las burbujas ( $R_b$ ) se produce cuando muchas burbujas cubren la superficie del electrodo y perturban el escudo del campo eléctrico [35].

### 2.6.6 *Factores que contribuyen a las pérdidas por sobrevoltaje*

En las reacciones electroquímicas los fenómenos cinéticos se producen en la superficie de los electrodos y es aquí donde existen puntos de triple contacto, por que concurren tres estados de agregación diferentes (sólido, líquido y gaseoso). Las reacciones que ocurren sobre estas superficies contribuyen a la generación de pérdidas irreversibles, llamadas de polarización, sobrevoltaje o sobretensión. Entre las distintas fuentes de estas pérdidas se encuentran:

- La concentración de sobrevoltaje, causada por procesos de difusión, porosidad de los materiales y gradientes de presión. La concentración de sobretensión, provoca cambios en los valores admisibles de permeabilidad de la membrana.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

- La influencia de la temperatura sobre los procesos de catálisis, también llamados “de activación catalítica”, donde un aumento en la temperatura provoca reacciones adversas y generan subproductos. El aumento de la temperatura favorece los procesos catalíticos reduciendo los sobrevoltajes pero al mismo tiempo acelerando la degradación de los materiales.
- La resistencia eléctrica, debido a la existencia de materiales de carácter resistivos en la celda electrolítica.
- La reacción de sobretensión, que se presenta al inicio del proceso de electrólisis, cuando se producen reacciones químicas simultáneas, que cambian las características de la interface electródica y las correspondientes condiciones de operación.

Todos estos factores contribuyen a las pérdidas por sobrevoltaje, lo que indica que existe una relación no lineal entre la corriente y la tensión aplicada. [47]:

### 2.6.7 Resistencia de los componentes en una celda de electrólisis

Algunas de las barreras o resistencias que se originan durante el proceso de electrólisis, son la energía de activación de las reacciones electroquímicas, resistencias eléctricas del circuito, disponibilidad de la superficie del electrodo debido a la parcial cobertura de las burbujas de gas y la resistencia a la transferencia iónica dentro de la solución electrolítica. La suma de todas las resistencias que se pueden encontrar durante un proceso de electrólisis, viene dado por la ecuación (32):

$$R_{Total} = R_{electric} + R_{anodo} + R_{catodo} + R_{Burb.H_2} + R_{Burb.O_2} + R_{iones} + R_{membr}. \quad (32)$$

Siendo  $R_{electric}$ , la resistencia del circuito eléctrico externo que incluye cables y conexiones en ambos electrodos. Luego tenemos  $R_{anodo}$ , que es la resistencia que se origina del sobrepotencial de la reacción de evolución del oxígeno en la superficie del ánodo y  $R_{catodo}$  la resistencia causada por el sobrepotencial de la reacción de evolución del hidrógeno en el cátodo.  $R_{Burb.O_2}$ , es la resistencia creada debido a la cobertura parcial del ánodo por burbujas de oxígeno que dificultan el contacto entre el ánodo y el electrolito.  $R_{Burb.H_2}$ , representa la resistencia generada por la obstrucción del cátodo debido a las burbujas de hidrógeno.  $R_{iones}$ , es la resistencia del electrolito y  $R_{membr}$ , es la resistencia de la membrana.

Estas resistencias pueden ser clasificadas en tres categorías:

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

Resistencias de reacción ( $R_{anodo} + R_{catodo}$ ), las reacciones en la superficie del cátodo y el ánodo, requieren de una energía de activación para la formación de hidrógeno y oxígeno los sobrepotenciales requeridos para superar dicha energía de activación generan resistencias a la reacción.

Resistencias de transporte ( $R_{Burb.H_2} + R_{Burb.O_2} + R_{iones} + R_{membr.}$ ), comprenden las resistencias físicas de las burbujas de gas que cubren la superficie del electrodo y en la solución de electrolito, y las resistencias a la transferencia iónica dentro del electrolito y en la membrana que se utiliza para separar los gases producidos.

Resistencias eléctricas ( $R_{electric}$ ), pueden ser calculadas a partir de la ley de Ohm. Tanto las resistencias eléctricas como las de transporte generan calor de acuerdo con la ley de Joule y los fenómenos de transporte. La energía que se pierde debido a estas resistencias se conoce como pérdida Óhmica. Para minimizar las resistencias de reacción se requiere de buenos electrocatalizadores que puedan disminuir los sobrepotenciales de los electrodos mientras que la minimización de las resistencias de transporte y las resistencias eléctricas dependen de una buena ingeniería electroquímica [6].

### 2.6.8 Factores que aumentan las pérdidas durante el proceso de electrólisis

Los factores que aumentan las pérdidas durante un proceso de electrólisis pueden ser examinados por el flujo de la corriente. Estos son:

- Resistencia al flujo de corriente a través de los electrodos metálicos.
- Resistencia al flujo de corriente por el electrolito.
- Resistencia al flujo de corriente entre el electrodo y el electrolito.

Estas pérdidas eléctricas producen calor, y el aumento de la temperatura del electrolito provoca consecuentemente la presencia de vapor de agua, la reducción del contenido de energía de salida y en casos extremos debilita o derrite el material del electrolizador. De modo que se deben reducir las pérdidas eléctricas al mínimo y tener siempre en cuenta la limitación de voltaje de Michael Faraday, que dice que ningún gas adicional será producido, si el voltaje a través de un cuerpo de electrolito fuera superior a 1.24 V [2].

### 2.6.9 Temperatura

Cuando un electrolizador comienza a trabajar la temperatura del mismo es baja y con el

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

tiempo, una serie de ineficiencias del proceso de electrolisis elevan la temperatura del electrolito [2]. El aumento de la temperatura puede desestabilizar la celda, acelerando el proceso de oxidación de los electrodos, provocando la obtención de compuestos totalmente diferentes a los requeridos y modificando la velocidad de reacción [34]. El aumento de la temperatura del electrolito provoca el aumento de la corriente que fluye por el electrolizador, que al mismo tiempo, calienta el electrolito aún más. Esto provoca que la tasa de producción de gas disminuya debido a la creación de vapor de agua [2].

### *2.6.10 Efecto de las burbujas de gas*

Durante la electrólisis del agua las burbujas de gas no pueden ser eliminadas rápidamente del sistema electrolítico, y cubren la superficie del electrodo o se dispersan en el electrolito provocando un sobrepotencial elevado y una gran caída de tensión óhmica, llamado, efecto burbuja. Este, es la raíz principal de los altos consumos de energía de la electrólisis del agua [35].

### *2.6.11 Tratamiento de decapado*

El tratamiento de decapado con ácido clorhídrico (HCl) tiene como objetivo mejorar la eficiencia de los electrodos aumentando su superficie útil. El HCl torna más rugosa la superficie del electrodo incrementando así el área expuesta del mismo. En consecuencia, las burbujas de gas recorren un camino más tortuoso, desprendiéndose más rápidamente de la superficie del electrodo y permitiendo el continuo desarrollo de la reacción para producir una mayor cantidad de gas. Según [7] el tratamiento de decapado con HCl 1mol/L mejora el desempeño de los electrodos de acero inoxidable 316 L y parámetros como la resistencia del sistema de 13 a 20% y la densidad de corriente de 10 a 19% [7, 24].

### *2.6.12 Agitación*

En sistemas donde uno o los dos electrodos fueron sometidos a un tratamiento de picado, la agitación mejora el rendimiento del sistema. El movimiento que se genera en la solución de electrolito permite remover las burbujas que quedan atrapadas en las cavidades de la superficie del electrodo. Cuanto más rápida sea la eliminación de las burbujas, antes se dispone de la superficie del electrodo para producir nuevas burbujas de gas [25].

## Capítulo 3

### 3 MATERIALES Y METODO

En este capítulo se presentan los diversos prototipos de células de electrolisis realizados hasta conseguir el prototipo final, así como los parámetros utilizados para la producción de gas de Brown.

Se trabajó con dos aceros inoxidable, uno de referencia de estudios ya realizados, acero 304L y otro diferente acero 420 MC, del que no se encontraron estudios anteriores en donde se utilizara este material como electrodo. La composición química de ambos materiales se puede ver en el Anexo O y en el Anexo P respectivamente. Será analizada la influencia de un tratamiento de decapado en los electrodos, así como el efecto del aumento o la disminución de la intensidad de corriente en la producción de gas de Brown.

Se establecen como parámetros fijos el tiempo (se mide de 10 en 10 minutos el flujo de gas), la concentración de electrolito ( $\text{KOH} \approx 1 \text{ mol/L}$ ), el volumen de KOH ( $V = 160 \text{ mL}$ ) y la distancia entre electrodos (15 mm).

#### 3.1 Diseño de la célula de electrolisis alcalina

La célula de electrolisis alcalina fue proyectada y producida en el ámbito de este trabajo. Los diseños acotados y de conjunto de la célula se encuentran en los Anexos A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L.

##### 3.1.1 Fabricación de la célula de electrolisis, materiales y reactivos

Para poder producir y medir el gas de Brown fue necesario proyectar y construir una célula de electrolisis nueva. Se realizaron cuatro prototipos diferentes antes de conseguir el definitivo. En todos ellos se presentaron diversos obstáculos que fueron resueltos hasta conseguir una célula que funcionara en condiciones adecuadas.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

En el primer prototipo se utilizó un frasco de vidrio con tapa metálica. Los orificios de la tapa se realizaron a medida utilizando un *Taladro Industrial FF1* del Laboratorio de Tecnología Mecánica, como se puede ver en la Figura 4.



Figura 4- Taladro industrial FF1 (a la izquierda) y perforación de la tapa de la célula de electrólisis (a la derecha).

El separador y soporte para los electrodos, que permite que estos estén a una distancia fija de 3 mm, se construyó a mano utilizando una barra de plástico roja que fue cortada con una sierra eléctrica *quantum S181* y lijada a mano. En la Figura 5 se observa el separador con las placas de los electrodos de acero 420MC, sujetos en una prensa.



Figura 5- Separador de plástico.

De modo que la célula de electrolisis consistía en dos electrodos sujetos en un separador de plástico a una distancia de 3 mm. Las pinzas de la fuente de alimentación *Topward DUAL-TRACKING DC POWER SUPPLY 6306D*, se introducían por los agujeros de la tapa y se conectaban a las placas de acero 420MC, como se puede ver en la Figura 6.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---



Figura 6- Primer prototipo de célula de electrólisis.

Las pinzas fueron selladas con pasta de acrílico para evitar fugas de gas. Para medir el gas de Brown se utilizó una probeta graduada invertida de 250 mL. Se utilizó como electrolito una solución de hidróxido de potasio (KOH) al 30% y después de un primer ensayo de electrólisis, se descartó el separador porque perdía coloración contaminando el KOH. Se diseñó un nuevo separador de acrílico transparente cortado a laser con el equipo *Portlaser X252*. Se taladraron dos agujeros para crear los canales donde se sujetan los electrodos y luego con distintas limas se limo hasta abrir el canal para introducir los electrodos, como se puede ver en la Figura 7.



Figura 7- Perforación del acrílico con el taladro industrial FF1 (a la izquierda) y limadura de los canales del separador de los electrodos (a la derecha).

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

De modo que el aspecto de la célula de electrólisis era el de la Figura 8.



Figura 8- Segundo prototipo de célula de electrólisis.

Este modelo se descartó porque la pasta de acrílico no era fácil de retirar y se convirtió en un modelo poco práctico. De modo que se diseñó un nuevo sistema en donde se cambió el recipiente de vidrio y los electrodos estaban atornillados a la tapa a una distancia de 3 mm, como se puede ver en la Figura 9.



Figura 9- Tercer prototipo de célula de electrólisis.

Para ello fue preciso soldar un tornillo M5 a la placa de acero 420 MC para luego poder ser atornillada a la tapa. En la base de los electrodos se coloca el separador de acrílico transparente, para evitar el contacto entre los electrodos y se aisló con parafilm las zonas de contacto del tornillo con la tapa. Para evitar fugas de gas, se aplicó pasta de acrílico en la zona de los electrodos, siendo el montaje del sistema de electrólisis el que se ve en la Figura 10.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

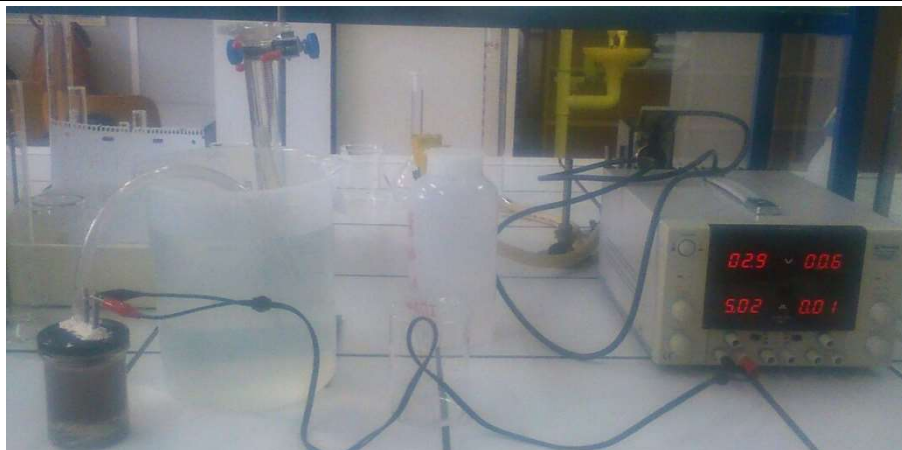


Figura 10-Montaje del sistema de electrólisis – tercer prototipo.

En este sistema se descartó la pasta de acrílico porque al pasar la corriente eléctrica por los electrodos, estos se calentaban y se derretía la pasta produciendo fugas de gas. Además, se descartó la tapa metálica debido al riesgo de cortocircuito y posible explosión del gas.

Entonces a partir de las experiencias anteriores, se diseñó y proyectó una nueva célula de electrólisis. Se utilizó el programa de diseño 3D *SolidWorks*, para crear una tapa y un separador nuevo usando como material de construcción acrílico transparente de 3 mm de espesor y una base de madera circular de 3 mm de espesor. La tapa y la base fueron cortadas con el láser modelo *Portlaser X252*. Para sellar la unión entre el frasco y la tapa, se cortó a medida una arandela utilizando como material la cámara de un neumático. La tapa se cierra mediante el ajuste de cuatro tornillos M4 con sus respectivas arandelas metálicas. Se sustituyó la pasta de acrílico que se colocaba alrededor de los electrodos, por cuatro arandelas cortadas a mano de la cámara del neumático. Estas arandelas sellan los orificios de paso de los electrodos impidiendo la fuga de gas. También se creó un nuevo sistema, para medir el gas de Brown, que consistía en un frasco de plástico graduado de 1L que se colocaba en posición invertida. El interior del frasco estaba lleno de agua de modo que cuando el gas entraba en el frasco, expulsaba el agua hacia el exterior siendo recogida y medida en una probeta graduada de 500 mL. También a partir de ahora se trabajó con una concentración de  $\text{KOH} \approx 1 \text{ mol/L}$  ya que en todos los ensayos anteriores se trabajó con KOH al 30%. El aspecto de la nueva célula de electrólisis se observa en la Figura 11.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---



Figura 11- Cuarto prototipo de célula de electrólisis (a la izquierda) y montaje del sistema (a la derecha).

Después de algunos ensayos se descartó el nuevo sistema de medición de gas porque no funcionaba bien y se volvió a utilizar una probeta graduada invertida para medir el gas producido en los ensayos de electrólisis. También se eliminó la arandela de la tapa porque se producían fugas de gas debido a una imperfección, propia de la construcción de la cámara. La tapa de acrílico de 3 mm se partía en las orejas donde se aprietan los tornillos, de modo que en el siguiente prototipo tanto la tapa como los separadores tendrán que ser rediseñados.

Finalmente, después de una larga serie de ensayos se definió la célula de electrólisis definitiva. Entretanto llegó el pedido de los electrodos de acero 304 L, de modo que la nueva célula de electrólisis ahora tendrá tres tapas, una para el acero 420 MC original y decapado, otra para el acero 304 L original y una tercera para el acero 304 L decapado. Se decidió usar dos tapas para el acero 304 L por que el desmontaje incluía retirar una capa de silicona colocada alrededor de los electrodos para evitar fugas de gas y era poco práctico y laborioso este proceso. Las nuevas tapas de la célula y los separadores se cortaron a laser usando material acrílico transparente de 5 mm de espesor. Se modificó la distancia entre electrodos a 15 mm para aumentar la seguridad durante los ensayos. En la Figura 12 se puede observar el conjunto que forma la tapa con los electrodos de acero 304 L de la célula de electrólisis.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

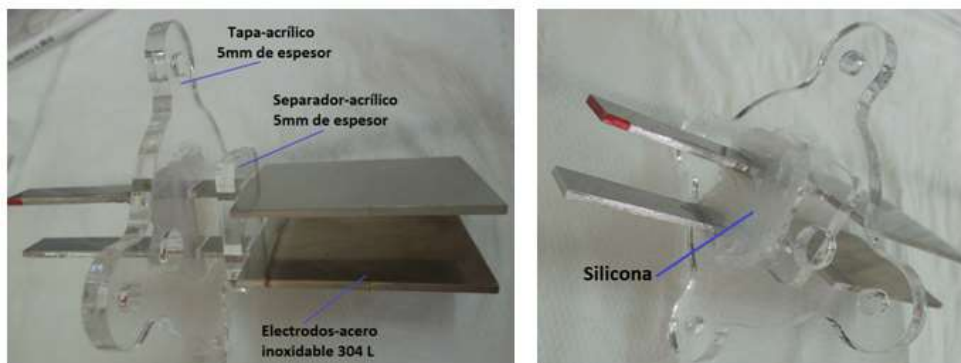


Figura 12- Conjunto tapa, separador y electrodo de acero 304 L.

Para evitar la fuga de gas por los orificios de entrada de los electrodos, se aplica silicona en los alrededores de los mismos.

La tapa se une al cuerpo de la célula, formado por un frasco cilíndrico de vidrio, mediante el apriete de cuatro roscas M4 y para sellar la unión y evitar cualquier fuga de gas, se coloca entre la tapa y el cuerpo una arandela de silicona, cortada a medida, de color amarillo. En la Figura 13 se observa el montaje de los componentes de la nueva célula electrolítica.

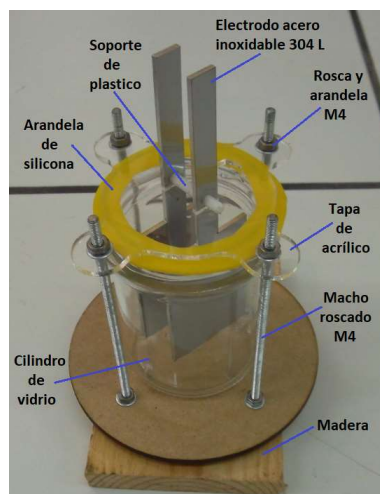


Figura 13- Quinto prototipo - componentes de la célula electrolítica.

En el caso de los electrodos de acero 420MC, estos fueron soldados a un tornillo M5 para poder conectar las pinzas de la fuente de alimentación. Cada electrodo se fija a la tapa mediante el apriete de dos roscas con sus respectivas arandelas metálicas, una en la parte exterior de la tapa y otra en la parte interior. Para evitar fugas de gas, en cada electrodo se

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

utilizan dos arandelas de silicona amarillas cortadas a medida. En la Figura 14 se observan los componentes de la tapa y el montaje final.

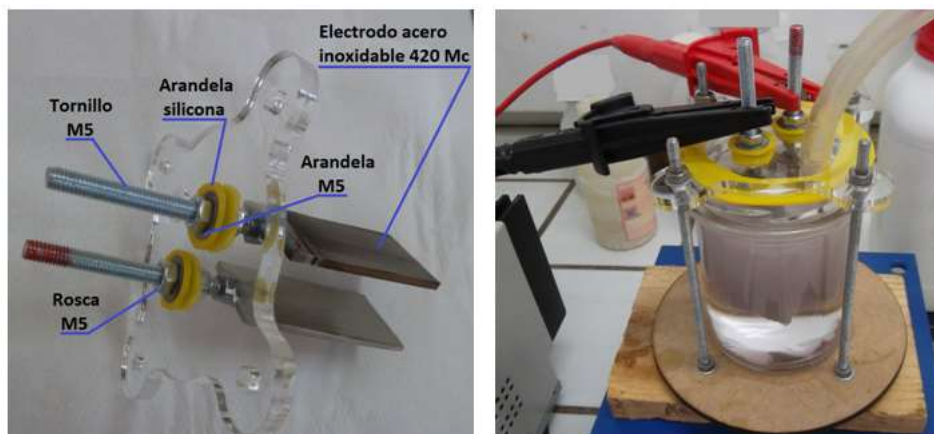


Figura 14- Sexto prototipo - conexión de los electrodos en la tapa (a la izquierda) y montaje final (a la derecha).

Para medir el gas de Brown producido durante el funcionamiento de la célula, se conecta mediante un tubo de PVC transparente la célula de electrólisis a una probeta graduada de 1000 mL invertida e inicialmente llena de agua. Este montaje se puede observar en la Figura 15.

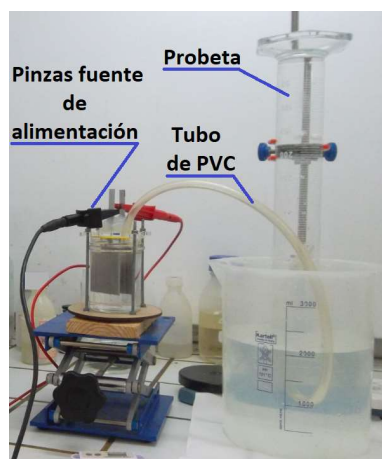


Figura 15- Conexión entre la célula de electrólisis y la probeta graduada.

Finalmente en la Figura 16, se presenta el montaje del sistema completo. A la izquierda está la fuente de alimentación *Topward DUAL-TRACKING DC POWER SUPPLY 6306D*, que proporciona el voltaje y la intensidad de corriente a la célula de electrólisis mediante dos pinzas de color rojo y negro. El gas producido es conducido mediante un tubo de PVC

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

transparente a la probeta invertida donde se mide el volumen de gas en un determinado tiempo.

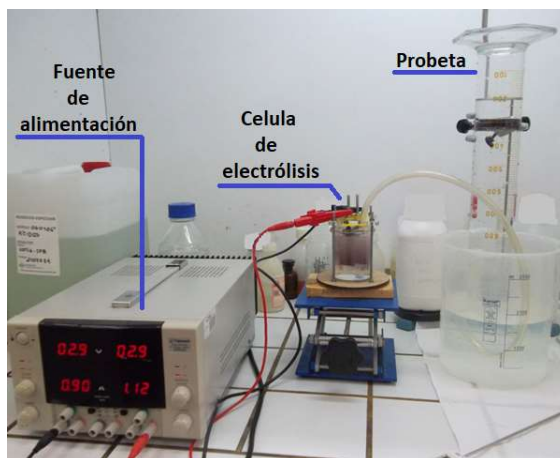


Figura 16- Componentes del sistema de electrólisis.

La solución de electrolito utilizada para la electrólisis alcalina es hidróxido de potasio (KOH) en una concentración próxima a 1 mol/L.

### 3.1.2 Producción de gas de Brown

Para conseguir producir gas de Brown fue preciso un conjunto de análisis previos como: determinar la concentración de electrolito (KOH) y establecer el volumen exacto en función de las dimensiones de la célula. Decidir las intensidades de corriente que se van a utilizar en los ensayos. Determinar la distancia entre electrodos que garanticen la producción de gas y la seguridad de los ensayos. Decidir el material de los electrodos a utilizar. Resolver si se va a realizar un tratamiento de decapado en los electrodos. Establecer un tiempo fijo para medir el volumen de gas en función de los materiales disponibles en el laboratorio de química. Todos estos parámetros tuvieron que ser estudiados mediante una serie de ensayos previos, para poder definir un guión de prácticas a seguir rigurosamente durante los ensayos de electrólisis.

De modo que durante el desarrollo experimental, se estudió la producción de gas de ambos materiales, acero inoxidable 304 L y acero inoxidable 420 MC, en estado original y después de ser sometidos a un tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1 \text{ mol/L}$  y  $\text{HNO}_3$  al 5%.

Para cada tipo de acero, en estado original y decapado, se realizaron tres ensayos de electrólisis con intensidades de corriente diferentes de 1, 2 y 3 A cada uno de estos ensayos

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

por duplicado. Se midió el volumen de gas producido para cada material, original y decapado, de 10 en 10 minutos.

Se realizó un estudio de rugosidad con un rugosímetro *Mitutoyo SJ-301*, donde fue medida la rugosidad de los aceros en estado original, antes y después, de los ensayos de electrólisis. En el caso de los ensayos con acero decapado, se evaluó el material en estado original, después del tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1\text{mol/L}$  y  $\text{HNO}_3$  al 5% y después de los ensayos de electrólisis. Se realizaron en total 6 medidas de rugosidad en cada electrodo. Una en la parte superior (1° medida), otra en la parte media (2° medida) y otra en la parte inferior (3° medida). Tres en una cara del electrodo y otras tres en la otra cara como se puede ver en la Figura 17.

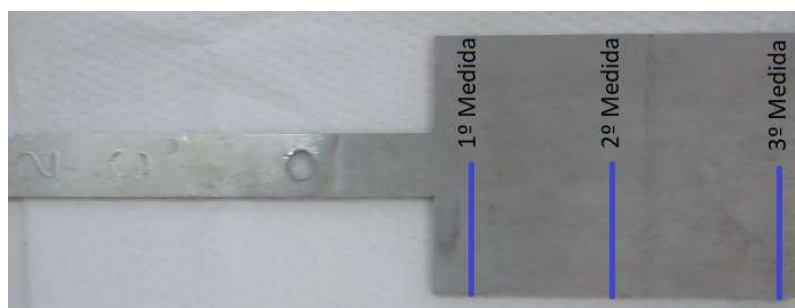


Figura 17- Regiones del electrodo donde se midió la rugosidad.

El rugosímetro, en cada lectura, presenta los valores de la rugosidad media (RA) y la rugosidad máxima (RY). En la Figura 18 se presenta el rugosímetro y sus componentes.

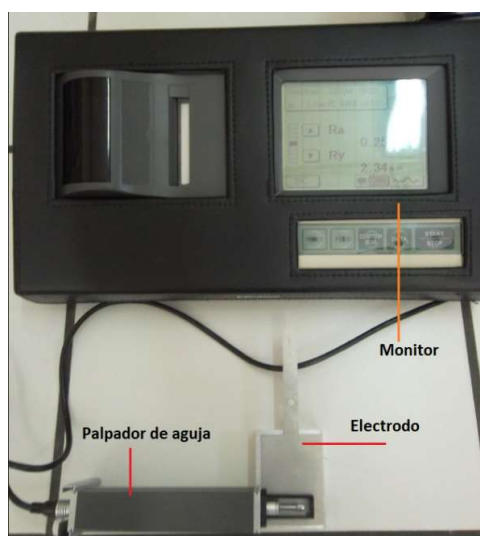


Figura 18- Rugosímetro.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

Se efectuó un análisis de la porosidad de los materiales utilizando un microscopio *NIKON JAPAN*. En la Figura 19, se presenta el microscopio así como los dos tipos de electrodos evaluados, en el borde derecho superior el acero 304 L y en el borde derecho inferior el acero 420 MC.



Figura 19- Microscopio- *NIKON JAPAN*.

El estudio en el caso de los electrodos originales se realizó antes y después de los ensayos de electrolisis con 1, 2 y 3 A. Para los electrodos decapados se realizó un primer estudio antes del tratamiento de decapado, después del decapado con HCl 1 mol/L y HNO<sub>3</sub> al 5% y al final de los ensayos de electrolisis.

A continuación, se presentan cada uno de los pasos seguidos durante los ensayos de electrólisis.

### 1º- Distinguir los electrodos.

Marcar los electrodos como ánodo y cátodo.

### 2º-Tratamiento de Limpieza.

- Lavar los electrodos con agua destilada y dejar secar al aire.
- Lavar los electrodos con acetona y dejar evaporar el solvente.
- Determinar la masa de los electrodos originales.

### 3º- Examen de rugosidad y porosidad de los electrodos.

Electrodos originales:

- Examinar en el microscopio y tirar foto de la porosidad del electrodo.
- Examinar la rugosidad de la superficie de los electrodos. Tomar seis medidas en la parte superior, media e inferior de cada electrodo.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable

---

### 4º- Tratamiento de decapado.

Verter en un cubilete de 600 mL, 250 mL de solución de HCl  $\approx 1\text{mol/L}$ . Introducir los electrodos en el cubilete y calentar a Baño María durante 30 minutos a 65 °C aproximadamente como se puede ver en la Figura 20.



Figura 20- Decapado con HCl  $\approx 1\text{mol/L}$  y calentado a Baño María.

Su función es eliminar el óxido presente en la superficie del electrodo y generar rugosidad en la superficie del mismo. Finalizados los 30 minutos del decapado, lavar las piezas con agua destilada y dejar secar al aire libre. Luego determinar su masa como se ve en la Figura 21.

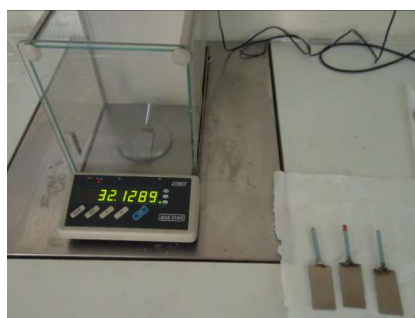


Figura 21- Determinación de la masa de los electrodos.

A continuación, verter en un cubilete de 600 mL, 250 mL de solución de HNO<sub>3</sub> al 5%. Introducir los electrodos en el cubilete durante 5 minutos, como se ve en la Figura 22.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---



Figura 22- Decapado de los electrodos con HNO<sub>3</sub> al 5%.

Este tratamiento cumple la función de pasivar el electrodo para su posterior estudio.

La importancia de pasivar el electrodo después del decapado, es evitar la corrosión del mismo. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable se debe a una película pasiva de un óxido complejo rico en cromo, que se forma espontáneamente en la superficie del acero y que corresponde al estado normal de la superficie del acero inoxidable y se conoce como “estado pasivo”. El decapado hace que el acero pierda su “estado pasivo” y se convierta en “activo” produciéndose la corrosión del metal. La función del tratamiento con HNO<sub>3</sub> es restablecer el “estado pasivo” del acero inoxidable [48].

Finalizados los 5 minutos, lavar las piezas con agua destilada y dejar secar al aire libre. Luego determinar su masa.

- Repetir el 3º paso con los electrodos decapados.

### 5º- Ensayos de electrolisis.

En primer lugar, se realiza el montaje de la célula de electrolisis. Una vez montada se introduce en el interior de la misma, por el orificio de la tapa donde se conecta el tubo de PVC, 160 mL de disolución de hidróxido de potasio (KOH) con ayuda de un embudo. A continuación, se conecta un extremo del tubo de PVC en este mismo orificio de la tapa de la célula, y el otro extremo en la probeta invertida. Finalmente, se conectan los cables de la fuente de tensión al ánodo y cátodo de la célula.

Se realiza el primer ensayo trabajando con una intensidad de corriente de 1 A y se toman los valores de voltaje, intensidad de corriente, volumen de gas cada 10 min., temperatura ambiente y temperatura del KOH antes del ensayo y al final del mismo. Una vez concluido un primer ensayo, se deja enfriar la solución de KOH del electrolizador hasta una temperatura próxima a la temperatura inicial del KOH del primer ensayo. A continuación, se repite, en un ensayo por duplicado, el ensayo inicial para corroborar los valores de volumen

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

de gas obtenidos en el primer ensayo. Finalizado el primer ensayo y su duplicado, se estudia el consumo de KOH mediante una titulación ácido-base, como se puede ver en la Figura 23.



Figura 23- Titulación del KOH.

Para realizar la titulación se coloca en un matraz erlenmeyer de 250 mL, 20 mL de HCl  $\approx 1\text{ mol/L}$ , 40 mL de agua destilada y 5 gotas de fenolftaleína. En la bureta de 25 mL se coloca el KOH utilizado en la célula de electrolisis. La titulación se realiza gota a gota hasta que se produce el cambio de color amarillo claro al rosa de la imagen, ya que es en este punto, donde se produce la neutralización de la solución. De modo que se puede calcular la concentración de KOH, conociendo el volumen gastado de KOH hasta el punto de neutralización.

Se repiten los pasos anteriores para los ensayos con 2 y 3 A. Una vez concluidos los ensayos con 1, 2 y 3 A tanto para los electrodos originales como los decapados de acero inoxidable 304 L y 420 MC, se repite el 3º paso, se determinan las masas de los electrodos y se toman las dimensiones del área de los electrodos sumergida en la solución de KOH.

## Capítulo 4

### 4 RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se presentan los datos y resultados obtenidos durante los ensayos de electrólisis, las titulaciones realizadas para averiguar el consumo de KOH al final de los ensayos, resultados del estudio de rugosidad y las imágenes del estudio de porosidad.

#### 4.1 Ensayos de electrólisis del acero 304 L

Para dar inicio a los ensayos de electrólisis es necesario, en primer lugar, realizar el montaje experimental, es decir, se debe montar la célula de electrólisis, conectar los electrodos a la fuente de alimentación, montar el tubo de gas de la célula de electrólisis con la probeta graduada para medir el volumen de gas, preparar los materiales de medición como son el termómetro, cronómetro y, en caso de tener que medir la rugosidad, realizar el montaje del rugosímetro. Si los ensayos de electrólisis van a ser con electrodos decapados, se debe preparar en primer lugar el baño maría, así como los cubiletes en donde se colocan los electrodos sumergidos en ácido clorhídrico y ácido nítrico. Solo después de finalizar el decapado se procede con el montaje experimental de la célula de electrólisis. Los datos recolectados durante las experiencias se presentan en diversas tablas que a continuación se describen en detalle.

En la Tabla 3, se presentan los valores de temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), temperatura inicial del KOH ( $T_{i\ KOH}$ ), temperatura final del KOH ( $T_{f\ KOH}$ ), volumen de hidróxido de potasio que utiliza la célula de electrólisis ( $V_{KOH}$ ), área del cátodo (A-Cátodo), área del ánodo (A-Ánodo), área del cátodo y el ánodo (A-Cátodo-Ánodo) de los electrodos 304 L en estado original. Estos electrodos no recibieron ningún tratamiento previo antes de ser efectuados los ensayos de electrólisis.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 3- Datos del laboratorio-electrodos originales de acero 304 L.

	Ensayo 1 (A)		Ensayo 2 (A)		Ensayo 3(A)	
	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2
<b>Tamb</b> (°C)	28,0	27,5	26,2	26,2	24,7	24,6
<b>T<sub>i</sub> KOH</b> (°C)	28,0	28,7	27,0	28,7	24,7	26,6
<b>T<sub>f</sub> KOH</b> (°C)	29,7	29,7	31,0	31,9	30,6	31,6
<b>V<sub>KOH</sub></b> (mL)	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
<b>Voltaje</b> (V)	2,4	2,3	2,6	2,6	2,9	2,9
<b>Intensidad</b> (A)	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
<b>A-Cátodo</b> (cm <sup>2</sup> )	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
<b>A-Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
<b>A-Cátodo- Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	30	30	30	30	30	30
<b>Área total</b> (cm <sup>2</sup> )	59	59	59	59	59	59

A continuación en la Tabla 4, se muestra el volumen de gas de Brown ( $V_{gas}$ ) obtenido cada 10 minutos y el Caudal ( $Q$ ) de gas por minuto, para los ensayos con 1 A.

Tabla 4- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 1 A electrodos originales de acero 304 L.

	Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2	
		$V_{gas}$ (mL)	$Q$ (mL/min)	$V_{gas}$ (mL)	$Q$ (mL/min)
<b>t<sub>1</sub></b>	10	135	13,5	134	13,4
<b>t<sub>2</sub></b>	20	268	13,4	267	13,4
<b>t<sub>3</sub></b>	30	398	13,3	399	13,3

En la Tabla 4 se observa que trabajando con 1 A el caudal de gas es prácticamente estable.

En la Tabla 5 se presentan el volumen y el caudal de gas para los ensayos con 2 A.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 5- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 2 A electrodos originales de acero 304 L.

Tiempo (min)		Ensayo -1		Ensayo -2	
		V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)
t <sub>1</sub>	10	271	27,1	271	27,1
t <sub>2</sub>	20	535	26,8	536	26,8
t <sub>3</sub>	30	794	26,5	794	26,5

En la Tabla 5 se observa que trabajando con 2 A, existe una pequeña disminución en el caudal de gas a medida que pasa el tiempo. Finalmente en la Tabla 6 se observan el caudal y el volumen de gas obtenido en los ensayos con 3 A.

Tabla 6- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 3 A electrodos originales de acero 304 L.

Tiempo (min)		Ensayo -1		Ensayo -2	
		V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)
t <sub>1</sub>	10	392	39,2	392	39,2
t <sub>2</sub>	20	772	38,6	773	38,7

En los ensayos con 3 A de la Tabla 6, también se observa una pequeña disminución en el caudal de gas a medida que pasa el tiempo. Como el volumen de gas se toma de 10 en 10 minutos y la probeta alcanza el litro antes de 30 min, solo se consideran dos medidas de volumen.

En la Figura 24, se presenta la producción de gas de Brown en función del tiempo y la intensidad de corriente aplicada a los electrodos de acero 304 L originales (sin decapar).

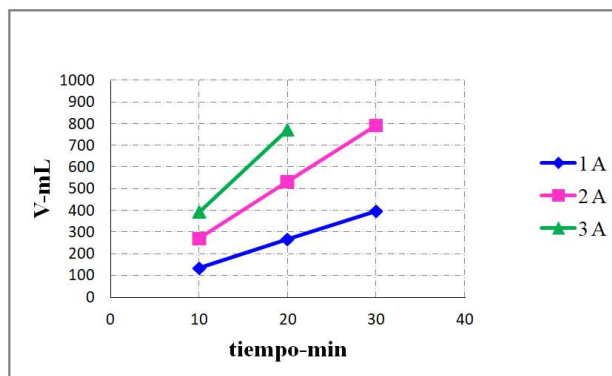


Figura 24- Volumen de gas de Brown de los electrodos originales de acero 304 L.

### Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Se puede observar, en la Figura 24, que el volumen de gas producido durante los ensayos de electrólisis, presenta un comportamiento lineal respecto al tiempo y que el aumento de la intensidad de corriente provoca un aumento en la producción de gas de Brown. Se puede ver también que para un periodo de tiempo fijo es posible graduar el volumen de gas de Brown, aumentando o disminuyendo la intensidad de corriente aplicada a los electrodos. Por ejemplo, en 10 minutos se pueden producir 135 mL, 271 mL, o 392 mL y la variación de este volumen depende de la intensidad de corriente que aplique a los electrodos, de modo que en todo momento, puedo escoger el caudal de producción de gas tan solo graduando la intensidad de corriente de la fuente de alimentación.

A continuación en la Tabla 7, se presentan los datos del laboratorio para el conjunto de electrodos de acero 304L con tratamiento de decapado.

Tabla 7- Datos del laboratorio-electrodos decapados de acero 304 L.

	Ensayo 1(A)		Ensayo 2 (A)		Ensayo 3 (A)	
	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2
<b>Tamb</b> (°C)	27,6	27,6	26,8	26,8	24,2	24,4
<b>T<sub>i</sub> KOH</b> (°C)	27,6	28,0	27,1	28,1	24,0	28,0
<b>T<sub>f</sub> KOH</b> (°C)	29,4	29,4	29,6	31,0	30,0	32,0
<b>V<sub>KOH</sub></b> (mL)	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
<b>Voltaje</b> (V)	2,3	2,2	2,5	2,5	2,9	2,9
<b>Intensidad</b> (A)	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
<b>A-Cátodo</b> (cm <sup>2</sup> )	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5
<b>A-Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5
<b>A-Cátodo- Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	29	29	29	29	29	29
<b>Área total</b> (cm <sup>2</sup> )	59	59	59	59	59	59

El volumen de gas de Brown ( $V_{gas}$ ) obtenido cada 10 minutos y el Caudal ( $Q$ ) de gas por minuto, para los ensayos con 1 A son presentados en la Tabla 8.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable

Tabla 8- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 1 A-electrodos decapados de acero 304 L.

Tiempo (min)		Ensayo -1		Ensayo -2	
		V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)
t <sub>1</sub>	10	70	7	62	6,2
t <sub>2</sub>	20	141	7,1	122	6,1
t <sub>3</sub>	30	205	6,8	178	5,9
t <sub>4</sub>	40	267	6,7	237	5,9

En la Tabla 8 se observa que a diferencia de los electrodos originales, después de realizar el decapado y trabajando con 1 A, el caudal de gas presenta una disminución con el paso del tiempo.

En la Tabla 9 se presentan el volumen y el caudal de gas para los ensayos con 2 A

Tabla 9- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 2 A-electrodos decapados de acero 304 L.

Tiempo (min)		Ensayo -1		Ensayo -2	
		V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)
t <sub>1</sub>	10	238	23,8	238	23,8
t <sub>2</sub>	20	458	22,9	468	23,4
t <sub>3</sub>	30	686	22,9	695	23,2
t <sub>4</sub>	40	917	22,9	928	23,2

En la Tabla 9 se observa que trabajando con 2 A el caudal tiende a la estabilidad en ambos ensayos.

Finalmente en la Tabla 10 se observan el caudal y el volumen de gas obtenido en los ensayos con 3 A.

Tabla 10- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 3 A-electrodos decapados de acero 304 L.

Tiempo (min)		Ensayo -1		Ensayo -2	
		V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)
t <sub>1</sub>	10	375	37,5	389	38,9
t <sub>2</sub>	20	682	34,1	769	38,5

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En los ensayos con 3 A de la Tabla 10, se observa una pequeña disminución en el caudal de gas a medida que pasa el tiempo. Como el volumen de gas se toma de 10 en 10 minutos y la probeta alcanzó el litro antes de 30 min, solo se consideran dos medidas de volumen.

La producción de gas de Brown en función del tiempo y la intensidad de corriente aplicada a los electrodos de acero 304 L decapados, se muestran en la Figura 25.

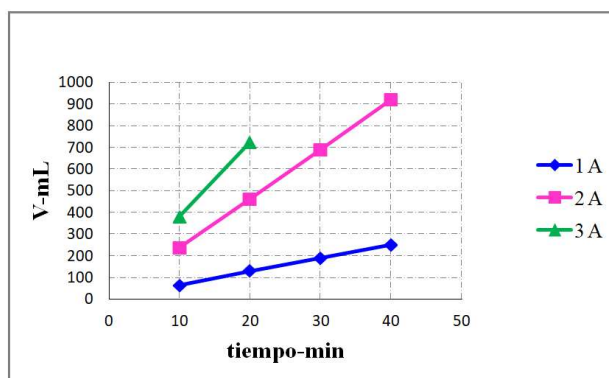


Figura 25- Volumen de gas de Brown de los electrodos decapados de acero 304 L.

Se puede observar, en la Figura 25, que la producción de gas de Brown aumenta con el aumento de la intensidad de corriente. De modo que, según estos valores, es posible graduar el volumen de gas, aumentando o disminuyendo la intensidad de corriente aplicada a los electrodos.

Si comparamos la producción de gas de los electrodos de acero 304L originales con los electrodos decapados, obtenemos la Figura 26.

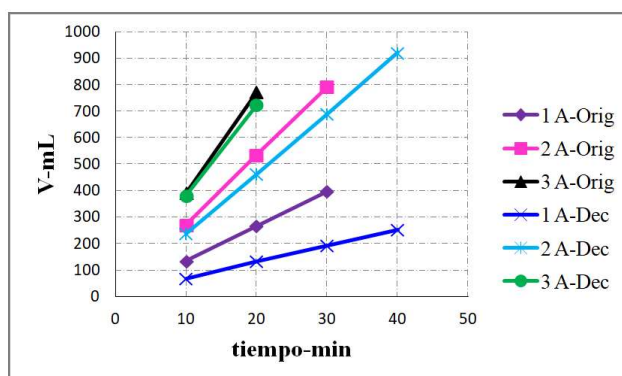


Figura 26- Comparación del volumen de gas de Brown de los electrodos 304 L original y decapado.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

De la observación de la Figura 26, podemos decir que la producción de volumen de gas es mayor en los electrodos originales que en los decapados. El tratamiento de decapado no parece favorecer la producción de gas en el acero 304 L. Además, se confirma que con el aumento de la intensidad de corriente aumenta la producción de gas de Brown.

Una vez obtenidos los valores experimentales de volumen de gas de Brown, es necesario comparar estos datos, con los valores teóricos de volumen de gas de Brown, para poder determinar el rendimiento de la reacción.

La producción teórica de gas de Brown se obtiene aplicando la Ley de Faraday expresada en la ecuación (33).

$$m_{H_2} = \frac{I}{n_{e^-} \times F} \times M \times t \quad (33)$$

Donde

$m_{H_2}$  = Masa de hidrógeno que migra al cátodo (g).

M = Masa molar (g/mol).

t = Tiempo (s).

I = Intensidad (A).

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

$n_{e^-}$  = Número de electrones.

La ecuación (33) puede ser escrita como la ecuación (34).

$$n_{moles-H_2} = \frac{m}{M} = \frac{I}{n_{e^-} \times F} \times t \quad (34)$$

Siendo

m = masa (g).

$n_{moles-H_2}$  = el número de moles de hidrógeno (mol).

Reemplazando la intensidad (I) por la densidad de corriente tenemos la ecuación (35).

$$j = \frac{I}{A_E} \quad (35)$$

Donde

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

$J$  = densidad de corriente ( $A/m^2$ ).

$A_E$  = Área del ánodo y el cátodo en la celda electrolítica ( $m^2$ ).

De modo que la ley de Faraday se expresa como la ecuación (36).

$$n_{moles-H_2} = \frac{j}{n_e \times F} \times t \quad (36)$$

Con el número de moles se calcula el volumen de hidrógeno, a través de la ecuación (37), considerando que el hidrogeno se comporta como gas ideal. Es importante destacar que para todos los cálculos se considera una presión atmosférica de  $P = 1$  (atm) y la constante de los gases ideales  $R = 0.0821$  (atm.L.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

$$V_{H_2} = \frac{n R T}{P} \quad (37)$$

Donde

$V_{H_2}$  = Volumen de hidrógeno (mL).

$n$  = Número de moles (mol).

$R$  = La constante de los gases ideales (atm.L.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$T$  = Temperatura (K)

$P$  = Presión atmosférica (atm).

Siendo el volumen de oxígeno ( $V_{O_2}$ ) calculado a través de la ecuación (38).

$$V_{O_2} = \frac{1}{2} V_{H_2} \quad (38)$$

De modo que el volumen teórico de gas de Brown que se puede producir viene dado por la ecuación (39).

$$V_{gasOHH} = (V_{H_2} + V_{O_2}) \times A_T \quad (39)$$

Donde

$A_T$  = Área total - suma del Área del ánodo y el cátodo en la celda electrolítica ( $m^2$ ).

$V_{gasOHH}$  = Volumen de gas de Brown (mL).

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

El rendimiento del proceso de electrolisis, se obtiene de la división entre el volumen real de gas de Brown y el volumen teórico, como se puede observar en la ecuación (40).

$$\eta(\%) = \frac{\text{Volumen real} - \text{gas de Brown}}{\text{Volumen teórico} - \text{gas de Brown}} \times 100 \quad (40)$$

Para poder realizar los calculos del rendimiento se presentan a continuación los volúmenes de gas teórico y real de cada ensayo de 1,2 y 3 A para el acero 304 L original y decapado.

En la Tabla 11 se muestran los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown, del acero 304 L con electrodos originales, para los ensayos con 1 y 2 A.

Tabla 11- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 304 L original para 1 y 2 A.

Tiempo (min)	Ensayo-1 (A)				Ensayo-2 (A)				
	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
<b>t1</b>	10	230,6	231,1	135	134	459,6	462,3	271	271
<b>t2</b>	20	461,2	462,3	268	267	919,3	924,5	535	536
<b>t3</b>	30	691,8	693,4	398	399	1378,9	1386,8	794	794

En la Tabla 12 se presentan los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown del acero 304 L con electrodos originales, para los ensayos con 3 A.

Tabla 12- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 304 L original para 3 A.

Tiempo (min)	Ensayo-3 (A)				
	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
<b>t1</b>	10	684,2	686,3	392	392
<b>t2</b>	20	1368,4	1372,5	772	773

En los ensayos con 3 A de la Tabla 12, solo se tomaron dos medidas ya que el volumen de gas se mide de 10 en 10 minutos y la probeta alcanzo el litro antes de 30 min.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En la Tabla 13 se muestran los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown, del acero 304 L con electrodos decapados, para los ensayos con 1 y 2 A.

Tabla 13- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 304 L decapado para 1 y 2 A.

Tiempo (min)	Ensayo-1 (A)				Ensayo-2 (A)				
	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
t1	10	230,3	230,6	70	62	462,1	461,3	238	238
t2	20	460,6	461,2	141	122	924,2	922,7	458	468
t3	30	690,9	691,8	205	178	1386,3	1384,0	686	695
t4	40	921,1	922,4	267	237	1848,4	1845,3	917	928

En comparación con la Tabla 11, la Tabla 13, presenta una disminución en el volumen de gas después de realizar el decapado de los electrodos.

En la Tabla 14 se presentan los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown del acero 304 L con electrodos decapados, para los ensayos con 3 A.

Tabla 14- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 304 L decapado para 3 A.

Tiempo (min)	Ensayo-3 (A)				
	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
t1	10	682,6	691,8	375	389
t2	20	1365,2	1383,5	682	769

En el ensayo de 3 A de la Tabla 14, faltan dos valores debido a que la probeta de 1 L se llenó de gas antes del siguiente periodo de tiempo. Como el volumen de gas se toma de 10 en 10 minutos y la probeta alcanzó el litro antes de 30 min, solo se consideran dos medidas de volumen.

Con los valores de las Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 y aplicando la ecuación (40), se calcula el rendimiento del sistema de electrólisis representado en la Tabla 15.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

A continuación en la Tabla 15, se presentan los valores del rendimiento para cada ensayo realizado con electrodos de acero inoxidable 304 L en estado original.

Tabla 15- Rendimiento del proceso de electrólisis -electrodos originales de acero 304 L.

	Tiempo (min)	Ensayo -1 (A)		Ensayo -2 (A)		Ensayo -3 (A)	
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2
t <sub>1</sub>	10	58,5%	58,0%	59,0%	58,6%	57,3%	57,1%
t <sub>2</sub>	20	58,1%	57,8%	58,2%	58,0%	56,4%	56,3%
t <sub>3</sub>	30	57,5%	57,5%	57,6%	57,3%		

Se observa que en la Tabla 15, en el ensayo con 3 A falta un valor. Esto se debe a que la probeta de 1 L se llenó de gas antes del siguiente periodo de tiempo.

El rendimiento de los ensayos realizados con electrodos decapados de acero inoxidable 304 L, se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16- Rendimiento del proceso de electrólisis-electrodos decapados de acero 304 L.

	Tiempo (min)	Ensayo -1 (A)		Ensayo -2 (A)		Ensayo -3 (A)	
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2
t <sub>1</sub>	10	30,4%	26,9%	51,5%	51,6%	54,9%	56,2%
t <sub>2</sub>	20	30,6%	26,5%	49,6%	50,7%	50,0%	55,6%
t <sub>3</sub>	30	29,7%	25,7%	49,5%	50,2%		
t <sub>4</sub>	40	29,0%	25,7%	49,6%	50,3%		

En la Tabla 16, la falta de dos valores en los ensayos de 3 A se debe a que la probeta se llenó de gas antes de tiempo.

En la Tabla 17 se representa la media del rendimiento de los ensayos de electrólisis con electrodos originales de acero 304 L.

Tabla 17- Rendimiento medio del proceso de electrólisis con electrodos de acero 304 L.

	Tiempo (min)	Rendimiento medio-acero inoxidable 304 L.								
		Original %			Decapado %			Desviación $\left  \frac{Dec.-Orig.}{Orig.} \right $ %		
		1 (A)	2 (A)	3 (A)	1 (A)	2(A)	3 (A)	1 (A)	2 (A)	3 (A)
t <sub>1</sub>	10	58,3	58,8	57,2	28,7	51,6	55,6	50,8	12,3	2,9
t <sub>2</sub>	20	58,0	58,1	56,4	28,6	50,2	52,8	50,7	13,7	6,3
t <sub>3</sub>	40	57,5	57,5		27,7	49,9		51,8	13,2	

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En la Tabla 17 se puede observar que la desviación entre los valores de rendimiento del sistema de electrólisis de los electrodos originales y decapados de acero 304 L, tiende a disminuir con el aumento de la intensidad de corriente. Es decir que a mayor intensidad de corriente el rendimiento en la producción de gas de Brown entre electrodos originales y decapados tiende a aproximarse. La falta de un valor en los ensayos de 3 A se debe a que la probeta se lleno de gas antes de tiempo.

### 4.2 Ensayos de electrólisis del acero 420 MC

Los datos experimentales obtenidos para los ensayos con acero inoxidable 420 MC en estado original se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18- Datos del laboratorio-electrodos originales de acero 420 MC.

	Ensayo 1 (A)		Ensayo 2 (A)		Ensayo 3 (A)	
	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2
<b>T<sub>amb</sub></b> (°C)	25,0	25,0	24,6	25,0	25,0	25,0
<b>T<sub>i KOH</sub></b> (°C)	25,0	26,1	25,0	25,0	26,0	27,4
<b>T<sub>f KOH</sub></b> (°C)	27,0	27,2	30,0	29,7	33,4	33,0
<b>V<sub>KOH</sub></b> (mL)	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
<b>Voltaje</b> (V)	2,5	2,3	2,7	2,7	3,1	3,2
<b>Intensidad</b> (A)	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
<b>A-Cátodo</b> (cm <sup>2</sup> )	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7
<b>A-Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7
<b>A-Cátodo- Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	21	21	21	21	21	21
<b>Área total</b> (cm <sup>2</sup> )	41	41	41	41	41	41

A continuación en la Tabla 19, se muestra el volumen de gas de Brown ( $V_{gas}$ ) obtenido cada 10 minutos y el Caudal ( $Q$ ) de gas por minuto, para los ensayos con 1 A.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 19- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 1 A-electrodos originales de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2		
	V <sub>gas</sub>	Q	V <sub>gas</sub>	Q	
	(mL)	(mL/min)	(mL)	(mL/min)	
t <sub>1</sub>	10	129	12,9	129	12,9
t <sub>2</sub>	20	253	12,7	258	12,9
t <sub>3</sub>	30	381	12,7	382	12,7
t <sub>4</sub>	40	503	12,6	511	12,8

En la Tabla 19 se observa que trabajando con 1 A el caudal de gas es prácticamente estable.

En la Tabla 20 se presentan el volumen y el caudal de gas para los ensayos con 2 A.

Tabla 20- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 2 A-electrodos originales de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2		
	V <sub>gas</sub>	Q	V <sub>gas</sub>	Q	
	(mL)	(mL/min)	(mL)	(mL/min)	
t <sub>1</sub>	10	264	26,4	266	26,6
t <sub>2</sub>	20	520	26,0	523	26,2
t <sub>3</sub>	30	774	25,8	778	25,9

Observando los valores de la Tabla 20 se puede decir que trabajando con 2 A existe una pequeña disminución del caudal con el paso del tiempo. En estos ensayos solo se tomaron tres valores porque la probeta se lleno antes de los 40 min.

Finalmente en la Tabla 21 se observan el caudal y el volumen de gas de Brown obtenido en los ensayos con 3 A.

Tabla 21- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 3 A-electrodos originales de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2		
	V <sub>gas</sub>	Q	V <sub>gas</sub>	Q	
	(mL)	(mL/min)	(mL)	(mL/min)	
t <sub>1</sub>	10	384	38,4	385	38,5
t <sub>2</sub>	20	761	38,1	769	38,5

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En la Tabla 21 se observa que a diferencia de la Tabla 20, trabajando con 3 A el caudal de gas permanece prácticamente estable. En estos ensayos solo se tomaron dos valores porque la probeta se llenó antes de los 30 min.

La producción de gas de Brown en función del tiempo y la intensidad de corriente aplicada a los electrodos de acero 420 MC originales (sin decapar), son presentados en la Figura 27.

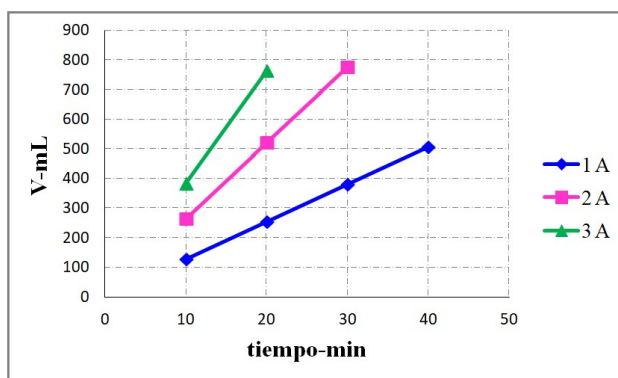


Figura 27- Volumen de gas de Brown de los electrodos originales de acero 420 MC.

Se puede observar, en la Figura 27, que aumentando o disminuyendo la intensidad de corriente aplicada a los electrodos, se obtiene un mayor o menor volumen de gas de Brown para un tiempo dado.

Los datos experimentales obtenidos para los ensayos con acero inoxidable 420 MC después de ser sometidos a un tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1\text{mol/L}$  y  $\text{HNO}_3$  al 5%, se presentan en la Tabla 22.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 22- Datos del laboratorio-electrodos decapados de acero 420 MC.

	Ensayo 1 (A)		Ensayo 2 (A)		Ensayo 3 (A)	
	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2	Ensayo -1	Ensayo -2
<b>T<sub>amb</sub></b> (°C)	25,0	25,0	25,6	25,6	26,0	26,0
<b>T<sub>i KOH</sub></b> (°C)	24,7	21,0	24,9	26,4	26,1	26,4
<b>T<sub>f KOH</sub></b> (°C)	26,7	25,2	30,0	29,6	33,7	33,7
<b>V<sub>KOH</sub></b> (mL)	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
<b>Voltaje</b> (V)	2,5	2,4	2,9	2,8	3,2	3,1
<b>Intensidad</b> (A)	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
<b>A-Cátodo</b> (cm <sup>2</sup> )	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8
<b>A-Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8
<b>A-Cátodo Ánodo</b> (cm <sup>2</sup> )	18	18	18	18	18	18
<b>Área total</b> (cm <sup>2</sup> )	36	36	36	36	36	36

A continuación en la Tabla 23, se muestra el volumen de gas de Brown ( $V_{gas}$ ) obtenido cada 10 minutos y el caudal ( $Q$ ) de gas por minuto, para los ensayos con 1 A de electrodos de acero 420 MC decapados.

Tabla 23- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 1 A-electrodos decapados de acero 420 MC.

	Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2	
		$V_{gas}$	$Q$	$V_{gas}$	$Q$
		(mL)	(mL/min)	(mL)	(mL/min)
<b>t<sub>1</sub></b>	10	134	13,4	134	13,4
<b>t<sub>2</sub></b>	20	264	13,2	266	13,3
<b>t<sub>3</sub></b>	30	391	13,0	392	13,1
<b>t<sub>4</sub></b>	40	520	13,0	522	13,1

En la Tabla 23 se observa que trabajando con 1 A los electrodos decapados presentan un caudal de gas practicamente estable.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En la Tabla 24, se presentan el volumen y el caudal de gas para los ensayos con 2 A.

Tabla 24- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 2 A-electrodos decapados de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2		
	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	
t <sub>1</sub>	10	266	26,6	264	26,4
t <sub>2</sub>	20	522	26,1	522	26,1
t <sub>3</sub>	30	779	26,0	777	25,9

Trabajando con 2 A se observa que la Tabla 24 a diferencia de la Tabla 23 presenta una pequeña disminución del caudal con el tiempo. En estos ensayos solo se tomaron tres valores porque la probeta se lleno antes de los 40 min.

Finalmente en la Tabla 25, se observan el caudal y el volumen de gas de Brown obtenido en los ensayos con 3 A.

Tabla 25- Caudal y volumen de gas de Brown- ensayo con 3 A-electrodos decapados de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1		Ensayo -2		
	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	V <sub>gas</sub> (mL)	Q (mL/min)	
t <sub>1</sub>	10	392	39,2	337	33,7
t <sub>2</sub>	20	775	38,8	771	38,6

En la Tabla 25 se observa que trabajando con 3 A el decapado provoca un aumento del caudal con el tiempo a partir del ensayo-2. En esta tabla, solo se tomaron dos valores porque la probeta se lleno antes de los 30 min.

La producción de gas de Brown en función del tiempo y la intensidad de corriente aplicada a los electrodos de acero 420 MC decapados, se muestran en la Figura 28.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

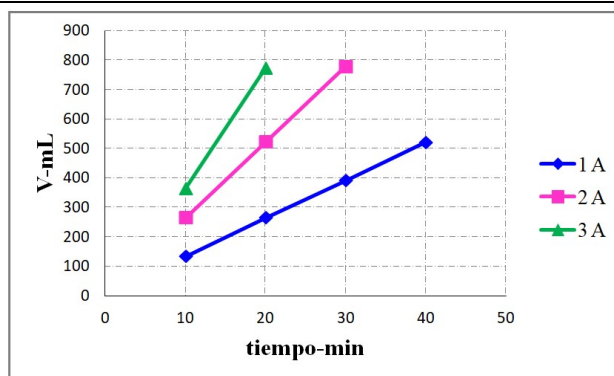


Figura 28- Volumen de gas de Brown de los electrodos decapados de acero 420 MC.

Los resultados de la Figura 28, confirman que el aumento o disminución de la intensidad de corriente aplicada a los electrodos, influye en la mayor o menor producción de gas de Brown para un tiempo dado.

Si comparamos la producción de gas de los electrodos de acero 420 MC originales con los electrodos decapados, obtenemos la Figura 29.

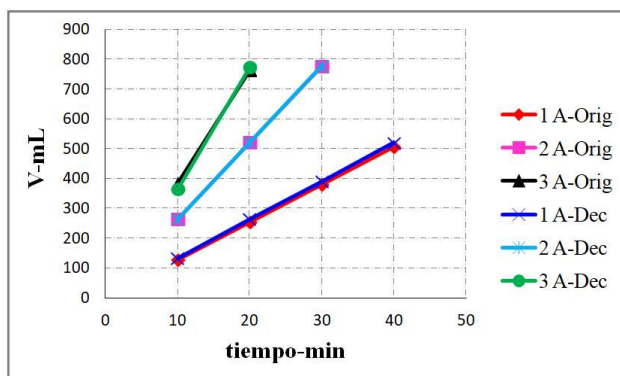


Figura 29- Comparación del volumen de gas de Brown de los electrodos 420 MC original y decapado.

De la observación de la Figura 29, podemos decir que la producción de volumen de gas es muy próxima entre los electrodos decapados y los originales. También se confirma que el aumento de la intensidad de corriente aumenta la producción de gas.

La producción teórica de gas de Brown se obtiene aplicando la Ley de Faraday que anteriormente fue desarrollada desde la ecuación 33 hasta la ecuación 39.

Para poder realizar los cálculos del rendimiento se presentan a continuación los volúmenes de gas teórico y real de cada ensayo de 1,2 y 3 A para el acero 420 MC original y decapado.

### Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En la Tabla 26 se muestran los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown, del acero 420 MC con electrodos originales, para los ensayos con 1 y 2 A.

Tabla 26- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 420 MC original para 1 y 2 A.

Tiempo (min)	Ensayo-1 (A)				Ensayo-2 (A)				
	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
<b>t1</b>	10	228,3	229,1	129	129	458,9	458,9	264	266
<b>t2</b>	20	456,6	458,3	253	258	917,7	917,7	520	523
<b>t3</b>	30	684,9	687,4	381	382	1376,6	1376,6	774	778
<b>t4</b>	40	913,2	916,5	503	511				

En la Tabla 26, en los ensayos con 2 A, solo se tomaron tres valores porque la probeta se lleno antes de los 40 min.

En la Tabla 27 se presentan los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown del acero 420 MC con electrodos originales, para los ensayos con 3 A. Solo se tomaron dos valores porque la probeta se lleno antes de los 30 min.

Tabla 27- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 420 MC original para 3 A.

Tiempo (min)	Ensayo-3 (A)				
	$V_T$ (mL)	$V_T$ (mL)	$V_R$ (mL)	$V_R$ (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
<b>t1</b>	10	684,9	692,7	384	385
<b>t2</b>	20	1369,8	1385,4	761	769

En la Tabla 28 se muestran los valores del volumen teórico ( $V_T$ ) y real ( $V_R$ ) de gas de Brown, del acero 420 MC con electrodos decapados, para los ensayos con 1 y 2 A. En los ensayos con 2 A solo se tomaron dos valores porque la probeta se lleno antes de los 30 min.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 28- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 420 MC decapado para 1 y 2 A.

Tiempo (min)	Ensayo-1 (A)				Ensayo-2 (A)				
	V <sub>T</sub> (mL)	V <sub>T</sub> (mL)	V <sub>R</sub> (mL)	V <sub>R</sub> (mL)	V <sub>T</sub> (mL)	V <sub>T</sub> (mL)	V <sub>R</sub> (mL)	V <sub>R</sub> (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
<b>t1</b>	10	228,1	225,2	134	134	458,7	461,0	266	264
<b>t2</b>	20	456,1	450,5	264	266	917,4	922,0	522	522
<b>t3</b>	30	684,2	675,7	391	392	1376,1	1383,1	779	777
<b>t4</b>	40	912,3	900,9	520	522				

En la Tabla 29 se presentan los valores del volumen teórico (V<sub>T</sub>) y real (V<sub>R</sub>) de gas de Brown del acero 420 MC con electrodos decapados, para los ensayos con 3 A. Solo se tomaron dos valores porque la probeta se lleno antes de los 30 min.

Tabla 29- Volumen de gas de Brown teórico y real-acero 420 MC decapado para 3 A.

Tiempo (min)	Ensayo-3 (A)				
	V <sub>T</sub> (mL)	V <sub>T</sub> (mL)	V <sub>R</sub> (mL)	V <sub>R</sub> (mL)	
	Ens.-1	Ens.-2	Ens.-1	Ens.-2	
<b>t1</b>	10	689,7	690,4	392	337
<b>t2</b>	20	1379,4	1380,8	775	771

El rendimiento del proceso de electrólisis se calcula conforme a la ecuación 40. En la Tabla 30, se presentan los resultados del rendimiento del proceso de electrólisis para el acero inoxidable 420MC en estado original.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 30- Rendimiento del proceso de electrólisis - electrodos originales de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1 (A)		Ensayo -2 (A)		Ensayo -3 (A)		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	
t <sub>1</sub>	10	56,5%	56,3%	57,5%	58,0%	56,1%	55,6%
t <sub>2</sub>	20	55,4%	56,3%	56,7%	57,0%	55,6%	55,5%
t <sub>3</sub>	30	55,6%	55,6%	56,2%	56,5%		
t <sub>4</sub>	40	55,1%	55,8%				

En la Tabla 30 se observa que en los ensayos con 2 A solo se tomaron tres valores porque la probeta se lleno antes de 40 min y en los ensayos con 3 A solo se tomaron dos valores porque la probeta se lleno antes de 30 min.

En la Tabla 31, se presenta el rendimiento del proceso de electrólisis para los electrodos decapados de acero 420 MC.

Tabla 31- Rendimiento del proceso de electrólisis - electrodos decapados de acero 420 MC.

Tiempo (min)	Ensayo -1 (A)		Ensayo -2 (A)		Ensayo -3 (A)		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	
t <sub>1</sub>	10	58,8%	59,5%	58,0%	57,3%	56,8%	48,8%
t <sub>2</sub>	20	57,9%	59,1%	56,9%	56,6%	56,2%	55,8%
t <sub>3</sub>	30	57,1%	58,0%	56,6%	56,2%		
t <sub>4</sub>	40	57,0%	57,9%				

La Tabla 31 presenta solo tres valores en los ensayos con 2 A y dos valores en los ensayos con 3 A debido a que la probeta se lleno de gas antes de tiempo.

En la Tabla 32 se representa la media del rendimiento de los ensayos de electrolisis con electrodos de acero 420 MC.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 32- Rendimiento medio del proceso de electrólisis con electrodos de acero 420 MC.

<b>Rendimiento medio-acero inoxidable 420 MC.</b>										
<b>Tiempo (min)</b>		<b>Original</b>			<b>Decapado</b>			<b>Desviación <math>\left  \frac{Dec.-Orig.}{Orig.} \right </math></b>		
		<b>%</b>			<b>%</b>			<b>%</b>		
		<b>1 (A)</b>	<b>2 (A)</b>	<b>3 (A)</b>	<b>1 (A)</b>	<b>2 (A)</b>	<b>3 (A)</b>	<b>1 (A)</b>	<b>2 (A)</b>	<b>3 (A)</b>
<b>t1</b>	10	56,4	57,8	55,9	59,2	57,7	52,8	4,9	0,2	5,5
<b>t2</b>	20	55,9	56,9	55,6	58,5	56,8	56,0	4,7	0,2	0,8
<b>t3</b>	30	55,6	56,4		57,6	56,4		3,5	0,1	
<b>t4</b>	40	55,5			57,5			3,6		

La Tabla 32 presenta solo tres valores en los ensayos con 2 A y dos valores en los ensayos con 3 A debido a que la probeta se lleno de gas antes de tiempo. Se puede observar que la desviación entre los valores de rendimiento del sistema de electrólisis de los electrodos originales y decapados de acero 420 MC, disminuye con el aumento de la intensidad de corriente y el paso del tiempo. Es decir que a mayor intensidad de corriente el rendimiento en la producción de gas de Brown entre electrodos originales y decapados tiende a aproximarse obteniéndose mejores resultados trabajando con intensidades de 2 A.

### 4.3 Titulación del KOH de los aceros 304 L y 420 MC

Al final de cada ensayo de 1, 2 y 3 A se determinó el consumo de KOH como se puede ver en Tabla 33.

Tabla 33- Consumo de KOH después de los ensayos de electrólisis.

<b>I (A)</b>	<b>Acero 304 L</b>		<b>Acero 420 MC</b>	
	<b>Consumo KOH (mol/L)</b>		<b>Consumo KOH (mol/L)</b>	
	<b>Original</b>	<b>Decapado</b>	<b>Original</b>	<b>Decapado</b>
<b>1</b>	0,06331	0,1053	0,06887	0,007749
<b>2</b>	0,06411	0,1267	0,06808	0,007749
<b>3</b>	0,06411	0,06411	0,1225	0,003319

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

La comparación entre ambos materiales de la Tabla 33 revela que: el menor consumo de KOH durante los ensayos de electrólisis, se presenta en los electrodos de acero 420 MC decapados para una intensidad de corriente de 3 A. El pico de mayor consumo aparece en los electrodos de acero 304 L decapados para una intensidad de corriente de 2 A. De la comparación de cada material en estado original y decapado se puede decir que los electrodos de acero 304 L, en general, en estado original presentan un menor consumo que los electrodos sometidos a un tratamiento de decapado con  $HCl \approx 1M$  y  $HNO_3$  al 5 %. En el caso de los electrodos de acero 420 MC, el menor consumo se presenta en los electrodos decapados y el mayor consumo en los electrodos originales.

### 4.4 Estudio de rugosidad de los aceros 304 L

En la Tabla 34, se presentan los resultados obtenidos del estudio de rugosidad del acero inoxidable 304 L en estado original, antes de realizar los ensayos de electrólisis (Inicio-ensayo) y al final de los mismos (Fin-ensayo). Siendo RA la rugosidad media y RY la rugosidad máxima.

Tabla 34- Estudio de rugosidad-acero 304 L original.

		Inicio-ensayo				Fin-ensayo			
		Ánodo -1		Cátodo -1		Ánodo -1		Cátodo -1	
Superior	RA ( $\mu m$ )	0,25	0,29	0,29	0,32	0,26	0,32	0,34	0,36
	RY ( $\mu m$ )	2,57	2,63	2,41	2,94	2,56	2,61	3,19	3,46
Medio	RA ( $\mu m$ )	0,25	0,25	0,20	0,36	0,30	0,26	0,28	0,17
	RY ( $\mu m$ )	2,39	2,46	2,23	3,18	2,83	2,17	3,12	1,92
Inferior	RA ( $\mu m$ )	0,25	0,21	0,21	0,33	0,32	0,36	0,37	0,24
	RY ( $\mu m$ )	2,34	2,29	2,51	3,07	3,13	3,08	2,94	2,47
Desviación Estándar	RA ( $\mu m$ )	0,03		0,07		0,04		0,08	
	RY ( $\mu m$ )	0,13		0,39		0,36		0,56	
Media	RA ( $\mu m$ )	0,250		0,285		0,303		0,293	
	RY ( $\mu m$ )	2,447		2,723		2,730		2,850	

Observando la media de los valores de la rugosidad media (RA) y máxima (RY) de la Tabla 34, podemos decir que los electrodos antes de los ensayos de electrólisis presentan una menor rugosidad en el ánodo que en el cátodo. Al finalizar los ensayos con 1, 2 y 3 A se produce en general un aumento en la rugosidad de los electrodos, siendo este aumento en el ánodo de RA= 5.3% y RY= 28.3% y en el Cátodo de RA= 0.8% y RY= 12.7 %.

En la Tabla 35, se observan los valores del estudio de rugosidad de los electrodos 304 L antes del decapado (Inicio-ensayo) y después del mismo (Decapado HCl y HNO<sub>3</sub>).

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 35- Estudio de rugosidad-acero 304 L antes y después del decapado.

		Inicio-ensayo				Decapado con HCl y HNO <sub>3</sub>			
		Ánodo -2		Cátodo -2		Ánodo -2		Cátodo -2	
<b>Superior</b>	<b>RA (µm)</b>	0,20	0,38	0,53	0,63	0,21	0,36	0,24	0,34
	<b>RY (µm)</b>	2,27	3,28	4,30	4,77	2,27	3,51	2,52	3,11
<b>Medio</b>	<b>RA (µm)</b>	0,26	0,30	0,46	0,28	0,26	0,20	0,23	0,26
	<b>RY (µm)</b>	2,68	2,75	3,68	3,26	2,35	2,13	2,20	2,43
<b>Inferior</b>	<b>RA (µm)</b>	0,25	0,23	0,43	0,23	0,21	0,51	0,25	0,24
	<b>RY (µm)</b>	2,39	2,66	3,80	2,87	2,01	4,00	2,78	2,44
<b>Desviación Estándar</b>	<b>RA (µm)</b>	0,06		0,15		0,12		0,04	
	<b>RY (µm)</b>	0,35		0,69		0,83		0,32	
<b>Media</b>	<b>RA (µm)</b>	0,270		0,427		0,292		0,260	
	<b>RY (µm)</b>	2,672		3,780		2,712		2,580	

En la Tabla 35 se observa que después de realizar un tratamiento de decapado a los electrodos, la media de los valores de la rugosidad media (RA) y máxima (RY) aumenta en el ánodo y disminuye en el cátodo. El aumento es de RA= 2.2% y RY= 4% y la disminución de RA= 16.7% y RY= 120%.

Finalmente en la Tabla 36 se presentan los resultados de la rugosidad al final de los ensayos de electrolisis con los electrodos decapados.

Tabla 36- Estudio de rugosidad-acero 304 L decapado, después de los ensayos de electrolisis.

		Fin-ensayo			
		Ánodo -2		Cátodo -2	
<b>Superior</b>	<b>RA (µm)</b>	0,38	0,32	0,43	0,24
	<b>RY (µm)</b>	3,70	3,04	3,30	2,01
<b>Medio</b>	<b>RA (µm)</b>	0,25	0,39	0,27	0,31
	<b>RY (µm)</b>	2,59	3,77	2,84	2,67
<b>Inferior</b>	<b>RA (µm)</b>	0,21	0,33	0,26	0,26
	<b>RY (µm)</b>	2,02	3,23	2,61	2,49
<b>Desviación Estándar</b>	<b>RA (µm)</b>	0,07		0,07	
	<b>RY (µm)</b>	0,67		0,42	
<b>Media</b>	<b>RA (µm)</b>	0,313		0,295	
	<b>RY (µm)</b>	3,058		2,653	

Observando los valores de la media de la rugosidad media (RA) y máxima (RY) de la Tabla 36, se puede decir que después de los ensayos de electrolisis, con los electrodos decapados, se produce un aumento de la rugosidad en el ánodo de RA= 2.1% y RY= 34.6% y en el cátodo de RA= 3.5% y RY= 7.3%.

**Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

**4.5 Estudio de rugosidad de los aceros 420 MC**

En la Tabla 37, se presentan los resultados obtenidos del estudio de rugosidad del acero inoxidable 420 MC en estado original, antes de realizar los ensayos de electrólisis (Inicio-ensayo) y al final de los mismos (Fin-ensayo).

Tabla 37- Estudio de rugosidad-acero 420 MC original.

		Inicio-ensayo				Fin-ensayo			
		Ánodo -1		Cátodo -1		Ánodo -1		Cátodo -1	
<b>Superior</b>	<b>RA (µm)</b>	1,75	2,28	1,86	1,41	2,16	1,71	1,41	1,60
	<b>RY (µm)</b>	10,16	14,00	10,19	9,17	12,31	10,16	7,95	9,54
<b>Medio</b>	<b>RA (µm)</b>	1,34	1,58	1,61	1,66	1,80	1,42	1,63	1,46
	<b>RY (µm)</b>	7,74	9,85	9,17	9,32	9,66	8,21	9,09	8,96
<b>Inferior</b>	<b>RA (µm)</b>	1,74	1,47	2,52	1,77	2,12	1,26	2,06	2,14
	<b>RY (µm)</b>	9,75	8,12	13,31	9,83	11,04	7,25	11,66	12,45
<b>Desviación Estándar</b>	<b>RA (µm)</b>	0,33		0,38		0,36		0,31	
	<b>RY (µm)</b>	2,22		1,59		1,84		1,74	
<b>Media</b>	<b>RA (µm)</b>	1,693		1,805		1,745		1,717	
	<b>RY (µm)</b>	9,937		10,165		9,772		9,942	

Observando los valores medios de la rugosidad media RA y máxima RY de la Tabla 37, podemos decir que los electrodos antes de los ensayos de electrólisis presentan una menor rugosidad en el ánodo que en el cátodo. Al finalizar los ensayos con 1, 2 y 3 A se produce un aumento de la rugosidad en el ánodo de RA= 5.2% y una disminución en RY= 16.5%. En el cátodo se produce una disminución de RA= 8.8% y RY= 22.3%.

En la Tabla 38, se observan los resultados del estudio de rugosidad de los electrodos 420 MC antes del decapado (Inicio-ensayo) y después del mismo (Decapado HCl y HNO<sub>3</sub>).

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 38- Estudio de rugosidad-acero 420 MC antes y después del decapado.

		Inicio-ensayo				Decapado con HCl y HNO <sub>3</sub>			
		Ánodo -2		Cátodo -2		Ánodo -2		Cátodo -2	
<b>Superior</b>	<b>RA (µm)</b>	1,31	1,28	2,18	1,85	1,45	2,34	1,02	1,58
	<b>RY (µm)</b>	7,69	6,50	11,49	9,42	8,50	12,37	5,99	8,26
<b>Medio</b>	<b>RA (µm)</b>	1,58	1,21	1,91	1,57	1,46	1,95	1,28	1,50
	<b>RY (µm)</b>	8,53	6,71	10,25	8,67	9,04	10,53	7,56	8,66
<b>Inferior</b>	<b>RA (µm)</b>	1,79	1,21	1,48	1,75	1,51	1,77	1,22	1,52
	<b>RY (µm)</b>	9,17	6,79	8,29	10,70	8,56	10,01	6,95	9,13
<b>Desviación Estándar</b>	<b>RA (µm)</b>	0,24		0,25		0,35		0,22	
	<b>RY (µm)</b>	1,09		1,23		1,48		1,16	
<b>Media</b>	<b>RA (µm)</b>	1,397		1,790		1,747		1,353	
	<b>RY (µm)</b>	7,565		9,803		9,835		7,758	

En la Tabla 38 se observa que después de realizar un tratamiento de decapado a los electrodos, la media de los valores de la rugosidad media (RA) y máxima (RY) aumenta en el ánodo y disminuye en el cátodo. El aumento es de RA= 35% y RY= 227% y la disminución de RA= 43.7% y RY= 204.5%

Finalmente en la Tabla 39, se exponen los resultados de la rugosidad al final de los ensayos de electrolisis con los electrodos decapados.

Tabla 39- Estudio de rugosidad-acero 420 MC decapado, después de los ensayos de electrólisis.

		Fin-ensayo			
		Ánodo -2		Cátodo -2	
<b>Superior</b>	<b>RA (µm)</b>	2,28	1,60	1,19	1,60
	<b>RY (µm)</b>	11,97	9,84	6,60	9,03
<b>Medio</b>	<b>RA (µm)</b>	1,89	1,63	1,36	1,42
	<b>RY (µm)</b>	10,59	9,88	7,27	8,17
<b>Inferior</b>	<b>RA (µm)</b>	1,75	1,40	1,48	1,40
	<b>RY (µm)</b>	9,38	8,29	8,38	8,52
<b>Desviación Estándar</b>	<b>RA (µm)</b>	0,30		0,14	
	<b>RY (µm)</b>	1,23		0,89	
<b>Media</b>	<b>RA (µm)</b>	1,758		1,408	
	<b>RY (µm)</b>	9,992		7,995	

Observando los valores de la media de la rugosidad media (RA) y máxima (RY) de la Tabla 39, se puede decir que después de los ensayos de electrolisis, con los electrodos decapados, se produce un aumento de la rugosidad en el ánodo de RA= 1.1% y RY= 15.7% y en el cátodo de RA= 5.5% y RY= 23.7%.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

A continuación, en la Tabla 40 se comparan los valores medios de la rugosidad media (RA) y la rugosidad máxima (RY) de los electrodos originales de acero 304 L y 420 MC.

Tabla 40- Rugosidad media de los electrodos originales de acero 304 L y 420 MC.

		Inicio-ensayo		Fin-ensayo	
		Electrodos Originales		Electrodos Originales	
		Ánodo	Cátodo	Ánodo	Cátodo
Acero 304L	RA ( $\mu\text{m}$ )	0,250	0,285	0,303	0,293
	RY ( $\mu\text{m}$ )	2,447	2,723	2,730	2,850
Acero 420 Mc	RA ( $\mu\text{m}$ )	1,693	1,805	1,745	1,717
	RY ( $\mu\text{m}$ )	9,937	10,165	9,772	9,942

En la Tabla 40 en general observando los valores de la rugosidad de ambos aceros, se ve claramente que el acero 420 MC posee una superficie más rugosa que el acero 304 L.

Respecto a los valores de la rugosidad del acero 304 L antes de los ensayos de electrólisis podemos ver que en general el ánodo presenta una menor rugosidad que el cátodo. Al finalizar los ensayos con 1, 2 y 3 A se observa que se produce un aumento de la rugosidad en el ánodo (RA = 5.3% y RY = 28.3%) y en el cátodo (RA = 0.8% y RY = 12.7%).

En el caso del acero 420 MC se observa que antes de los ensayos de electrólisis el ánodo presenta una menor rugosidad que el cátodo. Al finalizar los ensayos con 1, 2 y 3 A, en el ánodo se produce un aumento de la rugosidad (RA = 5.2% y RY = 16.5%) y en el cátodo una disminución de la misma (RA = 8.8% y RY = 22.3%).

De modo que se puede decir que después de los ensayos de electrólisis con electrodos originales tanto el acero 304 L como el acero 420 MC, presentan una mayor rugosidad en el ánodo que en el cátodo.

En la Tabla 41 se presentan los valores medios de la rugosidad media (RA) y máxima (RY) de los electrodos decapados de acero 304 L y 420 MC.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

Tabla 41- Rugosidad media de los electrodos decapados de acero 304 L y 420 MC.

		Inicio-ensayo		Decapado		Fin-ensayo	
		Electrodos Originales		Electrodos Originales		Electrodos Originales	
		Ánodo	Cátodo	Ánodo	Cátodo	Ánodo	Cátodo
<b>Acero 304L</b>	<b>RA (µm)</b>	0,270	0,427	0,292	0,260	0,313	0,295
	<b>RY (µm)</b>	2,672	3,780	2,712	2,580	3,058	2,653
<b>Acero 420 Mc</b>	<b>RA (µm)</b>	1,397	1,790	1,747	1,353	1,758	1,408
	<b>RY (µm)</b>	7,565	9,803	9,835	7,758	9,992	7,995

Respecto a los valores de la rugosidad de la Tabla 41 del acero 304 L antes de los ensayos de electrólisis, podemos ver que en general el ánodo presenta una menor rugosidad que el cátodo. Después de aplicar el tratamiento de decapado aumenta la rugosidad en el ánodo (RA = 2.2% y RY = 4%) y disminuye en el cátodo (RA = 16.7% y RY = 120%). Al finalizar los ensayos con 1, 2 y 3 A se observa que se produce un aumento de la rugosidad en el ánodo (RA = 2.1% y RY = 34.6%) y en el cátodo (RA = 3.5% y RY = 7.3%) con respecto a los electrodos decapados.

En el caso del acero 420 MC se observa que antes de los ensayos de electrólisis el ánodo presenta una menor rugosidad que el cátodo. Después de aplicar el tratamiento de decapado aumenta la rugosidad en el ánodo (RA = 35% y RY = 227%) y disminuye en el cátodo (RA = 43.7% y RY = 204.5%). Al finalizar los ensayos con 1, 2 y 3 A se observa que se produce un aumento de la rugosidad en el ánodo (RA = 1.1% y RY = 15.7%) y en el cátodo (RA = 5.5% y RY = 23.7%) con respecto a los electrodos decapados.

De modo que se puede decir que después de los ensayos de electrólisis con electrodos decapados tanto el acero 304 L como el acero 420 MC, presentan una mayor rugosidad en el ánodo que en el cátodo.

### 4.6 Estudio de porosidad de los aceros 304 L

Para el estudio de la porosidad se utilizó un microscopio *Nikon JAPAN* como se puede observar en la Figura 19. Las imágenes capturadas tienen un aumento de 500 veces la imagen real, siendo posible ver la estructura de grano del acero inoxidable 304 L y 420 MC.

El estudio de porosidad de los electrodos se realizó antes de los ensayos de electrólisis y después de los mismos. En la Figura 30, se observan los electrodos de acero 304 L en su estado natural.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable

---

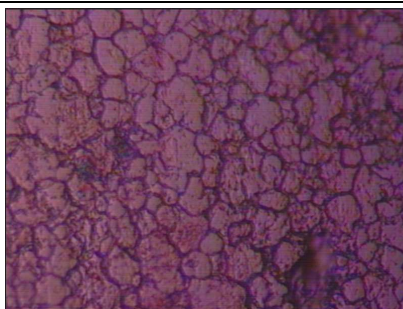


Figura 30- Porosidad del electrodo 304 L en su estado natural-Nikon JAPAN (50x).

En la Figura 31 se observa la rugosidad del ánodo y el cátodo al final de los ensayos de electrólisis.

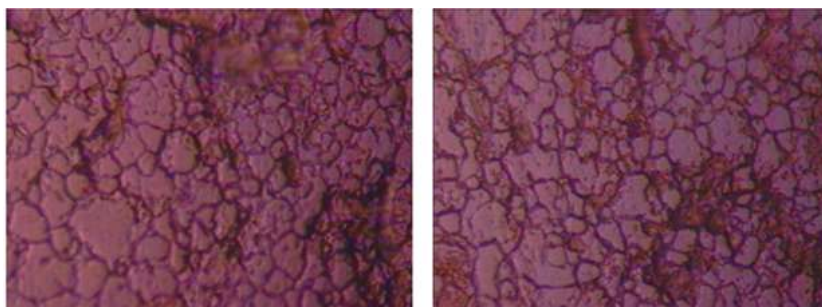


Figura 31- Porosidad del ánodo (a la izquierda) y el cátodo (a la derecha), al final de los ensayos de electrólisis con electrodos de acero 304 L-Nikon JAPAN (50x).

De la observación de la Figura 30 y la Figura 31, podemos decir que el acero 304 L original no sufre alteraciones visibles en la estructura de grano después de los ensayos de electrólisis, sin embargo, los resultados de la Tabla 40 revelan un aumento en la rugosidad del ánodo y el cátodo.

A continuación en la Figura 32, se presenta el grupo de electrodos de acero 304 L que fueron sometidos a un tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1M$  y  $\text{HNO}_3$  al 5%.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable

---

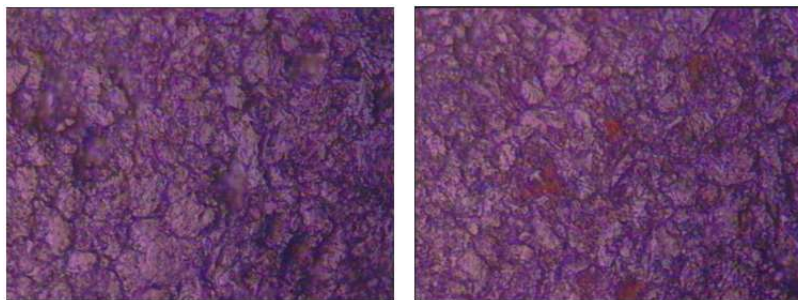


Figura 32- Porosidad del ánodo (a la izquierda) y el cátodo (a la derecha) del acero 304 L, después del tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1M$  y  $\text{HNO}_3$  al 5% - Nikon JAPAN (50x).

Después de observar la Figura 30 y la Figura 32 podemos decir que el decapado destruye la estructura de grano del metal, aumentando la rugosidad en el ánodo y disminuyendo la misma en el cátodo, conforme los resultados presentados en la Tabla 41.

Finalmente en la Figura 33, se puede observar la porosidad de los electrodos decapados al final de los ensayos de electrólisis.

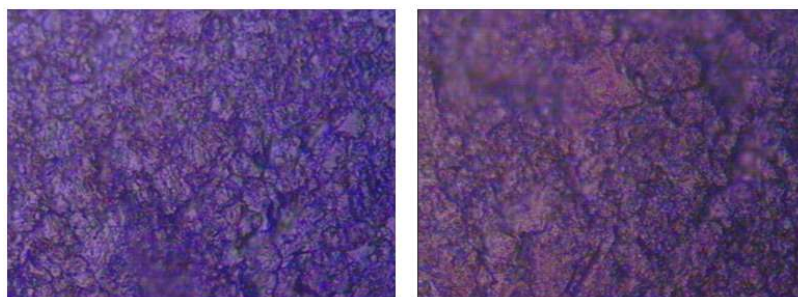


Figura 33- Porosidad del ánodo (a la izquierda) y el cátodo (a la derecha), de los electrodos decapados de acero 304 L, al final de los ensayos de electrólisis- Nikon JAPAN (50x).

A simple vista no se notan grandes cambios entre la Figura 32 y la Figura 33, pero los resultados de la Tabla 41 indican un aumento en la rugosidad del ánodo y el cátodo.

### 4.7 Estudio de porosidad de los aceros 420 MC

En la Figura 34, se observa la porosidad de los electrodos de acero 420 MC en estado natural, antes de los ensayos de electrólisis.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---



Figura 34- Porosidad del electrodo 420 MC en su estado natural-Nikon JAPAN (50x).

En la Figura 35, se observa la rugosidad del ánodo y el cátodo de acero 420 MC, al final de los ensayos de electrólisis.

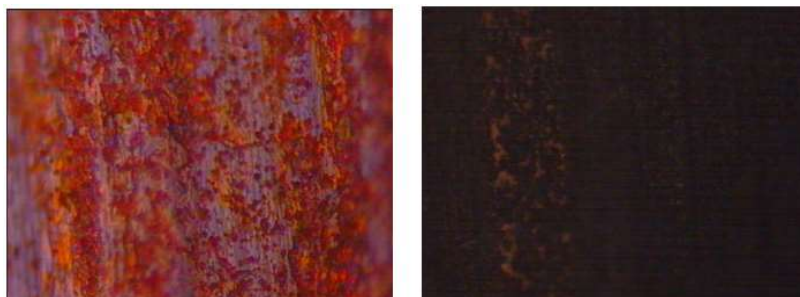


Figura 35- Porosidad del ánodo (a la izquierda) y el cátodo (a la derecha), al final de los ensayos de electrólisis con electrodos de acero 420 MC-Nikon JAPAN (50x).

De la comparación entre la Figura 34 y la Figura 35 se puede decir que después de los ensayos de electrólisis, el ánodo presenta cavidades que corresponden con un aumento de la rugosidad en la superficie del electrodo, según los resultados de la Tabla 40, y el cátodo presenta una disminución de la rugosidad así como una coloración negra con manchas castañas.

A continuación en la Figura 36, se presenta el grupo de electrodos de acero 420 MC que fueron sometidos a un tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1 \text{ mol/l}$  y  $\text{HNO}_3$  al 5%.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

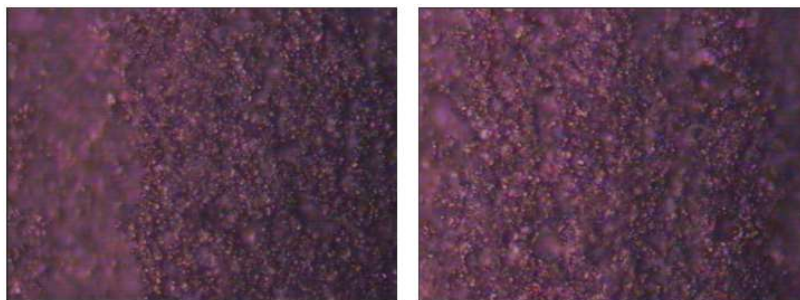


Figura 36- Porosidad del ánodo (a la izquierda) y el cátodo (a la derecha) del acero 420 MC, después del tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1M$  y  $\text{HNO}_3$  al 5% - Nikon JAPAN (50x).

De la comparación entre la Figura 34 y la Figura 36 se puede decir que el decapado altera la superficie del electrodo produciendo cavidades que aumentan la rugosidad en el ánodo y disminuyen la misma en el cátodo, según los resultados de la Tabla 41.

Finalmente en la Figura 37, se puede observar la porosidad de los electrodos decapados al final de los ensayos de electrólisis.

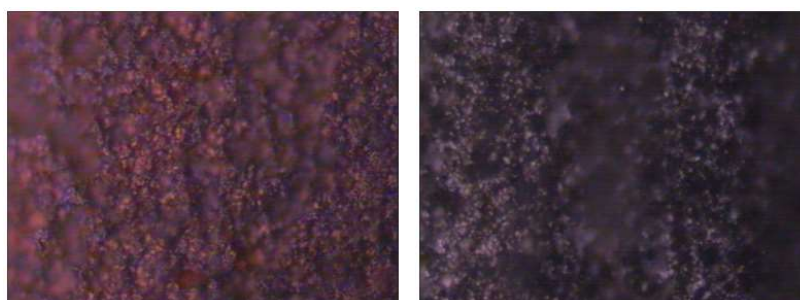


Figura 37- Porosidad del ánodo (a la izquierda) y el cátodo (a la derecha), de los electrodos decapados de acero 420 MC, al final de los ensayos de electrólisis- Nikon JAPAN (50x).

Finalmente después de comparar la Figura 36 , la Figura 37 y la Tabla 41 se puede decir que al final de los ensayos de electrólisis, el cátodo presenta una coloración gris oscura al igual que en los electrodos originales y se produce un aumento en la rugosidad del ánodo y el cátodo.

## Capítulo 5

### 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se discuten los datos y resultados obtenidos en las tablas y figuras del capítulo 4.

Respecto a los valores de la producción de gas de Brown utilizando distintas intensidades de corriente, ver Figura 26 y Figura 29, se deduce que el volumen de gas producido durante los ensayos de electrólisis, presenta un comportamiento lineal respecto al tiempo, es decir, para una misma unidad de tiempo es posible obtener distintos volúmenes de gas de Brown en función de la intensidad de corriente aplicada en los electrodos. Concordando con autores como Juma Yar, et al, [5] y Coro Ortiz, et al, [34], Se comprobó que el aumento de la intensidad de corriente provoca un aumento en la producción de gas. Siendo esta información de vital importancia si se desea adaptar una célula de electrolisis para el funcionamiento de un vehículo de combustión interna, ya que es posible graduar el caudal de gas en función de las necesidades del motor aumentando o disminuyendo la intensidad de corriente.

De la comparación entre los dos materiales, acero 304 L y acero 420 MC se deduce que ambos materiales tienen un comportamiento similar en lo que se refiere a la producción de gas de Brown. Ahora el acero 420 MC presenta una desventaja respecto al acero 304 L y es que contamina el electrolito (KOH) porque libera óxido durante el proceso de electrolisis. Según autores como Martínez, et al, [2] y Santos, et al, [6], los electrodos deben ser resistentes a la corrosión y a la oxidación. La liberación de estos óxidos puede dar lugar a reacciones secundarias que en un determinado punto perjudique el proceso de electrolisis o lo interrumpa. Además, la presencia prematura de estos óxidos durante los ensayos de electrolisis, es un indicativo de que el acero 420 MC presenta un mayor desgaste y consecuentemente una menor vida útil que el acero 304 L, por lo que se concluye que el acero 420 MC no es un buen material para ser utilizado en este tipo de procesos electroquímicos.

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

Fue posible determinar la influencia de un tratamiento de decapado en los electrodos, con ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), en la producción de gas de Brown.

De modo que se puede decir que en el caso del acero 304 L el decapado no parece favorecer la producción de gas de Brown. Por el contrario, disminuye notoriamente el volumen de gas. La mayor diferencia en cuanto a la producción de gas se presenta trabajando con una intensidad de corriente de 1 A, a medida que aumenta la intensidad a 2 y 3 A, ver Figura 26, la tendencia es aproximarse a la producción de gas de los electrodos originales. En el caso del acero 420 MC el tratamiento de decapado no presenta gran diferencia en la producción de gas de Brown respecto a los electrodos originales, ver Figura 29, los valores son realmente muy próximos. De modo que concordando con Lavorante, et al, [25], después de estudiar los resultados obtenidos, no se recomienda realizar un tratamiento de decapado en los electrodos por que se obtienen mejores resultados trabajando con electrodos en estado original. Además, el decapado debilita la estructura del metal disminuyendo la vida útil del electrodo.

Se determinó el consumo de electrolito (KOH) durante los ensayos experimentales, no representando un problema ya que se obtuvieron valores muy bajos de consumo de KOH, en especial el acero 420 MC decapado, como se puede ver en Tabla 33.

Fue posible determinar la influencia de la porosidad y la rugosidad del metal en la producción de gas de Brown.

Respecto al estudio de porosidad se concluye que el acero 304 L original no sufre alteraciones visibles en la estructura de grano después de los ensayos de electrolisis, sin embargo, se produce un aumento en la rugosidad tanto en el ánodo como en el cátodo, debido a la interacción de los electrodos en un ambiente corrosivo con hidróxido de potasio (KOH).

En los electrodos de acero 304 L que fueron sometidos a un tratamiento de decapado con HCl  $\approx 1\text{ mol/L}$  y HNO<sub>3</sub> al 5%, se observa que este procedimiento destruye la estructura de grano del metal, aumentando la rugosidad en el ánodo y disminuyendo la misma en el cátodo. Al finalizar los ensayos de electrólisis, en donde los electrodos decapados interaccionan con un electrolito básico (KOH), se produce un aumento en la rugosidad tanto del ánodo como del cátodo, conforme los resultados presentados en la Tabla 41. El aumento de la rugosidad en la superficie del electrodo facilita el desprendimiento de las burbujas de gas aumentando la producción de gas de Brown. A medida que aumenta la porosidad en la

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable**

---

superficie del acero, aumenta el área útil del metal a través de la formación de cavidades que favorecen un aumento en la producción de gas, dado que se dispone de una superficie mayor.

En el estudio de porosidad de los electrodos de acero 420 MC originales, se observó que después de los ensayos de electrolisis, el ánodo presenta corrosión por picadura ya que se forman cavidades que corresponden con un aumento de la rugosidad en la superficie del electrodo debido a la interacción del electrolito con el metal, sin embargo en el cátodo se produce una disminución de la rugosidad, según los resultados de la Tabla 40, así como una coloración negra.

En los electrodos de acero 420 MC que fueron sometidos a un tratamiento de decapado con  $\text{HCl} \approx 1 \text{ mol/L}$  y  $\text{HNO}_3$  al 5%, se observó que el decapado produce corrosión por picadura formando cavidades que aumentan la rugosidad en el ánodo y disminuyen la misma en el cátodo, según los resultados de la Tabla 41. Al finalizar los ensayos de electrolisis y después de ser expuestos los electrodos al hidróxido de potasio, que es una base fuerte, se produce un aumento en la rugosidad del ánodo y el cátodo según la Tabla 41 así como una coloración gris oscura en el cátodo también presente en los electrodos originales. El aspecto de ambos electrodos es muy poroso, lo cual favorece la producción de gas debido al aumento del área útil del metal a través de la formación de cavidades en la superficie del acero. La aparición de estas cavidades proporciona una superficie más rugosa que mejora el desprendimiento de las burbujas de gas. Es de gran importancia para el aumento de la producción de gas que las burbujas se desprendan rápidamente de la superficie del electrodo, ya que cuanto más tiempo permanezcan pegadas a la superficie, menor es el área útil de producción del electrodo.

Concordando con Zeng, et al,[30], Wang, et al,[35], y Mazloomi, et al,[49], la disminución del rendimiento en los ensayos de 1 A con electrodos de acero 304 L decapados, ver Tabla 17, se debe a que las burbujas se quedaban pegadas a la superficie del metal, como se puede ver en la Figura 38.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---



Figura 38-Burbujas pegadas en la superficie del electrodo 304 L.

Anteriormente se mencionó que el decapado no favorece la producción de gas en este material ya que el procedimiento destruye la estructura de grano del metal, aumentando la rugosidad en el ánodo y disminuyendo la misma en el cátodo. A pesar de que este fenómeno se repite en ambos materiales, acero 304 L y 420 MC, en el acero 420 MC trabajando con intensidades de 1 A las burbujas de gas no se quedaban pegadas a la superficie del electrodo. Este fenómeno se explica observando los valores de la Tabla 41 donde se puede ver claramente que el acero 420 MC presenta en general una superficie más rugosa que el acero 304 L. La rugosidad es un factor elemental en la producción de gas ya que cuanto más lisa sea la superficie del electrodo mayor dificultad tienen las burbujas de gas para desprenderse del metal. Cuanto más tiempo tardan las burbujas en liberarse de la superficie del material, menor es el área útil disponible para la producción de gas y, consecuentemente, el rendimiento del proceso decae. Debido a que los estudios que existen en este campo trabajan con intensidades de corriente mayores de 10 A, no se pueden comparar los resultados obtenidos en esta investigación. Para tener una referencia del caudal y rendimiento alcanzados en estudios similares cito como ejemplos a Sánchez Jalet, [50], que trabajó con una intensidad de corriente mínima de 4 A en electrodos de acero inoxidable 316 L y utilizó como electrolito KOH al 1%, consiguiendo producir un caudal de gas de Brown de 2.31 [mL/s] obteniendo un rendimiento del proceso de 31.03%. El máximo rendimiento que obtuvo, fue de 60.25 %, trabajando con 20 A y logrando producir un caudal de 22.39 ml/s.

Coro Ortiz, et al, [34], que utilizó como electrolito NaOH de concentración 1 M y aplicando 12 [V] y 58.30 A a electrodos de acero inoxidable 304, consiguió producir un caudal de gas de Brown de 0.1866 [L/s] y obtuvo un rendimiento del proceso de 34.41%.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

En la Tabla 42 y en la Tabla 43, se presentan los valores medios de rendimiento y caudal obtenidos en este trabajo.

Tabla 42- Valores medios de rendimiento y caudal para el acero 304 L.

Electrodos originales – acero 304 L					Electrodos decapados – acero 304 L			
Ensayo -1		Ensayo -2		Ensayo -1		Ensayo -2		
I	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>
A	mL/min	%	mL/min	%	mL/min	%	mL/min	%
1	13.4	58.1	13.4	57.8	6.9	29.9	6.0	26.2
2	26.8	58.2	26.8	58.0	23.1	50.0	23.4	50.7
3	<b>38.9</b>	<b>56.9</b>	38.9	56.7	35.8	52.4	38.7	55.9

Como se puede ver en la Tabla 42, en este trabajo el caudal máximo alcanzado para el acero 304 L es de 38.9 mL/min con un rendimiento del proceso de 56.9%. En la Tabla 43 el caudal máximo alcanzado es de 39.0 mL/min con un rendimiento de 56.5% para el acero 420 MC.

Tabla 43- Valores medios de rendimiento y caudal para el acero 420 MC.

Electrodos originales – acero 420 MC					Electrodos decapados – acero 420 MC			
Ensayo -1		Ensayo -2		Ensayo -1		Ensayo -2		
I	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>	Q <sub>m</sub>	η <sub>m</sub>
A	mL/min	%	mL/min	%	mL/min	%	mL/min	%
1	12.7	55.7	12.8	56.0	13.2	57.7	13.2	58.6
2	26.1	56.8	26.2	57.2	26.2	57.2	26.1	56.7
3	38.2	55.8	38.5	55.5	<b>39.0</b>	<b>56.5</b>	36.1	52.3

De modo que se concluye que la célula de electrolisis construida para esta investigación presenta resultados semejantes con otros estudios, teniendo en cuenta que la mayoría de los trabajos en esta área utilizan intensidades de corriente superiores.

## Capítulo 6

### 6 CONCLUSIONES

Finalizado este proyecto de investigación, se realizan una serie de conclusiones basadas en las observaciones y los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales.

En primer lugar, se consiguió con éxito diseñar, proyectar y construir una célula de electrólisis húmeda para producir gas de Brown.

Se logró producir gas de Brown utilizando como electrolito hidróxido de potasio (KOH) en una concentración próxima a 1 mol/L, y medir el volumen de gas producido utilizando una probeta graduada invertida.

Fue posible comparar el caudal de gas producido entre dos materiales, uno de referencia de estudios anteriores, acero inoxidable 304 L, y otro nuevo del que no se encontraron referencias de estudios anteriores, acero inoxidable 420 MC.

Se comprobó que el aumento de la intensidad de corriente aumenta la producción de gas de Brown.

Respecto a los electrodos, se deduce que el acero 304 L y 420 MC ambos tienen un comportamiento similar en lo que se refiere a la producción de gas de Brown, pero no se recomienda utilizar acero 420 MC en este tipo de procesos electroquímicos ya que éste, libera óxido durante la electrólisis y esto puede dar lugar a reacciones secundarias que en un determinado punto perjudique el proceso de electrólisis o lo interrumpa. Además, la presencia prematura de estos óxidos durante los ensayos, es un indicativo de que el acero 420 MC presenta un mayor desgaste e consecuentemente una menor vida útil que el acero 304 L. A pesar de estas limitaciones el acero 420 MC es un 40% más barato que el acero 304 L, por lo que sería interesante realizar un estudio de viabilidad económica en la fabricación de una célula de producción de hidrógeno que utilice electrodos de éste material.

## **Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

---

No se recomienda realizar un tratamiento de decapado en los electrodos porque se obtienen mejores resultados trabajando con electrodos en estado original. Además el decapado debilita la estructura del metal disminuyendo la vida útil del electrodo.

### **6.1 Propuestas de trabajos futuros**

Propongo como futuros trabajos de investigación, desarrollar una célula de electrolisis que incorpore una fuente de energía renovable como puede ser la energía eólica o solar. La idea es crear un dispositivo que sea autosuficiente en donde la energía solar o eólica sea almacenada en una batería y esta a su vez, proporcione la energía necesaria a la célula de electrolisis para obtener gas de Brown.

También un tema a investigar y desarrollar es un nuevo tipo de electrodos cuya superficie sea extremadamente rugosa y porosa y que para conseguir esta superficie no se utilicen tratamientos químicos, ya que debilitan la estructura del metal y acortan su vida útil. De modo que se deben estudiar nuevas técnicas y técnicas ya existentes para tal fin.

Un trabajo futuro realmente interesante seria investigar si la producción de gas aumenta al igual que el rendimiento del proceso utilizando peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) combinado con hidróxido de potasio (KOH). Estudiar los efectos de esta combinación sobre los electrodos y determinar el desgaste de los electrodos, así como su vida útil.

Recomiendo también para futuros proyectos utilizar plástico en lugar de vidrio como material para el cuerpo de la célula de electrolisis ya que el vidrio reacciona con el KOH.

## Referencias

1. Quezada Romero, E.M. and D.F. Torres Gualan, *Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Steem 1.6L*. 2014, Universidad Politécnica Salesiana: Cuenca.
2. Martínez Martínez, E. and J.R. Castellano Rivas, *Propuesta de un sistema dual de alimentación con oxihidrogeno y gasolina en un motor de combustión interna*, in *Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica*. 2010, Universidad De El Salvador.
3. Aguilar García, E., *Evaluación electroquímica de distintos arreglos de electrolizadores alcalinos*, in *Escuela Superior De Ingeniería Química E Industrias Extractivas*. 2015, Instituto Politécnico Nacional: México, D.F.
4. Velásquez, M., *Diseño de un generador de hidrógeno como combustible para los motores de combustión de ciclo otto en la Región Puno-2015*, in *Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistema*. 2016, Universidad Nacional Del Altiplano.
5. Juma Yar, D.A. and H.W. Martínez Anangonó, *Diseño e Instalación de un sistema de alimentación gasolina – HHO en el motor de combustión interna del vehículo monoplaza tipo buggy del laboratorio de mecánica de patio de la ESPE extensión Latacunga* 2015, ESPE-Universidad de Las Fuerzas Armadas.
6. Santos, D.M.F., C.A.C. Sequeira, and J.L. Figueiredo, *Hydrogen production by alkaline water electrolysis*. *Química Nova*, 2013. **36**: p. 1176-1193.
7. Lavorante, M.J., et al., *Estudio de la influencia de la microestructura superficial del acero inoxidable 316L para ser utilizado como material de electrodo para electrolizadores bipolares alcalinos en la producción de hidrógeno in Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía-HYFUSEN*. 2011: Buenos Aires, Argentina.
8. Dincer, I. and C. Acar, *Innovation in hydrogen production*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017. **42**(22): p. 14843-14864.
9. Durairaja, R.B., J. Shanker, and M. Sivasankar, *HHO Gas with Bio Diesel as a Dual Fuel with Air preheating Technology*. *Procedia Engineering*, 2012. **38**: p. 1112-1119.
10. Europea, C., *El Programa Marco de Investigación e Innovación de la UE*. Horizonte 2020 en breve, 2014.
11. Karim, G.A., *Hydrogen as a spark ignition engine fuel*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003. **28**(5): p. 569-577.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero Inoxidable

---

12. Li, H. and G.A. Karim, *Knock in spark ignition hydrogen engines*. International Journal of Hydrogen Energy, 2004. **29**(8): p. 859-865.
13. Talibi, M., et al., *Effect of hydrogen-diesel fuel co-combustion on exhaust emissions with verification using an in-cylinder gas sampling technique*. International Journal of Hydrogen Energy, 2014. **39**(27): p. 15088-15102.
14. Santoso, W.B., R.A. Bakar, and A. Nur, *Combustion Characteristics of Diesel-Hydrogen Dual Fuel Engine at Low Load*. Energy Procedia, 2013. **32**: p. 3-10.
15. Bailón Martínez, A., *Desarrollo de un sistema de generación de hidrógeno acoplado al tratamiento electroquímico de aguas superficiales utilizando energía solar*, in *Facultad de Química*. 2013, Universidad Autónoma Del Estado De México Toluca, Mexico.
16. Escalante Soberanis, M.A. and A.M. Fernandez, *A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(21): p. 12134-12140.
17. El-Kassaby, M.M., et al., *Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions*. Alexandria Engineering Journal, 2016. **55**(1): p. 243-251.
18. Szwaja, S., K.R. Bhandary, and J.D. Naber, *Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. **32**(18): p. 5076-5087.
19. autopista.es. *BMW tendrá un coche de hidrógeno en 2020*. 2016; Available from: <http://www.autopista.es>.
20. elEconomista.es. *BMW ya tiene listo su primer coche de hidrógeno*. 2015; Available from: <http://www.economista.es>.
21. Haug, P., M. Koj, and T. Turek, *Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(15): p. 9406-9418.
22. Jan Christian Koj, et al., *Site-Dependent Environmental Impacts of Industrial Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis*. energies MDPI, 2017.
23. Eléctricos, H.y. UCLA: *“El hidrógeno es el combustible más limpio que se conoce”*. 2017; Available from: [www.hibridosyelectricos.com](http://www.hibridosyelectricos.com).
24. Lavorante, M., et al., *Estudio sistemático del comportamiento de electrodos de acero inoxidable 316L picados con HCl para su uso en electrolizadores bipolares alcalinos*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 2011. **15**.
25. Lavorante, M.J., et al., *Effect of Distances between Electrodes, Agitation and Chemical Pickling Treatment in a Specific Electrolytic Cell for Alkaline Water Electrolysis*. J. Energy Power Sources, 2014. **1**: p. 123-133.
26. Kjartansdóttir, C.K., L.P. Nielsen, and P. Møller, *Development of durable and efficient electrodes for large-scale alkaline water electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 2013. **38**(20): p. 8221-8231.
27. Chakik, F.e., M. Kaddami, and M. Mikou, *Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(40): p. 25550-25557.

## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable

---

28. Dobó, Z. and Á.B. Palotás, *Impact of the current fluctuation on the efficiency of Alkaline Water Electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(9): p. 5649-5656.
29. Dobó, Z. and Á.B. Palotás, *Impact of the voltage fluctuation of the power supply on the efficiency of alkaline water electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(28): p. 11849-11856.
30. Zeng, K. and D. Zhang, *Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2010. **36**(3): p. 307-326.
31. Mohammadi, A., et al., *Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. **32**(2): p. 296-304.
32. Lerma, M.V.F., et al., *El hidrógeno: una alternativa viable al problema energético*.
33. López Podestá, N., *Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de agua*, in *Escuela de Ingeniería Eléctrica*. 2006, Universidad de Costa Rica.
34. Coro Ortiz, N.M. and D.B. Escobar Guerrero, *Método electroquímico para la obtención de gas de Brown mediante celdas electrolíticas seca y húmeda*. 2017, Universidad Central del Ecuador.
35. Wang, M., et al., *The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **29**: p. 573-588.
36. Pinela Erice, D.A., *Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia*, in *Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología*. 2009, Universidad de Chile: Santiago de Chile.
37. Herraiz Cardona, I., *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de Hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua*. 2012, Universitat Politècnica de València.
38. Nikolaidis, P. and A. Poullikkas, *A comparative overview of hydrogen production processes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **67**: p. 597-611.
39. dos Santos, K.G., et al., *Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **68**: p. 563-571.
40. Santilli, R.M., *A new gaseous and combustible form of water*. International Journal of Hydrogen Energy, 2006. **31**(9): p. 1113-1128.
41. López Ramírez, J.R., *Modelo dinámico de un electrolizador alcalino*. Universidad de Sevilla.
42. Lupi, C., A. Dell'Era, and M. Pasquali, *Nickel–cobalt electrodeposited alloys for hydrogen evolution in alkaline media*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009. **34**(5): p. 2101-2106.
43. Velásquez Piedrahíta, J.D. and J.F. Quiceno Castañeda, *Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis*, in *Facultad de Ingeniería Mecánica Pereira*. 2013, Universidad Tecnológica de Pereira.

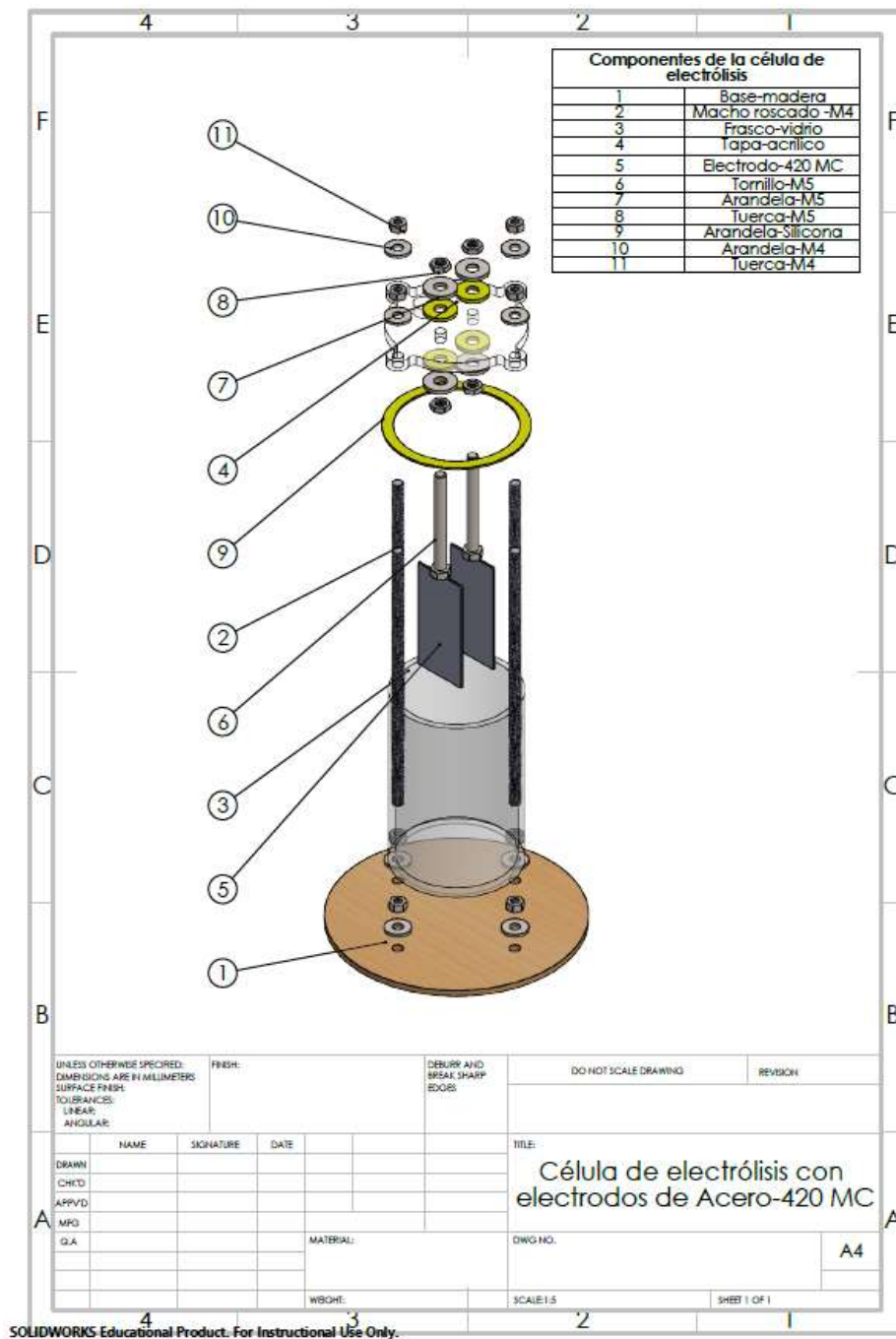
## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

---

44. Vincent, I. and D. Bessarabov, *Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **81**: p. 1690-1704.
45. Manabe, A., et al., *Basic study of alkaline water electrolysis*. Electrochimica Acta, 2013. **100**: p. 249-256.
46. Agostinho, S.M.L., et al., *O eletrólito suporte e suas múltiplas funções em processos de eletrodo*. Química Nova, 2004. **27**: p. 813-817.
47. Venturino, V.A., M.V. Lare, and F. Gras, *Caracterización de electrolizadores*. Facultad Regional Concordia – Universidad Tecnológica Nacional.
48. Sheffield, R.C., *Decapado y Pasivado del acero inoxidable.*, in *Euro Inox*. 2004: Luxemburgo.
49. Mazloomi, S.K. and N. Sulaiman, *Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(6): p. 4257-4263.
50. Sánchez Jalet, J.C., *Utilización del oxihidrógeno como aditivo para incrementar el desempeño de un motor de combustión interna.*, in *Escuela de Ingeniería Agrícola*. 2016, Universidad de Costa Rica.

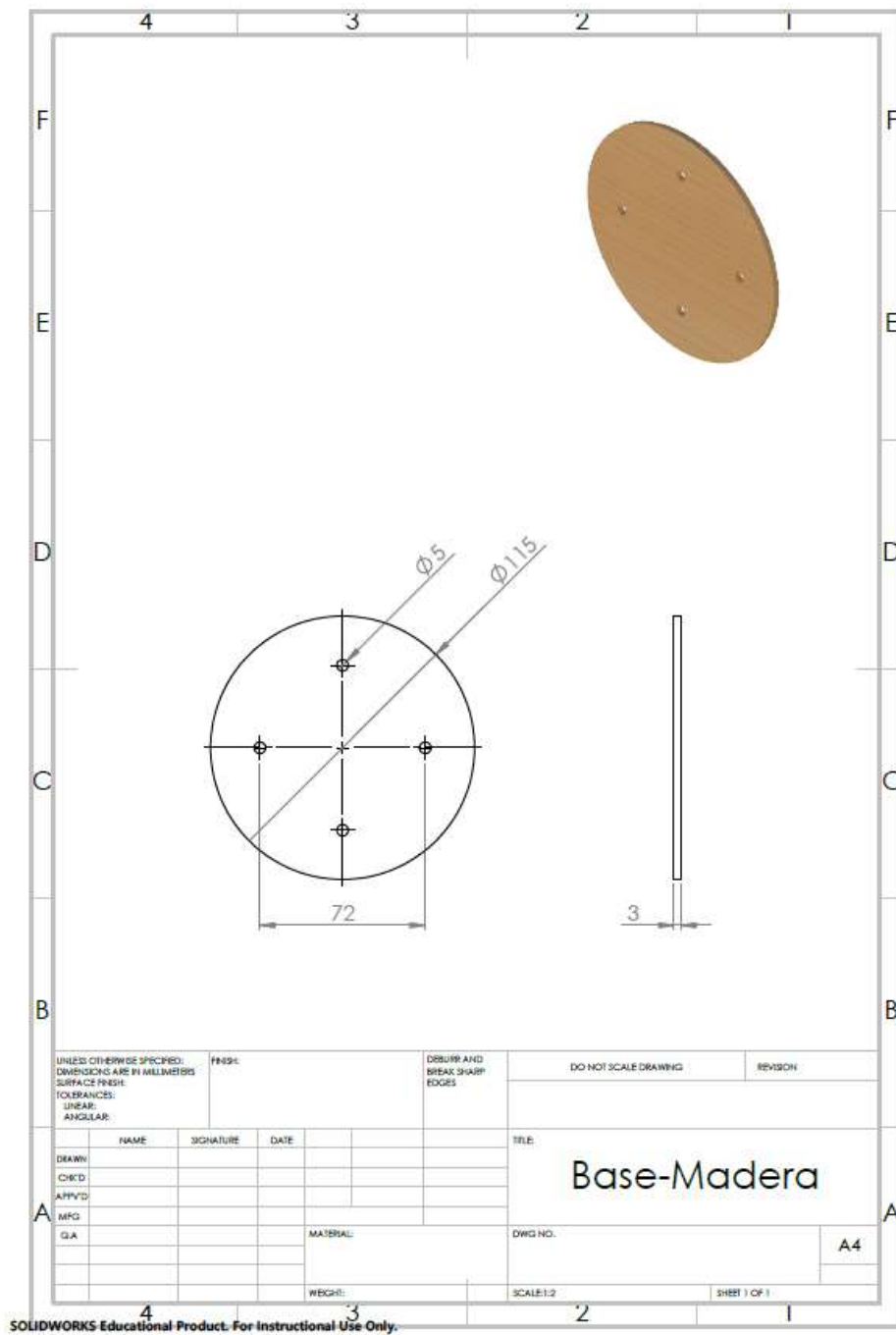
## 7 ANEXOS

### 7.1 Anexo A – Vista explosionada y componentes de la célula de electrólisis con electrodos de acero inoxidable 420 MC.



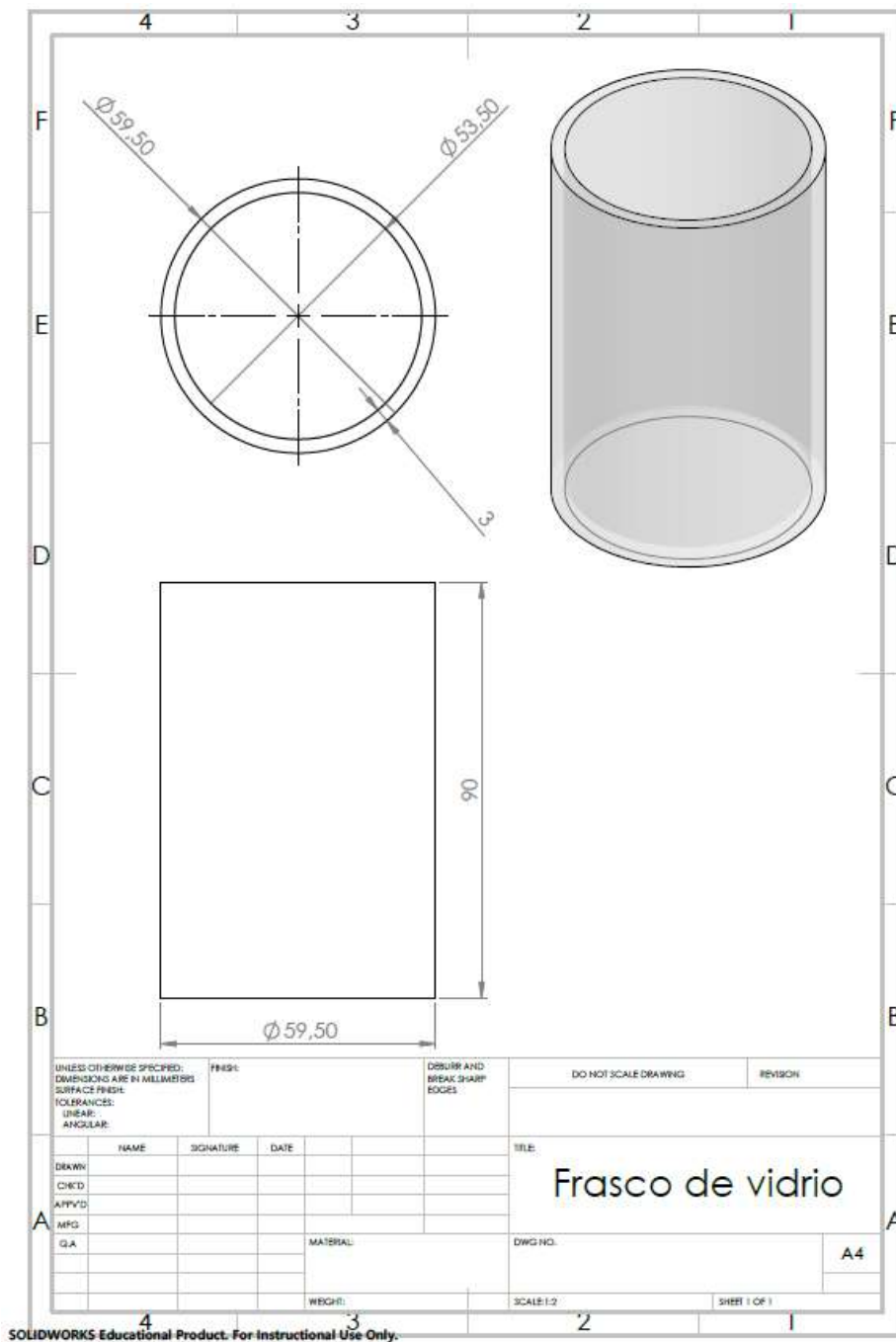
# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

## 7.2 Anexo B – Cotas de la base de madera.



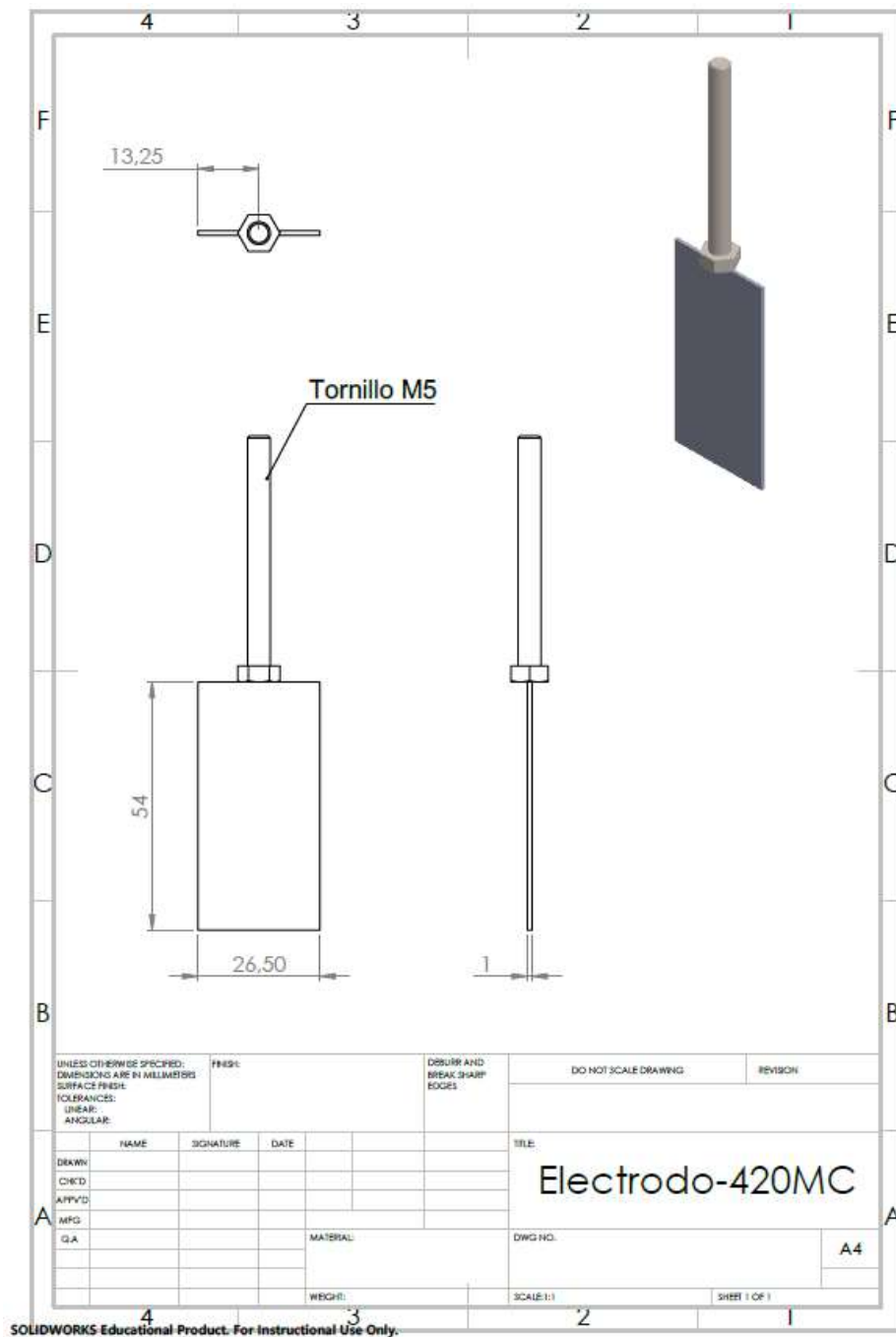
# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

## 7.3 Anexo C – Cotas del frasco de vidrio.



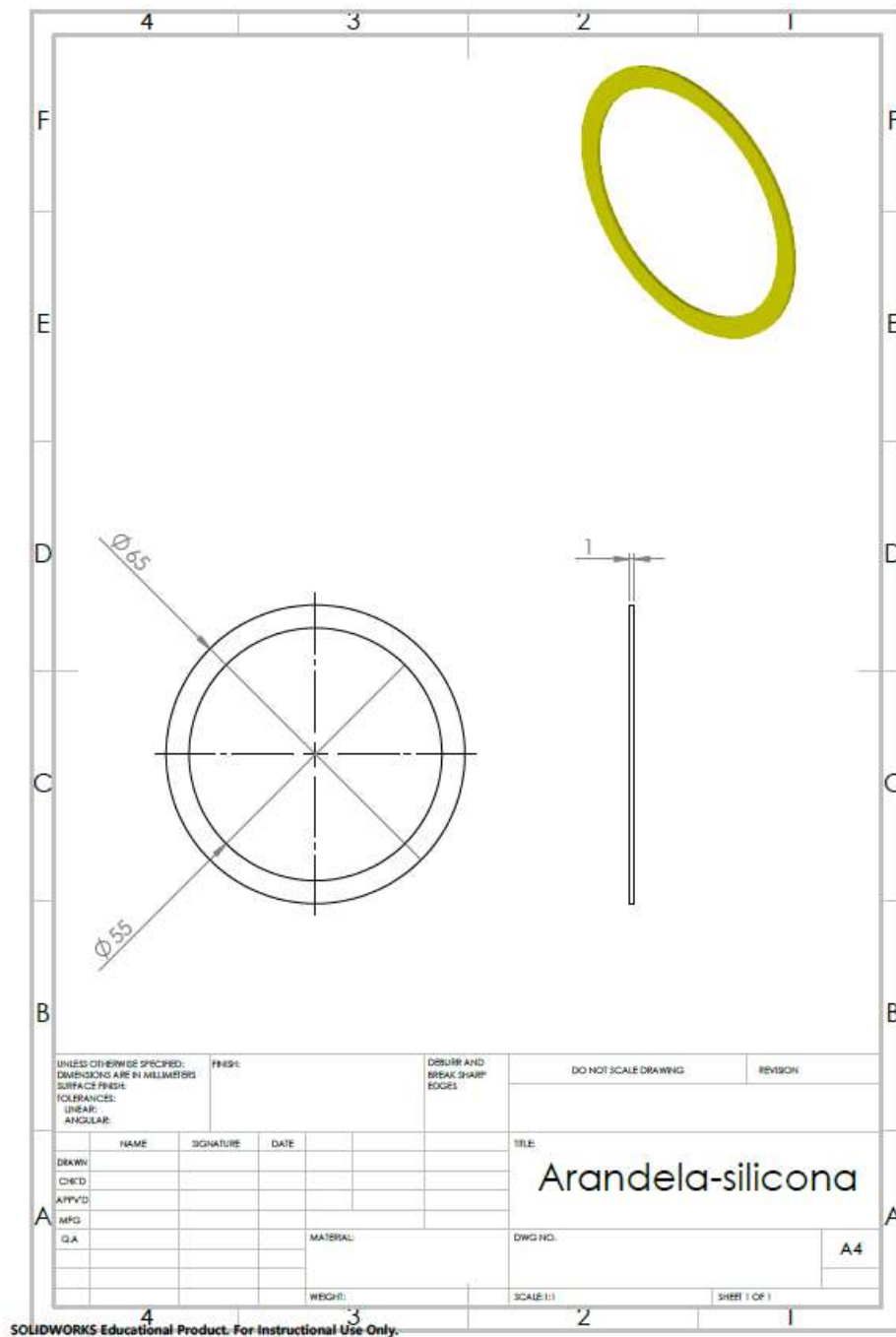
# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

## 7.4 Anexo D – Cotas de los electrodos de acero inoxidable 420 MC.



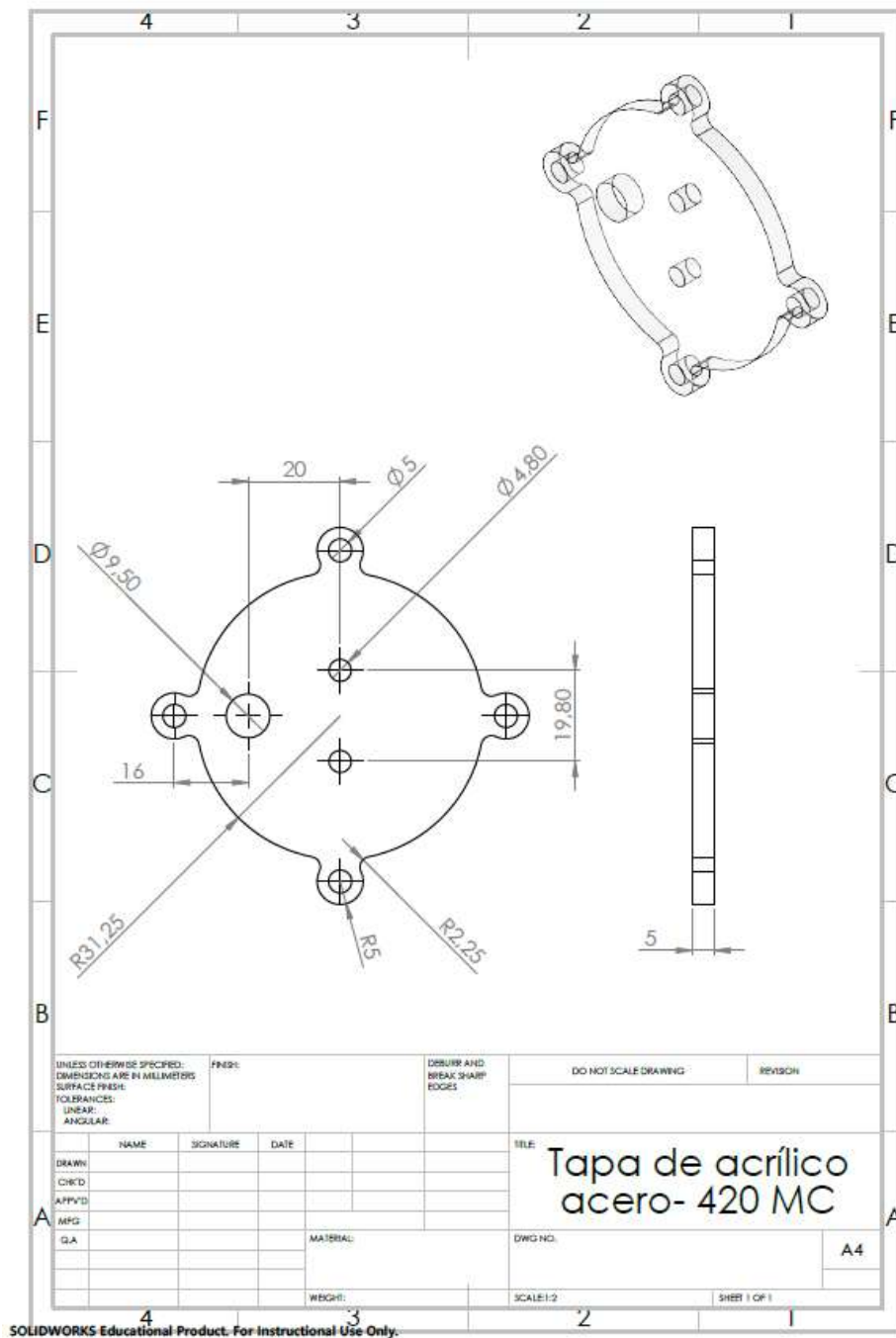
# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

## 7.5 Anexo E – Cotas de la arandela de silicona.



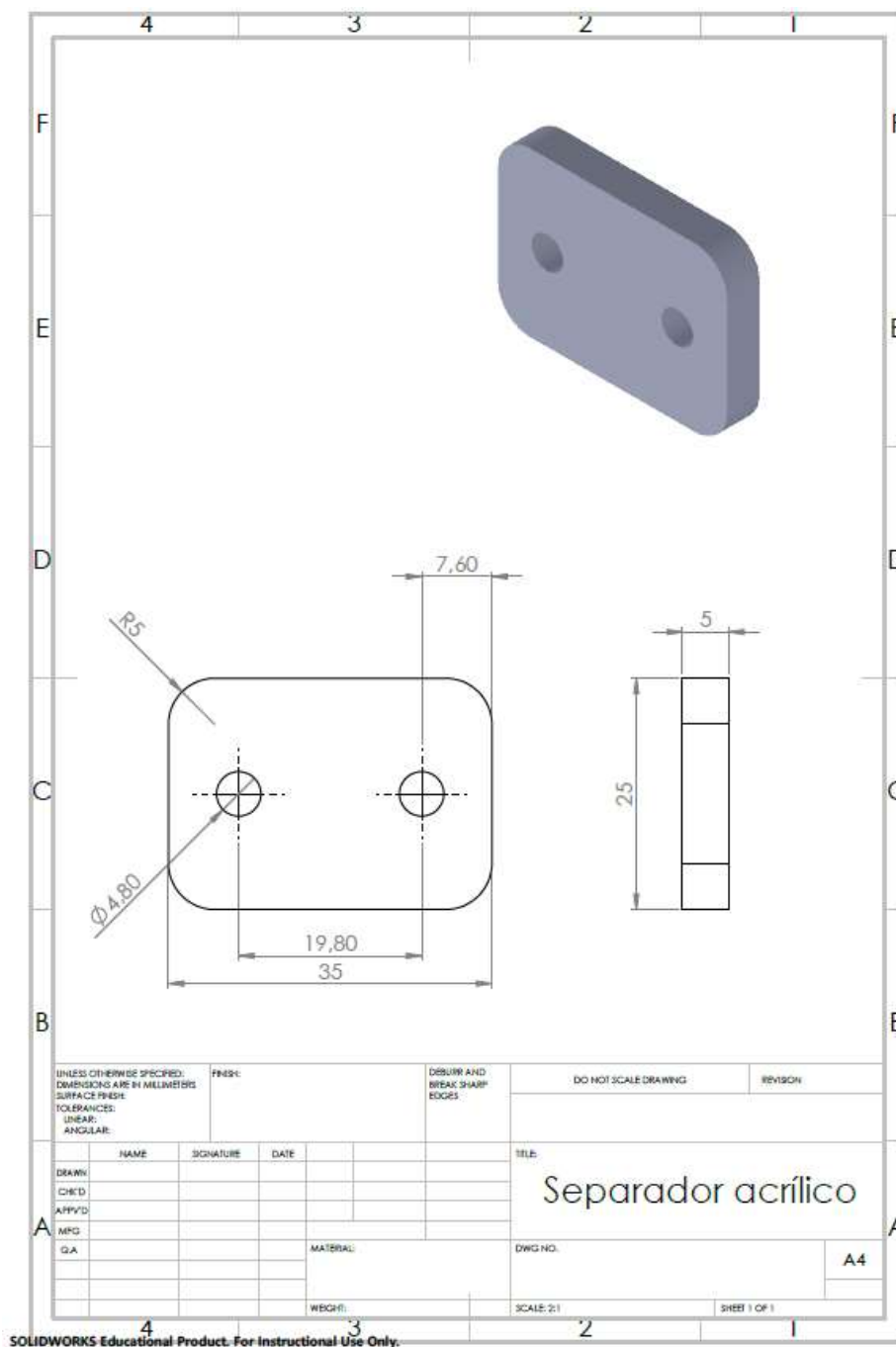
**Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

**7.6 Anexo F – Cotas de la tapa de acrílico del acero 420 MC.**



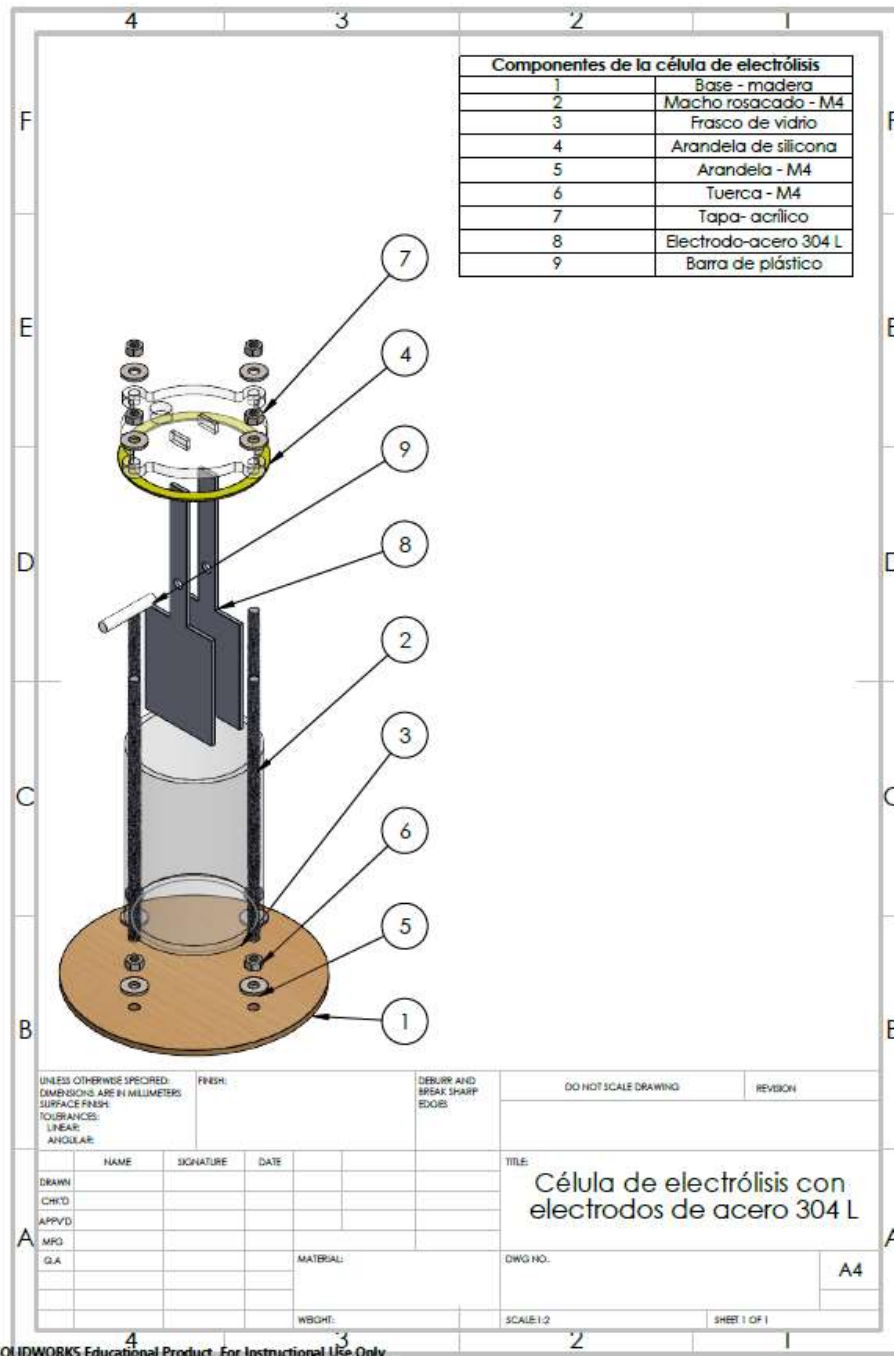
# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable

## 7.7 Anexo G – Cotas del separador de acrílico del acero 420 MC.



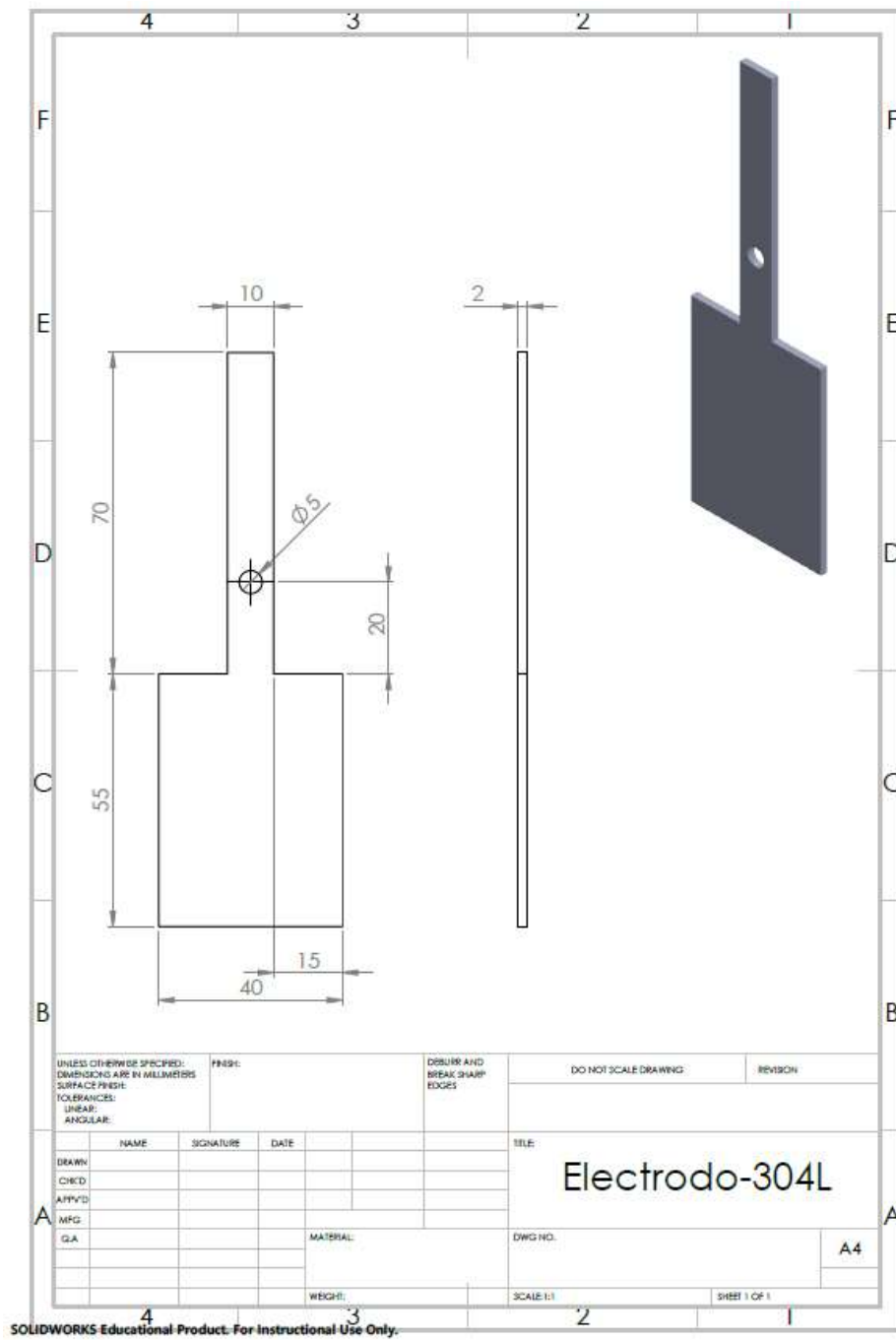
## Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

### 7.8 Anexo H – Vista explosionada y componentes de la célula de electrólisis con electrodos de acero inoxidable 304 L.



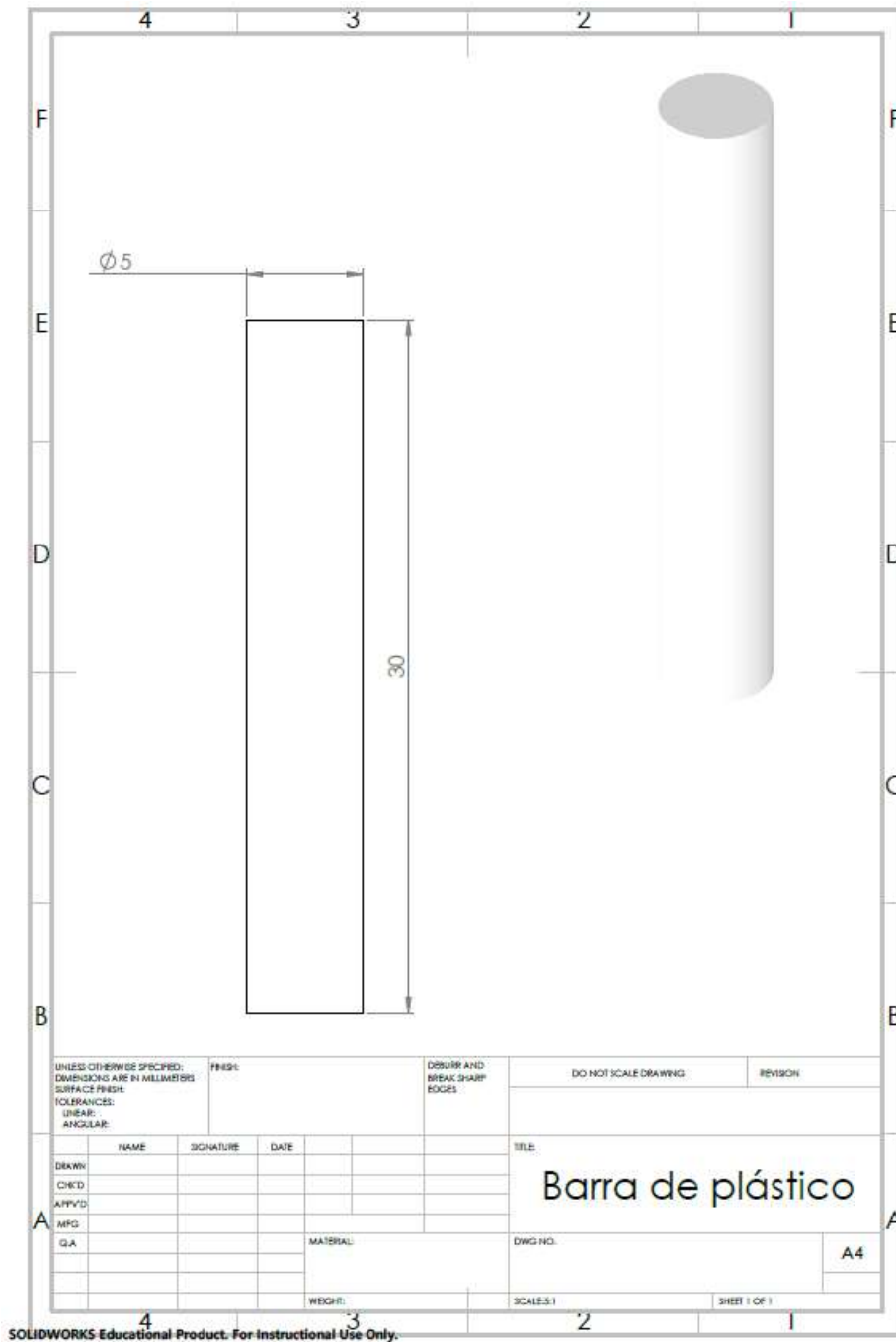
# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

## 7.9 Anexo I – Cotas de los electrodos de acero inoxidable 304 L.



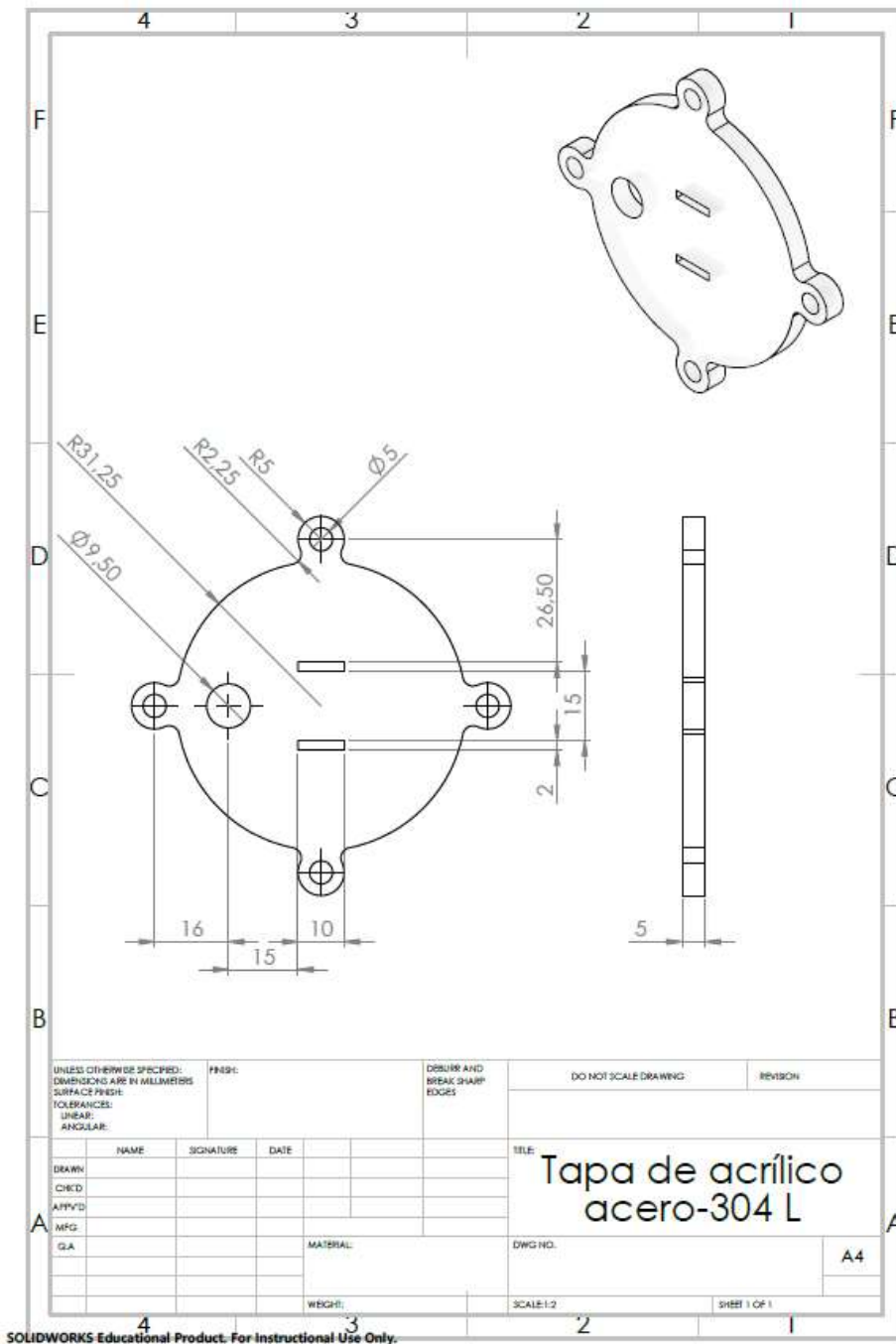
**Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

**7.10 Anexo J – Cotas de la barra de plástico.**



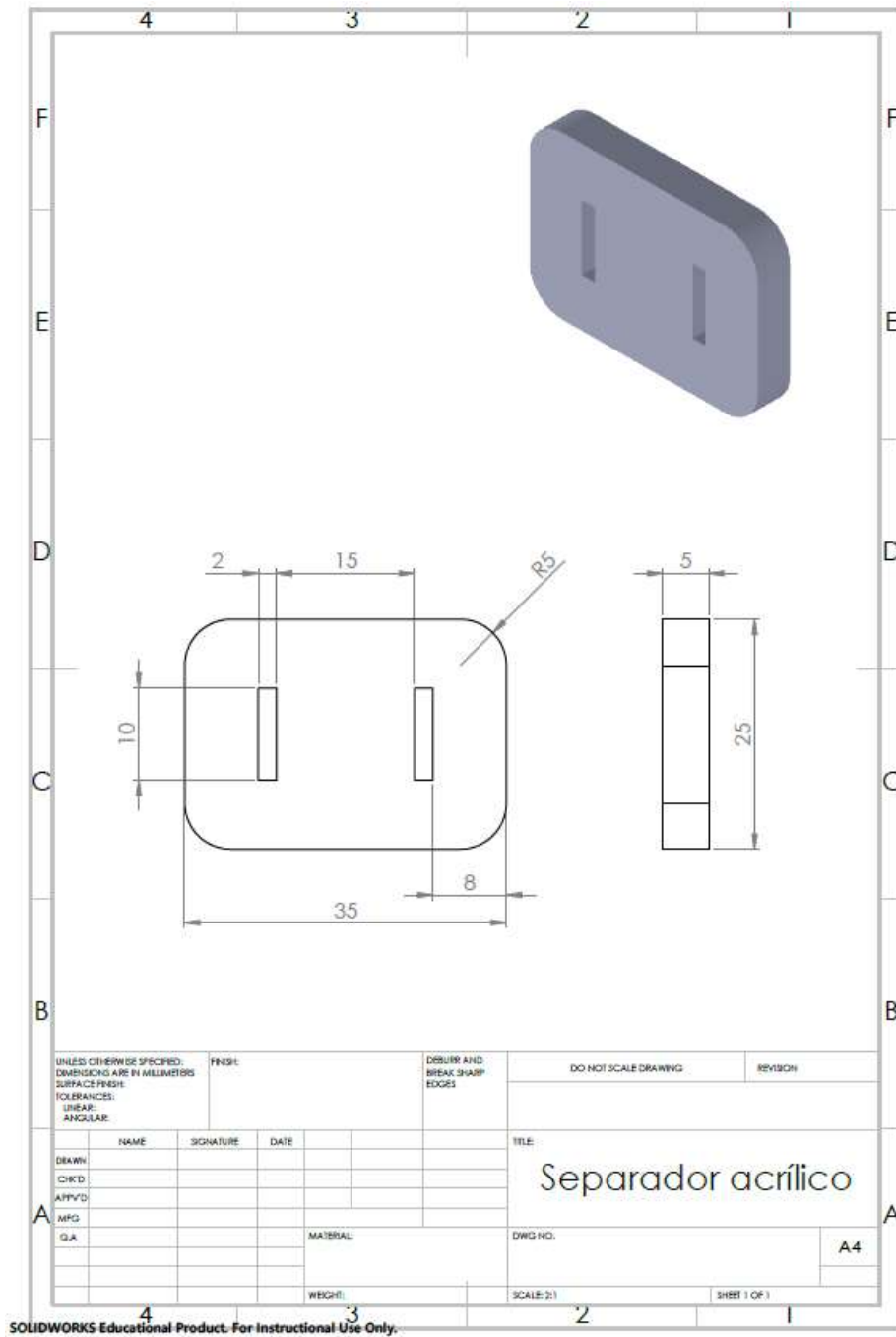
**Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable**

**7.11 Anexo K – Cotas de la tapa de acrílico del acero 304 L.**





**Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electroodos de Acero inoxidable**

**7.12 Anexo L – Cotas del separador de acrílico del acero 304 L.**



# Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable

## 7.13 Anexo O – Composición química del acero 304 L.

		Bolla/N°BU/DL/N°Licf. 20623	N° Certificat/PrüfN° 810507665	Produttore/Usine produc./Manufact./Hersteller. ALM.VIGO								
<b>CERTIFICADO DE CONFORMIDAD</b> SEGUN EN 10204 PARAGRAFO 4												
Appr. Stainless Steels & Solutions Ibérica SL C/ Puerto Fondó, 7-7 Pol. Can Calderín 08840 VILADELLANS (Barcelona) Nif: B28227304 - Nif. Ind. I.E.S.B. I227304 Telf. (93) 125 710 / Fax (93) 125 0133												
Prodotto/Erzeugnisform CHAPA AISI 304L		2B										
Cliente e/o destinatario - Client et/ou destinataire - Besteller und/oder Empfänger IMS PORTUGAL-COMERC.DE AÇOS,SA		N° ordine cliente - Votre référence - Ihre Auftrags Nr - Your reference ENCOMENDA N° PHA-3052287-AP1										
Qualità e specifiche - Nuance et spécifications techniques - Stahlsorte und Prüfbedingungen - Quality and Specifications <b>AISI 304L</b>												
Stato di fornitura - Etat de livraison - Lieferzustand - As delivered(1) 2B		Stato metallurgico - Etat métallurgique - Heat treatment condition - Lieferzustand 2B										
N° Conferma d'ordine Actus de réception Auftragsbestätigung N° Acknowledgement N°	Posizione N° Poste Post Nr Item N°	N° lotto interno N° de lot interne Internal batch N°	Profilo Profil Profile Sharpe	Dimensione Dimension Abmessung Size	Tolleranza Tolerance Toleranz Tolerance	Lunghezza Longueur Länge Length	Peso netto Masse Gewicht Weight					
801610718	4	1117990	CHAPA	2,000	1500,000	3000,00	1056,000					
		1117989					1056,000					
N° Colata N° de coulée Schmelze Nr Heat N°	Lotto fornitore Lot Fournisseur Band Nr Master batch	Trazione - Traction - Zugversuch - Tensile test				Resilienza - Résilience - Kerbschlagzähigkeit - Notch Toughness						
		Lim. di snervamento Limite d'élasticité Streckgrenze Yield Strength	Carico di rottura Résistance tract. Zugfestigkeit Tensile strength	Allungamento Elongation Dehnung	Allungamento Breakdown Bruchdehnung	Allungamento Uniform Gleichmaßdehnung	Forma Type Form Type	Sens Sensi. Richt. Direct.	Temperatura Température Test Temperature	Valori Valeurs individuelles Einzelwerte Individual values	Media Moyenne Mittelwerte Average	Durezza Dureté Härte Hardness
		0.2%	1%									
		RP02	RP1	RM	A							HRB
		N/M	N/M	N/M								
746028	079244	276	316	610	59							79
746028	079244	276	316	610	59							79
		C	SI	MN	P	S	N	CR				NI
746028	079244	0,019	0,460	1,500	0,030	0,001	0,071	18,070				8,020
746028	079244	0,019	0,460	1,500	0,030	0,001	0,071	18,070				8,020
						CO						
746028	079244					0,153						
746028	079244					0,153						
Test : (1 = OK)												
746028												
746028												
C.INT = Corrosione intergranul SCH. = Schlackeansatz			EDD.C = Controllo non distruttivo FLANG. = Flangatura			P.PN. = Prova pneumatica REVFL. = Appiatt. saldatura (Re			C.MES = Contr. antimiscelament P.RET. = Essai de retournement			
746028	079244	I. 1.4307 I.4301 2B EN 10088-2 14 MILL CERTIFICATE BS EN 10 RECEPTION NF EN 10204/3.1 ABNAHMEPRUEFZEUGNIS DIN EN 10204 Invernehmen mit dem TÜV SÜD - Auf Gegenseinigung wird verz dance with TÜV SÜD - Verification is not required Etalil en										
746028	079244	I. 1.4307 I.4301 2B EN 10088-2 14 MILL CERTIFICATE BS EN 10 RECEPTION NF EN 10204/3.1 ABNAHMEPRUEFZEUGNIS DIN EN 10204 Invernehmen mit dem TÜV SÜD - Auf Gegenseinigung wird verz dance with TÜV SÜD - Verification is not required Etalil en										
											Le 18/01/18 Signature de l'inspecteur	
												

**Construcción de una Célula de Producción de Gas de Brown Utilizando Electrodo de Acero inoxidable**

**7.14 Anexo P – Composición química del acero 420 MC.**

<b>NORMAS</b>	<b>PERFIS DISPONÍVEIS</b>		
EN: S420MC		<b>Espessura</b>	<b>Tolerância</b>
DIN: QSt E 420 TM	Chapa	3 - 16 mm	
W.NR.: 1.0980			
FORNECIMENTO: EN 10149-1; EN 10149-2			
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) 1</b>			
	Min	Med	Max
C			0,120
Si			0,500
Mn			1,600
P			0,025
S			0,015
Al	0,015		
Nb+V+Ti			0,220
CEV (CEV=C+Mn76+(Ni+Cu)/15+(Cr+Mo+V)/5)	NULL	NULL	NULL
CET (CET=C+[Mn+Mo]/10+Ni/40+(Cr+Cu)/20)	NULL	NULL	NULL